



**INAOE**

**Instituto Nacional de Astrofísica,  
Óptica y Electrónica.**

**Análisis de tolerancias de la óptica de  
MEGARA: un espectrógrafo multi-objeto para  
el Gran Telescopio de Canarias**

**por**

**Ing. Rafael Ortiz Aguilera**

**Asesores:**

**Dra. Esperanza Carrasco Licea**

**Dr. Gonzalo Páez Padilla**

**Tesis**

Presentada en Cumplimiento Parcial

de los Requisitos

para el Grado de

**Maestro en Ciencias en la Especialidad de  
Astrofísica**

©INAOE 2012

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.





*A mis padres, que con su esfuerzo y apoyo han hecho que yo salga siempre adelante.*

## **Agradecimientos**

Quiero dar mi agradecimiento a CONACYT en primer lugar, que por medio de las becas y del apoyo a proyectos de investigación ayuda a la preparación de capital humano de alto nivel. Sin la ayuda económica que me ofreció durante mis estudios de maestría no hubiera podido dedicarme de tiempo completo a este trabajo.

Agradezco también al INAOE que me abrió las puertas del conocimiento y me ayudó a ampliar mis fronteras, sin duda venir a estudiar a esta institución es algo que no cambiaría por nada. He tenido grandes experiencias, buenas y malas, pero sobre todo he aprendido mucho.

A mis asesores, la Dra. Esperanza Carrasco y el Dr. Gonzalo Páez Padilla, quiero hacerles una mención de gratitud por presentarme un proyecto en el que me agradó mucho participar, que combina mi gusto por la óptica, la computación y la instrumentación. También quiero agradecerles por el tiempo y todos los conocimientos dedicados a esta tesis, ya que sé lo ocupados que están.

A mis sinodales, el Dr. Alejandro Cornejo, el Dr. Fermín Granados y el Dr. Daniel Ferrusca por sus recomendaciones en las etapas finales de mi tesis.

También quiero agradecer a mis padres, Adriana Aguilera Acuña y Benito Ortiz Zárraga, que siempre me han apoyado en todo lo que hago y que estarán conmigo dándome un sustento incondicional. A mis hermanos, a los de sangre y a los que se conocen después, que me hacen sentir en familia cada que los veo.

Extiendo mi gratitud a todos mis amigos y compañeros de la maestría, que me ayudaron en mis estudios y en lo personal.

Finalmente quiero agradecer a mi ahora prometida, Virginia Hanessian, quién a pesar de todo estuvo al pie del cañón conmigo y es un pilar en mi vida en el que me puedo apoyar.

## **Resumen**

### **Análisis de tolerancias de la óptica de MEGARA: un espectrógrafo multi-objeto para el Gran Telescopio de Canarias**

Rafael Ortiz Aguilera

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2012

Asesores: Dra. Esperanza Carrasco Licea y Dr. Gonzalo Páez Padilla

MEGARA es un espectrógrafo multi-objeto para el Gran Telescopio de Canarias con resolución de media a alta (R de 5600, 10000 y 17000) y opera en tres modos de observación que cubren diferentes áreas del cielo y que pudieran ser empleados simultáneamente. Es crítico durante el diseño de cualquier sistema óptico destinado a ser manufacturado decidir un presupuesto de fabricación y ensamble. Este presupuesto debe considerar cualquier posible compensación que se usará durante el proceso de manufactura para mitigar la degradación del desempeño introducida por variaciones de fabricación. En este trabajo de tesis se realiza un análisis exhaustivo de tolerancias de fabricación y de ensamble de los elementos ópticos de MEGARA para la obtención de los márgenes de error óptimos en costo y en desempeño del sistema. Se utilizan, el método de sensibilidad directo, el método de sensibilidad inverso y modelos estadísticos basados en simulaciones Monte Carlo para predecir el desempeño de la óptica del espectrógrafo. Se parte del diseño en ZEMAX y de las tolerancias provistas por el diseñador del sistema, Sánchez-Blanco (2011). En el análisis inverso se obtiene un margen de tolerancias para cada parámetro en el que la función de mérito se comporta adecuadamente sin salirse de los requerimientos y así saber si las tolerancias de diseño se pueden relajar o si necesitan un ajuste dependiendo el caso. A su vez se intentan mostrar las razones físicas de por qué ciertos parámetros del diseño son mas críticos que otros y por qué se comportan de diferente forma en cada una de las configuraciones del espectrógrafo.

## Tabla de Contenido

<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XX</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b>	<b>XXV</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos Generales.....	3
1.2. Planteamiento del Problema .....	3
1.3. MEGARA .....	4
1.3.1. El instrumento.....	6
1.3.2. Requerimientos .....	9
1.3.3. Motivación científica .....	11
1.3.4. Diseño de la óptica.....	13
<b>CAPÍTULO 2: TOLERANCIAS</b>	<b>23</b>
2.1. Tolerancias Ópticas .....	23
2.1.1. Precisión de la superficie .....	24
2.1.2. Calidad de la superficie.....	25
2.1.3. Espesor.....	25
2.1.4. Centrado.....	26
2.1.5. Materiales.....	28
2.1.6. Factor de costo relativo .....	28

2.2. Análisis de Tolerancias.....	29
2.3 Evolución del Análisis de Tolerancias .....	32
2.2. Métodos de Análisis .....	37
<b>CAPÍTULO 3: REPRODUCCIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LAS TOLERANCIAS DE DISEÑO DE LOS ELEMENTOS ÓPTICOS DE MEGARA</b>	<b>39</b>
3.1. Objetivos particulares .....	40
3.2. Desarrollo .....	41
3.3. Resultados.....	46
3.3.1. Tolerancias de manufactura del colimador .....	46
3.3.2. Tolerancias de manufactura de la cámara.....	48
3.3.3. Tolerancias de alineación del colimador.....	49
3.3.4. Tolerancias de alineación de la cámara.....	50
3.3.5. Tolerancias de errores desconocidos .....	51
3.4. Discusión de resultados .....	51
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS EXTENSIVO DE TOLERANCIAS DE LOS ELEMENTOS ÓPTICOS DE MEGARA</b>	<b>55</b>
4.1. Objetivos particulares.....	55
4.2. Desarrollo .....	55
4.3. Resultados .....	61
4.3.1. Tolerancias de manufactura del colimador .....	61
4.3.2. Tolerancias de manufactura de la cámara.....	64
4.3.3. Tolerancias de alineación del colimador.....	69
4.3.4. Tolerancias de alineación de la cámara.....	71
4.3.5. Tolerancias de errores desconocidos .....	75

4.4. Discusión de resultados .....	78
<b>CAPÍTULO 5: ANÁLISIS INVERSO DE TOLERANCIAS</b>	<b>81</b>
5.1. Objetivos Particulares .....	82
5.2. Desarrollo .....	82
5.3. Resultados.....	83
5.3.1. Tolerancias de manufactura del colimador .....	84
5.3.2. Tolerancias de alineación del colimador.....	95
5.3.3. Tolerancias de manufactura de la cámara.....	100
5.3.4. Tolerancias de alineación de la cámara.....	109
5.4. Discusión de Resultados .....	116
5.4.1. Colimador .....	116
5.4.2. Cámara .....	129
5.4.3. Resumen.....	141
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO</b>	<b>152</b>
6.1. Revisión y conclusiones de las tolerancias más sensibles del sistema. ....	152
6.1.1. Configuración HR Parámetro: Espesor.....	155
6.1.2. Configuración HR Parámetro: Cuña en X .....	155
6.1.3. Configuración MR_R Parámetro: Inclinación en X .....	157
6.1.4. Configuración MR_R Parámetro: Descentrado en Y .....	158
6.2. Conclusiones generales.....	158
6.3. Trabajo a futuro .....	161
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>163</b>

## Lista de Tablas

Tabla 1.1:	Características principales de los modos de la unidad de campo integral y el modo MOS. ....	8
Tabla 1.2:	Rejillas requeridas por MEGARA: especificaciones de las VPH. ....	21
Tabla 2.1:	Tolerancias típicas de la fabricación óptica. Extraída de Smith (2008). ....	29
Tabla 3.1:	Valores nominales y tolerancias de los parámetros de fabricación de cada elemento del colimador. Diseño de Agosto de 2011. ....	44
Tabla 3.2:	Tolerancias de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador. Diseño de Agosto de 2011.....	44
Tabla 3.3:	Valores nominales y tolerancias de los parámetros de fabricación de cada elemento de la cámara. Diseño de Agosto de 2011.....	45
Tabla 3.4:	Valores de tolerancias de los parámetros de alineación de cada uno de los elementos del colimador.....	45
Tabla 3.5:	Valores de tolerancias de los parámetros de alineación de cada uno de los elementos de la cámara.....	45
Tabla 3.6:	Valores de las tolerancias de errores desconocidos. Errores intrínsecos de los aparatos de medición. ....	46
Tabla 3.7:	Comparativa entre los resultados obtenidos en Sánchez-Blanco (2011) y en este trabajo de tesis, a la derecha la diferencia en porcentaje entre los dos valores. ....	52

Tabla 3.8:	Comparativa entre los resultados de 100 y 1000 MC el valor más confiable tiende a ser el de 1000 MC ya que se tienen 10 veces más muestras. ....	53
Tabla 3.9:	Comparación de las degradaciones predichas en cada uno de los 5 rubros de tolerancias tratadas. ....	54
Tablas 4.1:	Valores nominales y tolerancias de los parámetros de fabricación de cada elemento del colimador. Diseño de Noviembre de 2011.....	59
Tablas 4.2:	Tolerancias de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador. Diseño de Noviembre de 2011. ....	59
Tabla 4.3:	Valores nominales y tolerancias de los parámetros de fabricación de cada elemento de la cámara. Diseño de Noviembre de 2011.....	59
Tabla 4.4:	Valores de tolerancias de los parámetros de alineación de cada uno de los elementos del colimador. Diseño de Noviembre de 2011. ....	60
Tabla 4.5:	Valores de tolerancias de los parámetros de alineación de cada uno de los elementos de la cámara. Diseño de Noviembre de 2011.....	60
Tabla 4.6:	Comparativa de las degradaciones totales entre las cuatro configuraciones de MEGARA utilizadas en el análisis. ....	78
Tabla 4.7:	Degradación total esperada en las cuatro configuraciones debido a los diferentes tipos de error. *Valores tomados de Sánchez-Blanco (2011). ....	79
Tabla 5.1:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de espesor por elemento del colimador. ....	87

Tabla 5.2:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de índice de refracción por elemento del colimador. ....	87
Tabla 5.3:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de cuña en el eje X por superficie del colimador. ....	87
Tablas 5.4:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de cuña en el eje Y por superficie del colimador. ....	87
Tabla 5.5:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de radio de curvatura por superficie del colimador. ....	88
Tabla 5.6:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de irregularidad por superficie del colimador. ....	88
Tabla 5.7:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador. ....	88
Tabla 5.8:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de espesor por elemento del colimador. ....	89
Tabla 5.9:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de índice de refracción por elemento del colimador. ....	89
Tabla 5.10:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de cuña en el eje X por superficie del colimador. ....	89
Tabla 5.11:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de cuña en el eje Y por superficie del colimador. ....	90

Tabla 5.12:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de radio de curvatura por superficie del colimador. ....	90
Tabla 5.13:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de irregularidad por superficie del colimador. ....	90
Tabla 5.14:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador. ....	91
Tabla 5.15:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de espesor por elemento del colimador. ....	91
Tabla 5.16:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de índice de refracción por elemento del colimador. ....	91
Tabla 5.17:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de cuña en el eje X por superficie del colimador. ....	92
Tabla 5.18:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de cuña en el eje Y por superficie del colimador. ....	92
Tabla 5.19:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de radio de curvatura por superficie del colimador. ....	92
Tabla 5.20:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de irregularidad por superficie del colimador. ....	93
Tabla 5.21:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador. ....	93

Tabla 5.22:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de espesor por elemento del colimador. ....	93
Tabla 5.23:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de índice de refracción por elemento del colimador. ....	94
Tabla 5.24:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de cuña en el eje X por superficie del colimador. ....	94
Tabla 5.25:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de cuña en el eje Y por superficie del colimador. ....	94
Tabla 5.26:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de radio de curvatura por superficie del colimador. ....	95
Tabla 5.27:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de irregularidad por superficie del colimador. ....	95
Tabla 5.28:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador. ....	95
Tabla 5.29:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de inclinación en X por elemento del colimador. ....	96
Tabla 5.30:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de inclinación en Y por elemento del colimador. ....	97
Tabla 5.31:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de descentrado en X por elemento del colimador. ....	97

Tabla 5.32:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de descentrado en Y por elemento del colimador. ....	97
Tabla 5.33:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de inclinación en X por elemento del colimador. ....	97
Tabla 5.34:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de inclinación en Y por elemento del colimador. ....	98
Tabla 5.35:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de descentrado en X por elemento del colimador. ....	98
Tabla 5.36:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de descentrado en Y por elemento del colimador. ....	98
Tabla 5.37:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de inclinación en X por elemento del colimador. ....	98
Tabla 5.38:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de inclinación en Y por elemento del colimador. ....	99
Tabla 5.39:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de descentrado en X por elemento del colimador. ....	99
Tabla 5.40:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de descentrado en Y por elemento del colimador. ....	99
Tabla 5.41:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de inclinación en X por elemento del colimador. ....	99

Tabla 5.42:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de inclinación en Y por elemento del colimador.....	100
Tabla 5.43:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de descentrado en X por elemento del colimador. ....	100
Tabla 5.44:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de descentrado en Y por elemento del colimador. ....	100
Tabla 5.45:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de espesor por elemento de la cámara. ....	103
Tabla 5.46:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de cuña en el eje X por superficie de la cámara.....	103
Tabla 5.47:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de cuña en el eje Y por superficie de la cámara.....	104
Tabla 5.48:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de radio de curvatura por superficie de la cámara.....	104
Tabla 5.49:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de espesor por elemento de la cámara. ....	105
Tabla 5.50:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de cuña en el eje X por superficie de la cámara. ....	105
Tabla 5.51:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de cuña en el eje Y por superficie de la cámara. ....	106

Tabla 5.52:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de radio de curvatura por superficie de la cámara. ....	106
Tabla 5.53:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de espesor por elemento de la cámara. ....	107
Tabla 5.54:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de cuña en el eje X por superficie de la cámara. ....	107
Tabla 5.55:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de cuña en el eje Y por superficie de la cámara. ....	108
Tabla 5.56:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de espesor por elemento de la cámara. ....	108
Tabla 5.57:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de cuña en el eje X por superficie de la cámara. ....	109
Tabla 5.58:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de cuña en el eje Y por superficie de la cámara. ....	109
Tabla 5.59:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de inclinación en X por elemento de la cámara. ....	111
Tabla 5.60:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de inclinación en Y por elemento de la cámara. ....	111
Tabla 5.61:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de descentrado en X por elemento de la cámara. ....	111

Tabla 5.62:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de descentrado en Y por elemento de la cámara. ....	112
Tabla 5.63:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de inclinación en X por elemento de la cámara.....	112
Tabla 5.64:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de inclinación en Y por elemento de la cámara.....	112
Tabla 5.65:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de descentrado en X por elemento de la cámara. ....	113
Tabla 5.66:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_B del parámetro de descentrado en Y por elemento de la cámara. ....	113
Tabla 5.67:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de inclinación en X por elemento de la cámara.....	113
Tabla 5.68:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de inclinación en Y por elemento de la cámara.....	114
Tabla 5.69:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de descentrado en X por elemento de la cámara. ....	114
Tabla 5.70:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR_R del parámetro de descentrado en Y por elemento de la cámara. ....	114
Tabla 5.71:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de inclinación en X por elemento de la cámara.....	115

Tabla 5.72:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de inclinación en Y por elemento de la cámara.....	115
Tabla 5.73:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de descentrado en X por elemento de la cámara. ....	115
Tabla 5.74:	Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de descentrado en Y por elemento de la cámara. ....	116
Tabla 5.75:	Comparativa final de tolerancias de fabricación del colimador. Tolerancias de diseño vs tolerancias obtenidas por análisis inverso.....	148
Tabla 5.76:	Comparativa final de tolerancias de los coeficientes de asfericidad.....	149
Tabla 5.77:	Comparativa final de tolerancias de alineación del colimador. Tolerancias de diseño vs tolerancias obtenidas por análisis inverso. *El elemento mostró un desempeño pobre al introducir variaciones de alineación, pero es estable.	149
Tabla 5.78:	Comparativa final de tolerancias de fabricación de la cámara. Tolerancias de diseño vs tolerancias obtenidas por análisis inverso.....	150
Tabla 5.79:	Comparativa final de tolerancias de alineación de la cámara. Tolerancias de diseño vs tolerancias obtenidas por análisis inverso.....	151
Tabla 6.1:	Comparativa entre la MF nominal y la MF con espesores de los elementos de la cámara perturbados.....	155
Tabla 6.2:	Comparativa entre la MF nominal y la MF con cuña en las superficies de la cámara.....	156

Tabla 6.3:	Continuación de la tabla 6.2. Comparativa entre la MF nominal y la MF con cuña en las superficies de la cámara. ....	156
Tabla 6.4:	Comparativa entre la MF nominal y la MF con inclinaciones de los elementos de la cámara perturbadas. ....	157
Tabla 6.5:	Comparativa entre la MF nominal y la MF con los elementos de la cámara descentrados.....	158

## Lista de Figuras

- Figura 1.1: Esquema mecánico de MEGARA. Gil de Paz et al (2012). .....7
- Figura 1.2: Representación gráfica de los tres modos de MEGARA (SCB, LCB y MOS).  
Gil de Paz et al (2012). .....9
- Figura 1.3: Áreas de especial interés del equipo de ciencia de MEGARA. ....12
- Figura 1.4: Diferentes ángulos de incidencia en la rejilla requeridos para dos  
configuraciones en los extremos de la resolución espectral. ....15
- Figura 1.5: Diagrama óptico del espectrógrafo. Conjunto de subsistemas de MEGARA.  
.....17
- Figura 1.6: Detalle del camino óptico. Se pueden ver tres pseudo-rendijas en la entrada  
(LCB, SCB y MOS), el primer lente del colimador, el obturador, el primer  
doblete del colimador en el mecanismo de enfoque (en verde), y el segundo  
doblete del colimador (azul); la pupila con una VPH-MR en su lugar, la cámara  
unida al criostato (naranja) con el detector dentro. Gil de Paz et al (2012).18
- Figura 1.7: Diagrama del colimador. Está compuesto de un lente simple de PMB2Y  
(asférica) y dos dobletes. El primer doblete será el mecanismo de enfoque para  
optimizar la calidad de imagen en cada configuración.....19
- Figura 1.8: Diagrama de la cámara. Está compuesta por dos dobletes, cada uno de ellos con  
un lente de CaF<sub>2</sub>. La última lente es la ventana del criostato. ....20
- Figura 1.9: Diferentes configuraciones de MEGARA. 16 en total, 5 de baja resolución, 9  
de media y 2 de alta. ....22

Figura 2.1:	Comparativa de los diagramas de flujo del proceso de diseño de sistemas ópticos. En la izquierda el proceso convencional y a la derecha un proceso de diseño integrado en el que las tolerancias se toman en cuenta al mismo tiempo que se realiza el diseño nominal. Youngworth (2006). ....	35
Figura 2.2:	Diagrama de flujo de un análisis de tolerancias basado en costos utilizando un optimizador. PDF: función de distribución de probabilidad. Youngworth (2006). ....	36
Figura 3.1:	Etiquetas de los elementos del sistema. Arriba el colimador, debajo la cámara. El elemento CAM L-5 se utiliza como compensador del sistema. ....	41
Figura 3.2:	Óptica de MEGARA en el editor de lentes de ZEMAX. Diseño de Agosto de 2011. ....	42
Figura 3.3:	Comportamiento nominal de la función de mérito (RMS del tamaño de la mancha) a lo largo de la rendija. ....	43
Figura 3.4:	Diagrama de manchas en el campo completo de la configuración utilizada en el análisis. ....	43
Figura 4.1:	Editor de lentes en ZEMAX, se muestran cada una de las superficies de cualquier configuración de MEGARA, de hecho lo único que cambia es el elemento de pupila en las diferentes configuraciones. ....	57
Figura 4.2:	Ilustración representativa del tamaño de mancha requerido y del 80% de energía (área verde). ....	57

Figura 5.1:	Notación utilizada en este capítulo, se enumeran los elementos de izquierda a derecha, para las tolerancias de alineación se usan las notaciones que están por debajo de los esquemas. Arriba: el colimador, debajo: la cámara.....	84
Figura 5.2:	Comparativa de las tolerancias de espesor de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones. En azul se muestra el intervalo de tolerancias permisibles obtenidas en el análisis inverso y en rosado transparente el intervalo de tolerancias de diseño propuesto por Sánchez-Blanco (2011).	117
Figura 5.3:	Comparativa de las tolerancias de índice de refracción de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones. Las graficas resultantes son similares así que se pueden resumir en esta.....	118
Figura 5.4:	Comparativa de las tolerancias de cuña en el eje x de cada superficie del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.....	119
Figura 5.5:	Comparativa de las tolerancias de cuña en el eje y de cada superficie del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.....	121
Figura 5.6:	Comparativa de las tolerancias de radio de curvatura de cada superficie del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.....	123
Figura 5.7:	Comparativa de las tolerancias de inclinación en el eje X de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.....	125
Figura 5.8:	Comparativa de las tolerancias de inclinación en el eje Y de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.....	126

Figura 5.9:	Comparativa de las tolerancias de descentrado en el eje X de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.....	127
Figura 5.10:	Comparativa de las tolerancias de descentrado en el eje Y de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.....	128
Figura 5.11:	Comparativa de las tolerancias de espesor de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones. En azul se muestra el intervalo de tolerancias permisibles obtenidas en el análisis inverso y en rosado transparente el intervalo de tolerancias de diseño propuesto por Sánchez-Blanco (2011).	130
Figura 5.12:	Comparativa de las tolerancias de cuña en el eje X de cada superficie de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.....	132
Figura 5.13:	Comparativa de las tolerancias de cuña en el eje Y de cada superficie de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.....	134
Figura 5.14:	Comparativa de las tolerancias de radio de curvatura de cada superficie de la cámara obtenidas en LR y MR_B.....	135
Figura 5.15:	Comparativa de las tolerancias de inclinación en el eje X de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.....	137
Figura 5.16:	Comparativa de las tolerancias de inclinación en el eje Y de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.....	138
Figura 5.17:	Comparativa de las tolerancias de descentrado en el eje X de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.....	139

Figura 5.18: Comparativa de las tolerancias de descentrado en el eje y de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.....	140
Figura 5.19: Comparativa de resultados del análisis inverso de tolerancias de fabricación del colimador en las cuatro distintas resoluciones utilizadas y las tolerancias de diseño propuestas en Sánchez-Blanco (2011). .....	142
Figura 5.20: Comparativa de resultados del análisis inverso de tolerancias de alineación del colimador en las cuatro distintas resoluciones utilizadas y las tolerancias de diseño propuestas en Sánchez-Blanco (2011). .....	144
Figura 5.21: Comparativa de resultados del análisis inverso de tolerancias de fabricación de la cámara en las cuatro distintas resoluciones utilizadas y las tolerancias de diseño propuestas en Sánchez-Blanco (2011). .....	146
Figura 5.22: Comparativa de resultados del análisis inverso de tolerancias de alineación de la cámara en las cuatro distintas resoluciones utilizadas y las tolerancias de diseño propuestas en Sánchez-Blanco (2011). .....	147
Figura 6.1: Ejemplo del estudio del diámetro de la mancha final en el sistema. Se perturbo el espesor del elemento CAM_L5. a) Manchones de un desempeño nominal en los campos a lo largo de la rendija. b) Manchones en un sistema perturbado con el valor mínimo del margen de error. c) Manchones de un sistema perturbado con el valor máximo del margen de error. d) Manchones de un sistema perturbado con el valor mínimo del margen propuesto por análisis inverso. e) Manchones de un sistema perturbado con el máximo del margen propuesto por análisis inverso. ....	154

## Lista de Acrónimos

AOI: ángulo de incidencia, por sus siglas en inglés (angle of incidence).

CIO: Centro de Investigaciones en Óptica (México).

$f/\#$ : número f, razón entre la longitud focal y el diámetro de la pupila de entrada. Se utiliza para medir “velocidades” de los elementos ópticos.

FOV: campo de visión, por sus siglas en inglés (field of vision).

FWHM: ancho completo a media altura, por sus siglas en inglés (full width at half maximum). Función dada por la diferencia entre los dos valores extremos de una variable independiente en los cuales la variable dependiente tiene la mitad de su valor máximo.

GTC, GRANTECAN: Gran Telescopio de Canarias (España).

HR: alta resolución, por sus siglas en inglés (high resolution).

IAA: Instituto de Astrofísica de Andalucía (España).

IFU: unidad de campo integral, por sus siglas en inglés (integral field unit).

INAOE: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (México).

LCB: paquete largo y compacto de fibras, por sus siglas en inglés (large compact bundle).

LR: baja resolución, por sus siglas en inglés (low resolution).

MC: Monte Carlo.

MEGADES: estudio de la evolución de discos galácticos de MEGARA, por sus siglas en inglés (MEGARA galactic disk evolution survey).

MEGARA: Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía.

MF: función de mérito, por sus siglas en inglés (merit function).

MOS: espectroscopia multi-objeto, por sus siglas en inglés (multi-object spectroscopy).

MR\_B: resolución media en la longitud de onda del azul, por sus siglas en inglés (medium resolution in blue).

MR\_R: resolución media en la longitud de onda del rojo, por sus siglas en inglés (medium resolution in red).

MTF: función de transferencia de la modulación, por sus siglas en inglés (modulation transfer function).

OPD: diferencia de caminos ópticos, por sus siglas en inglés (optical path difference).

RMS: raíz cuadrática media, por sus siglas en inglés (root mean square).

SCB: paquete pequeño y compacto de fibras, por sus siglas en inglés (small compact bundle).

TOLFDIF: tolerancias definidas por el usuario. Método de análisis de tolerancias en el que los márgenes de error son impuestos por el usuario.

TOLMONTE: tolerancias Monte Carlo. Método de análisis de tolerancias en el que se varían todos los parámetros de un sistema aleatoriamente.

TOR: trazado de rayos diferencial. Método de análisis de tolerancias en el que se calculan variaciones en la diferencia de caminos ópticos usando el trazado de rayos.

UCM: Universidad Complutense de Madrid (España).

UPM: Universidad Politécnica de Madrid (España).

VPH: rejilla de transmisión basada en hologramas sobre gel, por sus siglas en inglés (volume phase holographic).

## Capítulo 1: Introducción

MEGARA son las siglas de un instrumento de nueva generación para el Gran Telescopio de Canarias (GTC) que significan “Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía” y cumple con los requerimientos del Anuncio de Oportunidad para nueva instrumentación del GTC, publicado por GRANTECAN el 14 de Septiembre de 2009.

Se trata de un proyecto de instrumentación liderado por la Universidad Complutense de Madrid (UCM) en asociación con el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) como socio principal, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). El INAOE es responsable de dos de los paquetes más importantes de trabajo: la óptica y optomecánica del espectrógrafo, y el criostato del detector. El primer paquete consiste de la revisión del diseño óptico del espectrógrafo, la fabricación de los elementos ópticos de colimador y la cámara (12), así como de las ventanas (14) y los prismas (26) de los elementos dispersores. En total son 52 elementos ópticos cuyos diámetros de trabajo están en el intervalo comprendido entre 120-230mm. Asimismo se incluye el diseño y depósito de recubrimientos antirreflejantes de dichos elementos. La fabricación de la óptica se desarrollará en colaboración con el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO). Adicionalmente, el INAOE es responsable del diseño detallado y de la fabricación de la optomecánica del colimador y la cámara.

Durante el diseño de cualquier sistema óptico destinado a ser manufacturado, es crítico decidir un presupuesto de fabricación y ensamble. Este presupuesto debe considerar cualquier posible compensación que se usará durante el proceso de manufactura para mitigar la degradación del desempeño introducida por variaciones de fabricación. Es importante especificar el mejor grupo de tolerancias y compensadores, ya que estos tendrán un impacto significativo en los costos de manufactura, entiéndase por tolerancia un margen de error de cada uno de los parámetros que constituyen un elemento óptico. Para mantener cualquier costo innecesario fuera del diseño, es importante tener un intervalo de tolerancias ajustado sólo para los parámetros que causan la mayor

## *Capítulo 1: Introducción*

degradación del desempeño con pequeños cambios en ellos. Sólo en los componentes más sensibles se justificaría el costo extra asociado con tolerancias ajustadas.

En vista de la magnitud del proyecto, las tolerancias en la fabricación adquieren particular relevancia. De ahí la necesidad de realizar un análisis que permita optimizar las tolerancias de fabricación y de alineación sin alterar el desempeño del sistema óptico.

En este trabajo de tesis se realiza un análisis exhaustivo de tolerancias de fabricación y de ensamble de los elementos ópticos de MEGARA para la obtención de los márgenes de error óptimos en desempeño del sistema y en costo. Se utilizan: el método de sensibilidad directo, el método de sensibilidad inverso y modelos estadísticos basados en simulaciones Monte Carlo para predecir el desempeño de la óptica del espectrógrafo. Se parte del diseño en ZEMAX, un software de diseño óptico utilizado ampliamente en la comunidad científica y en la industria, y de las tolerancias provistas por el diseñador del sistema Sánchez-Blanco (2011), se extiende el estudio y se realiza un análisis inverso. Éste consiste en relajar las tolerancias iniciales, poner un límite de cambio a la función de mérito que se esté utilizando y a través de simulaciones en las que se varían los parámetros de fabricación y de alineación de los elementos ópticos de MEGARA, ZEMAX ajustará una banda de tolerancias dentro del intervalo de dicho cambio de la función de mérito para cada uno de éstos.

Con un estudio posterior se pueden determinar cuáles son los parámetros críticos y cuales son las tolerancias que se pueden relajar sin afectar sustancialmente el desempeño y así ahorrar en costos y en tiempo de fabricación. Este tipo de análisis brinda un margen de tolerancias para cada parámetro en el que la función de mérito se comporta adecuadamente sin que el desempeño sea menor al requerimiento que se le impone y así lograr saber si las tolerancias manejadas por el diseñador son óptimas de cara a la fabricación y si se pueden relajar o ajustar dependiendo el caso.

La combinación del análisis directo de tolerancias de diseño con el estudio inverso es algo que no se hace comúnmente. En éste trabajo se presenta el procedimiento adecuado para su realización y los beneficios que se obtienen al tener los dos tipos de análisis incluidos con el propósito de garantizar el buen desempeño de los elementos ópticos que se fabricarán en el INAOE y en el CIO.

Para obtener resultados más amplios y útiles se usaron cuatro configuraciones distintas del espectrógrafo: una en baja resolución, dos en media y una en alta, que son representativas de las 16 en las que podrá trabajar en instrumento. A su vez se intentan mostrar las razones físicas de por qué ciertos parámetros del diseño son más críticos que otros y por qué se comportan de diferente forma en cada una de estas configuraciones.

### **1.1. OBJETIVOS GENERALES**

- Obtener el mejor conjunto de tolerancias de la óptica de MEGARA, maximizando el desempeño y minimizando los costos de fabricación.
- Utilizar algunas de las herramientas de software más actuales para realizar el análisis de tolerancias de diferentes sistemas ópticos.
- Realizar un análisis de tolerancias que provea de más información a los fabricantes de los elementos ópticos para la toma de decisiones en tiempo y costos.
- Verificar que se tiene el mejor diseño posible del espectrógrafo y si no fuera así hacérselo saber al diseñador.

### **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La inversión en este proyecto es de cerca de 5,000,000 € de los cuales se destinan 450,000€ a la fabricación de la óptica, dado el presupuesto limitado, es necesario optimizar los recursos. Se debe determinar si los márgenes de tolerancias establecidos deben ser más estrechos o si pueden ser un poco más holgados, sin afectar negativamente el desempeño del mismo. Este tipo de análisis normalmente no se realiza porque los procesos de diseño y fabricación son, en general, independientes. En este proyecto, el INAOE es parte del consorcio de tal forma que una colaboración estrecha con el diseñador y el resto del equipo del instrumento permite la optimización tanto del desempeño como de la fabricación.

Este análisis es una etapa intermedia entre el diseño y la fabricación del sistema óptico. Teniendo en cuenta que el diseñador de MEGARA pertenece al grupo de trabajo, se puede diagnosticar algún defecto en el diseño, pequeños problemas con la solución que

## *Capítulo 1: Introducción*

él presenta y en su caso modificar el diseño para obtener un desempeño mejor. Por otra parte, al fabricante se le entregaran los márgenes de error necesarios para que el sistema se desempeñe favorablemente.

Se busca tener una métrica mostrando la habilidad del diseño para alcanzar las metas de desempeño con sus tolerancias especificadas. Un fabricante puede usar esta métrica con los datos metrológicos adecuados para determinar si el dispositivo tendrá un desempeño aceptable. Esta métrica también puede determinar si el diseño es muy sensible a las tolerancias esperadas, así permitiría al diseñador evaluar el diseño de espectrógrafo desde una perspectiva de manufactura.

### **1.3.MEGARA**

MEGARA es un espectrógrafo multi-objeto para el GTC que en principio puede alcanzar resolución media a alta (R de 5600, 10000 y 17000) y opera en tres modos de observación que cubren diferentes áreas del cielo.

El diseño óptico realizado por Sánchez-Blanco (2011) tiene una geometría fija y se utilizan diferentes elementos de pupila para las distintas configuraciones de resolución.

El INAOE se encargará, junto con el CIO, de la fabricación de la óptica del espectrógrafo. En este trabajo el análisis se concentra en la óptica del colimador y la cámara, ambos completamente refractivos.

A continuación se presenta la estructura básica de los espectrógrafos y su funcionamiento, la explicación se basa en el capítulo 4 de McLean (1997).

Todos los espectrógrafos, ya sean de alta, media o baja resolución, tienen esencialmente el mismo diseño básico, pero se pueden implementar de muchas formas dependiendo de las restricciones y del elemento dispersor.

En lugar de una apertura de campo completo en el plano focal de algún telescopio, se utiliza una máscara con una rendija angosta. El ancho de la rendija debe ser igual al valor del seeing o al valor del disco de difracción dependiendo del diseño y la aplicación. Después de pasar por la rendija el haz de luz es colimado y dirigido al elemento dispersor, que puede ser un prisma o una rejilla de difracción, finalmente el haz

difractado pasa a través de una cámara que forma la imagen en el detector. Las cantidades importantes a determinar en cualquier diseño son 1) la resolución, 2) el ancho de la rendija, 3) el diámetro del haz colimado, 4) lograr empatar el ancho de la rendija con los pixeles del detector, y 5) el número f resultante de la cámara. Algunas propiedades importantes de los espectrógrafos se definen a continuación:

**Dispersión angular (DA):** es la razón de cambio del ángulo dispersado ( $\theta$ ) del haz de luz con respecto a la longitud de onda ( $\lambda$ ).

$$DA = \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (1.1)$$

**Dispersión lineal (DL):** relaciona un intervalo de longitud ( $dx$  en milímetros) a lo largo del espectro y un intervalo de longitud de onda ( $d\lambda$  en Å)

$$DL = \frac{dx}{d\lambda} = \frac{dx}{d\theta} \frac{d\theta}{d\lambda} = F \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (1.2)$$

donde F es la longitud focal de la cámara del espectrógrafo y las unidades se expresan usualmente como Å/mm.

**Resolución:** es la habilidad de distinguir dos longitudes de onda separadas por una pequeña diferencia  $\Delta\lambda$ .

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (1.3)$$

El elemento de dispersión más común es la rejilla de difracción y su ecuación general se define como

$$m\lambda = d(\sin i + \sin \theta) \cos \gamma \quad (1.4)$$

donde d es el espaciamiento entre cada línea, i es el ángulo de incidencia del haz colimado,  $\theta$  es el ángulo del haz difractado emergente,  $\gamma$  es el ángulo fuera del plano normal de incidencia, usualmente  $0^\circ$ , y por tanto  $\cos\gamma=1$ , y m es un entero llamado el “orden” de interferencia. Así, la dispersión angular de una rejilla de difracción esta dada por

$$\frac{d\theta}{di} = \frac{m}{d \cos \theta \cos \gamma} \quad (1.5)$$

## Capítulo 1: Introducción

El tamaño de la imagen de la rendija ( $\Delta x$ ) esta dado por

$$\Delta x = w \frac{\cos i}{\cos \theta} \frac{F_{cam}}{F_{col}} \quad (1.6)$$

donde  $w$  es el ancho real de la rendija y  $F_{cam}$  y  $F_{col}$  son las longitudes focales de la óptica de la cámara y el colimador; esta razón es el factor de magnificación.

**Ángulo de blaze:** inclinando las facetas de una rejilla de reflexión a través de un ángulo  $\theta_B$  con respecto al plano de la superficie de la rejilla es posible maximizar la eficiencia de la rejilla en la dirección en la cual la luz hubiese sido reflejada en ausencia de difracción. La eficiencia es máxima cuando el ángulo de incidencia es de  $\theta_B + \theta_0$  y el ángulo de difracción es  $\theta_B - \theta_0$ , donde  $\theta_0$  es medido con respecto a la normal a la faceta, no a la superficie de la rejilla. Existe un caso especial donde  $\theta_0=0$ , entonces el rayo incidente entra a lo largo de la normal de la faceta y el rayo difractado sale en la misma dirección. Esta es la condición de Littrow y la ecuación de la rejilla se simplifica a  $m\lambda = 2d \sin \theta_B$  y la resolución viene dada por

$$R = \frac{2D_{col} \tan \theta_B}{\Phi D_{tel}} \quad (1.7)$$

donde  $\Phi$  es el tamaño angular de la rendija y  $D_{tel}$  es el diámetro del telescopio.

### 1.3.1. El instrumento

MEGARA es una unidad de campo integral (IFU) y un espectrógrafo multi-objeto (MOS) formado por arreglos compactos de fibras ópticas. El extremo de salida de éstas forma la pseudorendija del espectrógrafo.

Ofrece dos modos de IFU con dos diferentes paquetes de fibras ópticas, uno que cubre  $14 \times 12$  segundos de arco<sup>2</sup> con un tamaño de spaxel de 0.685 segundos de arco, denominado Paquete Grande Compacto (LCB), que utiliza fibras de  $100\mu\text{m}$  de núcleo y otro que cubre  $10 \times 8$  segundos de arco<sup>2</sup> con un tamaño de spaxel de 0.480 segundos de arco, llamado Paquete Pequeño Compacto (SCB), con fibras de  $70\mu\text{m}$  de núcleo.

También ofrece el modo de espectroscopia multi-objeto (MOS) mediante posicionadores robóticos que permitirá observar hasta 100 objetos en una región de  $3.5 \times$

3.5 minutos de arco<sup>2</sup> alrededor de los dos arreglos de fibras destinados a la IFU. Ocho de estos paquetes estarán dedicados a la determinación del cielo durante la observación con el modo LCB, así que sólo 92 posicionadores estarán disponibles para las observaciones en este modo.

Todos los paquetes de fibras serán colocados en el plano focal del telescopio y son acoplados a microlentes idénticos que convierten el GTC  $f/7$  en un  $f/3$  necesario para un uso óptimo de las fibras reduciendo la degradación de razón focal.

El espectrógrafo está compuesto por una pseudo-rendija, donde las fibras son colocadas simulando una rendija larga; un obturador es colocado detrás de ésta, un colimador, una pupila de 162mm donde se colocarán las rejillas VPH, y una cámara con el detector.

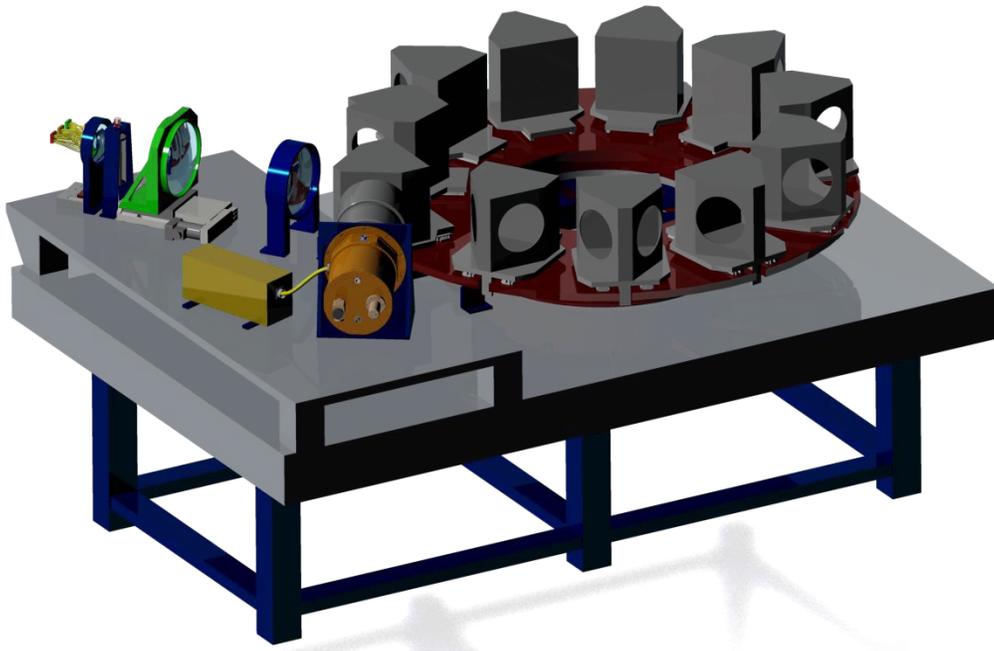


Figura 1.1: Esquema mecánico de MEGARA. Gil de Paz et al (2012).

En la fig. 1.1 se observa MEGARA como el instrumento completo, se pueden ver los elementos ópticos (verde y azul), que son los que conciernen a este trabajo de tesis, una mesa giratoria para seleccionar los elementos de pupila y el detector, que se encuentra embebido en el criostato (naranja).

**Capítulo 1: Introducción**

La dos capacidades de MEGARA, proveerán resoluciones espectrales que van desde intermedias hasta altas  $R_{FWHM} \sim 6,500, 11,000$  y  $19,100$ . Cuando el modo SCB se utiliza se obtienen resoluciones de  $R_{FWHM} \sim 8,100, 14,400$  y  $24,700$ . Estas resoluciones espectrales son derivadas de un espectro simulado 1D y están expresadas en términos del FWHM de líneas espectrales no resueltas, mientras que el criterio de calidad de imagen está dado en términos del número de pixeles espectrales del EED<sub>80</sub> (diámetro en que se encierra el 80% de energía). En la tabla 1.1 se muestra un resumen de las características de los tres modos de MEGARA y las respectivas resoluciones espectrales alcanzadas por cada conjunto de VPHs.

Parámetro		Modos de la IFU		Modo MOS
		LCB	SCB	Paquete disperso
Tamaño de spaxel		0.685 seg de arco	0.480 seg de arco	0.685 seg de arco
Campo de visión		14 x 12 seg de arco <sup>2</sup>	10 x 8 seg de arco <sup>2</sup>	3.5 x 3.5 min de arco <sup>2</sup>
FWHM (1D)		3.5 pixeles	2.7 pixeles	3.5 pixeles
Resolución ( $R_{FWHM}$ )	LR VPHs	6,250	8,100	6,250
	MR VPHs	11,000	14,400	11,000
	HR VPHs	19,100	24,700	19,100

Tabla 1.1: Características principales de los modos de la unidad de campo integral y el modo MOS.

Los juegos de VPHs usados por MEGARA están propuestos para usarse en dos configuraciones espectrales diferentes: 1) LR+HR, cuando virtualmente el espectro óptico completo esta disponible en baja resolución (5 VPHs de baja resolución), casi el 50% de la ventana óptica esta cubierta en resolución media (4 VPHs de resolución media) además de dos ventanas espectrales a alta resolución (2 VPHs de alta resolución) y 2) MR+HR, donde la ventana óptica completa esta disponible a resolución media o alta (9 VPHs MR y 2 VPHs HR).

La resolución espectral específica que se puede alcanzar para cada configuración y cada VPH depende si se utilizan las fibras de 100 $\mu$ m o las de 70 $\mu$ m en los tres diferentes modos.

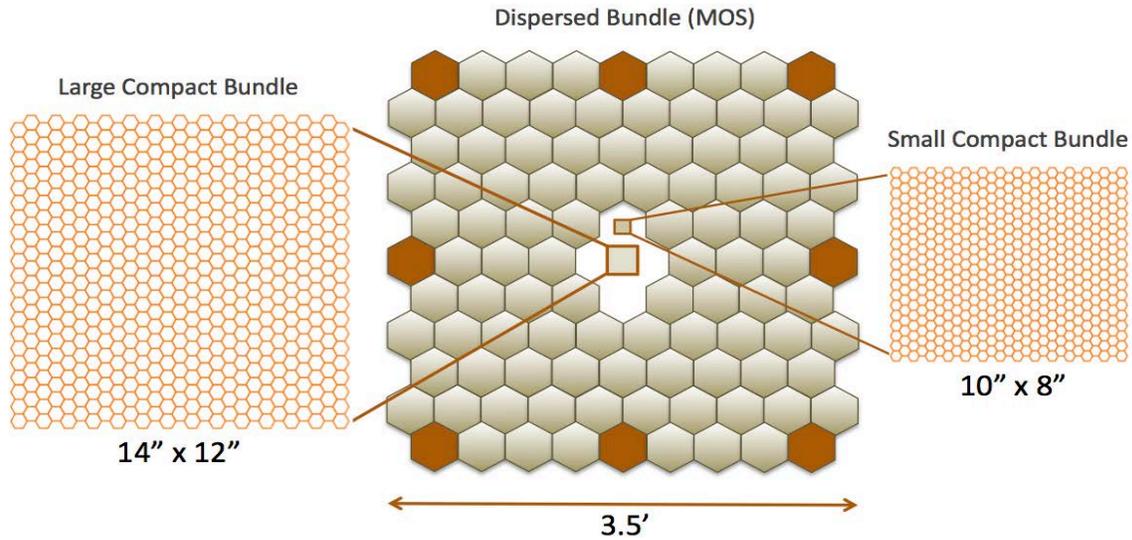


Figura 1.2: Representación gráfica de los tres modos de MEGARA (SCB, LCB y MOS). Gil de Paz et al (2012).

### 1.3.2. Requerimientos

A continuación se exponen los requerimientos, de GRANTECAN y del equipo de ciencia de MEGARA, que debe cumplir el instrumento.

Requerimientos de desempeño:

- Intervalo de longitudes de onda: 3700Å - 9800 Å.
- Resoluciones espectrales: Intervalos de dispersión centrados en  $R \sim 10,000$  y  $\sim 20,000$ .
- Resolución espectral de baja a media ( $R_{FWHM} \sim 6,000$ , i.e.  $R_{EED80} \sim 5,500$ ) en el rango completo de 370-950nm, con un cambio de resolución en el detector de no más de 20% con respecto a la longitud de onda central.

Requerimientos de diseño:

## *Capítulo 1: Introducción*

- MEGARA incluye capacidades de IFU y MOS.
- Los elementos de las fibras deben ser instalados en la estación de Cassegrain doblado del GTC. El espectrógrafo debe ser instalado en un lugar diferente, probablemente sea la plataforma Nasmyth.
- El campo de visión (FOV) del modo IFU LCB debe ser de  $14 \times 12$  segundos de arco<sup>2</sup> centrado cerca del eje óptico del instrumento.
- El FOV del modo IFU SCB debe ser un área de aproximadamente  $10 \times 8$  segundos de arco<sup>2</sup>.
- El FOV del modo MOS debe ocupar la región entre los dos modos de la IFU y el campo máximo del instrumento, es decir  $3.5 \times 3.5$  minutos de arco<sup>2</sup>.
- El núcleo de las fibras debe ser de  $100\mu\text{m}$  en diámetro para los modos LCB y MOS, lo que entrega un tamaño de spaxel de 0.685 segundos de arco en el cielo.
- El núcleo de las fibras debe ser de  $70\mu\text{m}$  en diámetro para el modo SCB, lo que entrega un tamaño de spaxel de 0.480 segundos de arco en el cielo.
- El número  $f$  ( $f/\#$ ) de entrada al espectrógrafo debe ser aproximadamente  $f/3$ . Arreglos de microlentes serán usados para conseguir el cambio de  $f/17$  a  $f/3$  entre el GTC y el espectrógrafo.
- Cuando los modos LCB o MOS sean usados el elemento de resolución espectral debe mantenerse en 4 pixeles. Para minimizar el crosstalk, se debe mantener una separación de aproximadamente 2 pixeles entre fibras.
- Cuando se utilice el modo IFU SCB el elemento de resolución se debe mantener en 3 pixeles. En este caso se puede reducir el crosstalk en el detector incluyendo una fibra ciega entre cada dos fibras utilizables.

- Las fibras de 8 posicionadores deberán ser distribuidas uniformemente a lo largo de la pseudo-rendija del modo IFU LCB para poder obtener una medida del fondo simultáneamente cuando se usa este paquete de fibras.
- El diámetro de la pupila no debe ser más grande de 170mm.
- La relación entre la distancia focal del colimador y la de la cámara debe mantenerse aproximadamente en 2 para garantizar el muestreo necesario en el plano focal del detector y para que la cámara se pueda fabricar.
- Se usará un detector simple de 4k x 4k píxeles, los píxeles tendrán un tamaño de 15 $\mu$ m.

### **1.3.3. Motivación científica**

Las motivaciones científicas del equipo de ciencia de MEGARA pueden ser agrupadas en dos categorías: 1) el estudio de nebulosas galácticas y extragalácticas y 2) el estudio de fuentes puntuales con densidad superficial intermedia o alta. Entre estas dos, los intereses del equipo incluyen el estudio de galaxias cercanas o nebulosas planetarias y con respecto a los cúmulos abiertos galácticos, las poblaciones estelares en el grupo local de galaxias, enanas de corrimiento al rojo intermedio y galaxias de formación estelar y cúmulos de galaxias con alto corrimiento al rojo.

El equipo de ciencia de MEGARA junta a investigadores de un amplio rango de intereses científicos pertenecientes a instituciones de los miembros de la comunidad GTC (España, México y la Universidad Florida). Esto garantiza que MEGARA también servirá a los intereses de las comunidades astronómicas del consorcio del GTC. En la fig. 1.4 se puede ver un diagrama que resume las principales líneas de investigación del equipo de ciencia de MEGARA.

**Capítulo 1: Introducción**

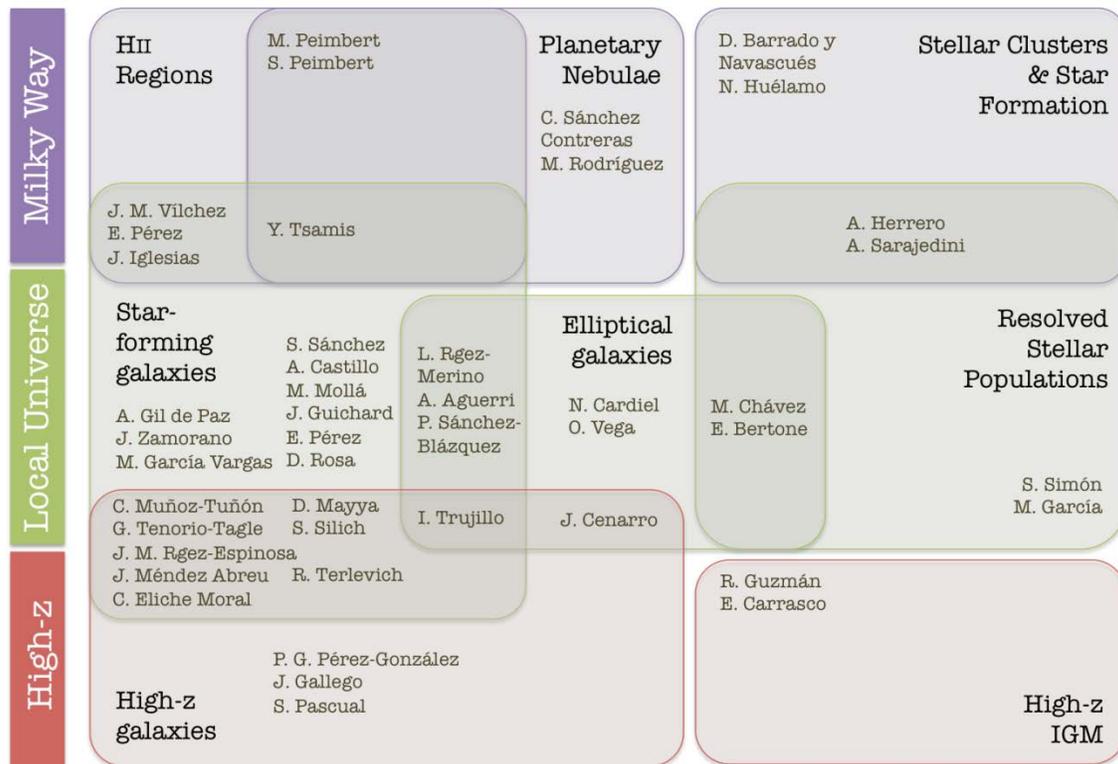


Figura 1.3: Áreas de especial interés del equipo de ciencia de MEGARA.

El equipo incluye a expertos de la mayoría de las áreas de investigación en astronomía, galácticas y extragalácticas, exceptuando el estudio del Sol y del Sistema Solar.

Lo común a todos los intereses específicos del equipo de ciencia es la necesidad de una resolución espectral que vaya de intermedia a alta, en el intervalo de  $R \approx 5,000-20,000$ . En algunos casos esta necesidad es una consecuencia de la resolución de la velocidad, pero en muchos casos está dada por la necesidad de reducir el doblamiento de la línea, ya sea directamente donde las líneas de diferentes elementos se quieren medir en estrellas o vía la reducción de la degeneración de las propiedades de poblaciones estelares compuestas.

En el caso del estudio de las nebulosas, ahora se hace claro que el uso de un espectrómetro bidimensional es crítico para obtener respuestas precisas a los problemas que estos campos están enfrentando. Mientras que el uso de un Fabry-Pérot puede ser una

buena elección en este tema, si alguien está interesado en la cinemática de las líneas de emisión simples y si una calibración precisa en flujo no es requerida, el uso de una IFU ha demostrado ser un acercamiento más confiable, especialmente si uno está interesado en más de una característica espectral o en características de absorción.

También se tiene pensado estudiar la evolución de los discos de las galaxias a través del análisis de sus elipsoides de velocidad y la distribución espacial en 2D de los índices espectrales y sus abundancias químicas. Esta meta constituye la base del estudio de la evolución de los discos galácticos de MEGARA (MEGADES). Este análisis es fundamental para descubrir los roles de los procesos seculares envueltos en la formación de las propiedades de los discos de hoy en día. MEGADES también incluirá el análisis espectroscópico detallado de estrellas simples del grupo local de galaxias M33 e IC 1613.

Otra área más extensa de interés científico en los miembros del equipo es el estudio de fuentes puntuales, o fuentes resueltas marginalmente desde Tierra. Este incluye el estudio de cúmulos galácticos abiertos, estrellas individuales en el grupo local de galaxias y galaxias muy distantes. Exceptuando el caso de estudio de la población RGB en el grupo local de galaxias, donde el uso de una IFU de campo amplio podría proveer una ventaja significativa en algunas distancias galactocéntricas ( $<7$  Mpc en el caso de M33), en los casos restantes las densidades superficiales oscilan entre una fracción y pocas fuentes por minuto de arco cuadrado. Para tales aplicaciones la posibilidad de tener un modo de espectroscopia multi-objeto con relativamente alto multiplexado ( $\sim 100x$ ) en el campo de visión es ideal.

#### **1.3.4. Diseño de la óptica**

De los requerimientos que están expuestos en la sección 1.3.2. los que son aplicables a la óptica del espectrógrafo y que afectan el diseño de la misma se pueden listar como sigue:

- ***Intervalo de longitudes de onda:*** El espectrógrafo tendrá un sólo brazo lo que significa que todo el intervalo será observado con la misma óptica. Esto implica grandes constricciones en el diseño óptico pero es necesario debido al presupuesto. Si se hubiese escogido un espectrógrafo de doble brazo por lo menos se necesitarían 1.5M€ adicionales para rediseñar todo.

## Capítulo 1: Introducción

- **Escala de placa:** define la relación  $f_{col}/f_{cam}$ . Como se escogió 0.685 segundos de arco en el cielo y el elemento espectral es muestreado en 4 pixeles, se consideró 0.685 segundos de arco proyectados en 3.33 pixeles dando una escala de placa final de 0.205 segundos de arco/pixel en el detector. Los 4 pixeles son considerados para el presupuesto de errores.
- **Factor de reducción de escala:** se proyectará el tamaño del núcleo de la fibra ( $100\mu\text{m}$ ) en 3.33 pixeles por diseño. Siendo que el pixel mide  $15\mu\text{m}$ , 3.3 pixeles son  $50\mu\text{m}$ , lo que implica una escala de reducción entre el plano focal del telescopio y el detector en un factor de 2. Este factor determina la relación entre los números  $f$  del colimador y la cámara.
- **$f/\#$  del colimador:** el número  $f$  a la entrada del espectrógrafo fue escogido para minimizar la degradación de la razón focal en el acoplamiento con las fibras, así usando un  $f/3$  a la entrada éste queda como el  $f/\#$  del colimador.
- **$f/\#$  de la cámara:** como la razón focal  $f_{col}/f_{cam}$  es 2 entonces si el colimador es un  $f/3$ , la cámara debe ser  $f/1.5$ , el cual es realizable. Números  $f$  muy pequeños (rápidos) se vuelven muy difíciles de fabricar en una cámara tan grande y compleja.
- **Tamaño de pupila:** el campo de visión limitará el tamaño mínimo de pupila requerido. Conforme éste se hace más amplio, la longitud focal del colimador y la cámara tienen que ser incrementadas para poder mantener la calidad de imagen. Con la experiencia que se cuenta, llenar 2K pixeles en dirección espacial requerirá un mínimo de 80mm de tamaño de la pupila por lo tanto 4K requiere de 160mm para poder controlar las aberraciones de campo. Este tamaño de pupila ha sido tomado como referencia para este diseño y limitará el campo de visión máximo en la entrada del espectrógrafo (pseudorendija).
- **Resolución espectral:** la resolución espectral lineal es proporcional a la longitud focal de la cámara. Así, usando una pupila más pequeña se acorta esta longitud y la dispersión lineal.

- **La geometría y la resolución espectral:**

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{mn}{\cos\beta} \quad (1.1)$$

La ecuación de rejilla para la dispersión angular define la geometría del ángulo de incidencia de la luz y está dada por:  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\beta$  es el ángulo de incidencia en la rejilla,  $m$  es el número de líneas/mm y  $n$  es el orden de difracción. El mejor desempeño en la VPH se obtiene en el primer orden  $n=1$ . Esto significa que la configuración para HR necesitará un ángulo de incidencia grande en la rejilla, mientras que en LR se requiere un ángulo incidente pequeño. Un ejemplo se muestra en la figura 1.4.

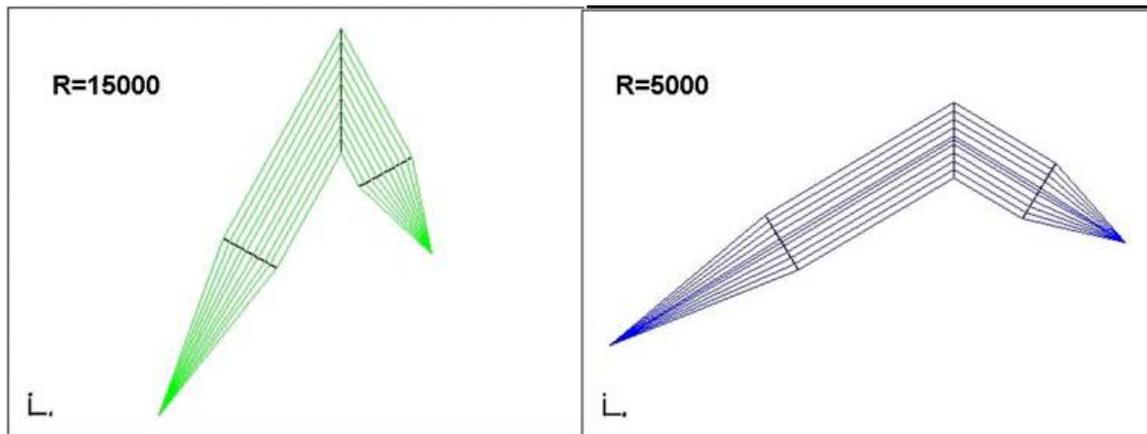


Figura 1.4: Diferentes ángulos de incidencia en la rejilla requeridos para dos configuraciones en los extremos de la resolución espectral.

La solución que se tomó fue la de tomar un espectrógrafo sencillo con geometría fija en un ángulo óptimo entre las configuraciones de LR y de HR. La geometría final en la rejilla es obtenida colocando la rejilla entre dos prismas, lo que cambiará el ángulo de incidencia al requerido por la configuración.

- **Elementos espectrales:** como elementos dispersores se propone el uso de VPHs. Las rejillas reflectoras no tienen el número de líneas/mm requeridas mientras que las de superficie holográfica no son tan eficientes.

## Capítulo 1: Introducción

En las VPHs, el patrón (holograma) es fotografado en gel dicromático. Los parámetros del holograma (líneas/mm, ángulo de incidencia) dan las resoluciones requeridas. El ancho del holograma puede ser modificado para evitar alta dependencia en eficiencia cuando se está fuera del ángulo de Littrow. El ángulo de incidencia en el gel está dado por la ecuación estándar de las rejillas.

$$2dn \text{ Sen}\beta_m = m\lambda \quad (1.2)$$

donde  $m=1$  es el orden,  $\lambda$  es la longitud de onda de Bragg,  $d$  es el espaciamiento de la rejilla y  $n=1.27$  es el índice de refracción del gel.

La geometría general implica que los ángulos requeridos para trabajar serán de alrededor de  $26^\circ$  en LR,  $48^\circ$  en MR y  $70^\circ$  en HR. Para cambiar el ángulo de incidencia en la geometría fija se usarán prismas. El material del prisma dependerá del ángulo de incidencia (AOI) de la rejilla. Cuando la luz va del gel al material o viceversa, aplicamos la ley de Snell.

$$n_{gel} \times \text{sen } \beta = n_{prisma} \times \text{sen } \alpha \quad (1.3)$$

- **Resolución espectral y el tamaño de las fibras:** Existe otra forma de cambiar la resolución espectral y esto se hace usando diferentes tamaños de fibras para diferentes resoluciones. Por ejemplo, si se usa una de  $100\mu\text{m}$  de núcleo para una  $R=10,000$  (una fibra en 4 pixeles) y  $50\mu\text{m}$  para  $R=20,000$  (una fibra en 2 pixeles) podríamos tener ambas resoluciones con el mismo elemento de dispersión. Sin embargo esta opción se descartó por el equipo de diseño.

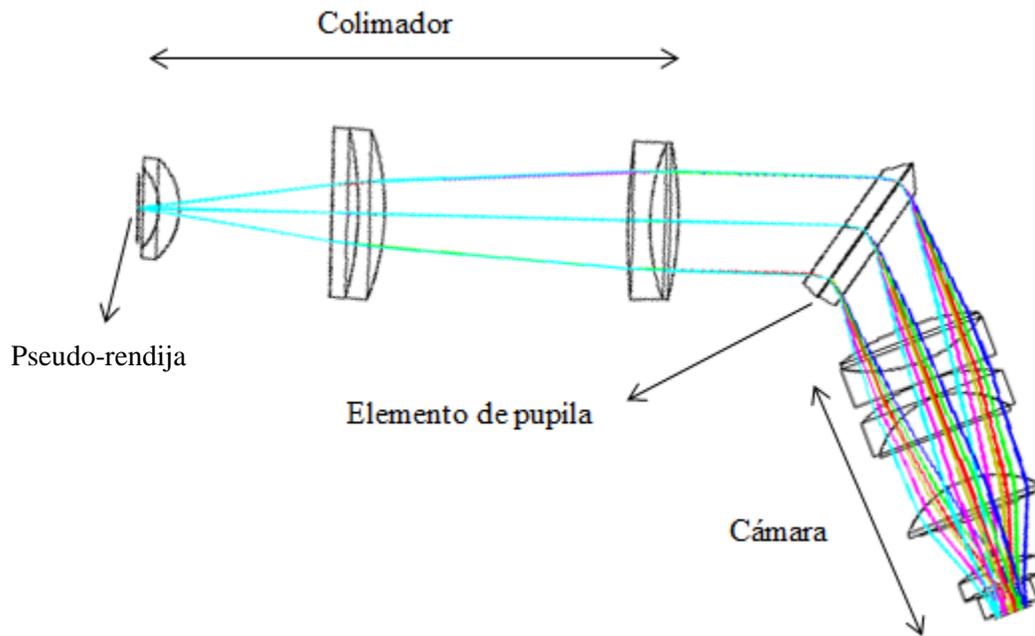


Figura 1.5: Diagrama óptico del espectrógrafo. Conjunto de subsistemas de MEGARA.

Tomando en cuenta todos estos requerimientos se obtiene un sistema completamente refractivo. En la fig. 1.5 se puede observar el sistema óptico completo, el espectrógrafo se compone de una pseudo-rendija, donde las fibras son colocadas emulando una rendija larga. Un colimador compuesto de cinco lentes (un lente simple y dos dobletes). El primer lente es el único que tiene una superficie esférica y un obturador es colocado justo detrás de éste. La pupila tiene 162mm de diámetro y es donde se colocan las VPHs. El filtro de orden será colocado cuando se necesite junto con la rejilla en la montura. Una vez que la luz pase a través de la rejilla va a la cámara (compuesta de dos dobletes y 3 lentes simples) y luego al detector. El último lente también será la ventana del criostato.

En la figura 1.6 se observa más a detalle el paso de la luz a través de todo el instrumento en una configuración de MR.

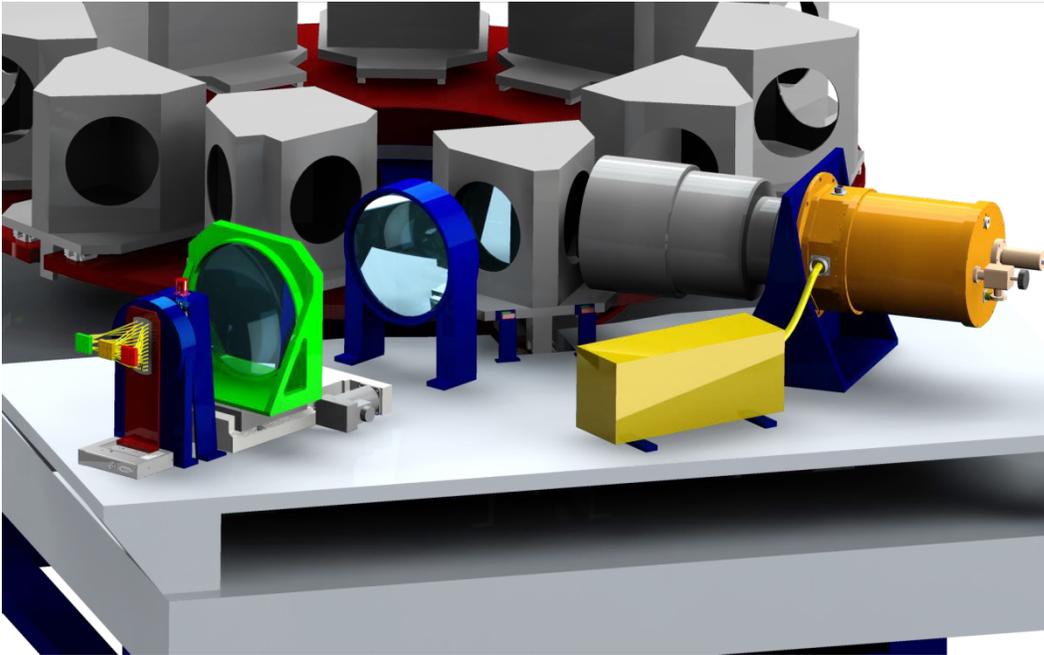


Figura 1.6: Detalle del camino óptico. Se pueden ver tres pseudo-rendijas en la entrada (LCB, SCB y MOS), el primer lente del colimador, el obturador, el primer doblete del colimador en el mecanismo de enfoque (en verde), y el segundo doblete del colimador (azul); la pupila con una VPH-MR en su lugar, la cámara unida al criostato (naranja) con el detector dentro. Gil de Paz et al (2012).

A continuación se resumen todos los subsistemas de funcionalidad óptica:

- **Pseudo-rendija:**
  - Rendija de 119mm de longitud.
  - La pseudo-rendija es curva y tiene un radio de curvatura de 1075mm.
- **Colimador:**

El colimador está compuesto de un lente simple y dos dobletes como se puede ver en la figura 1.7. Sus características principales son:

- Longitud focal de 483.3mm.

- Refractivo,  $f/3$ .

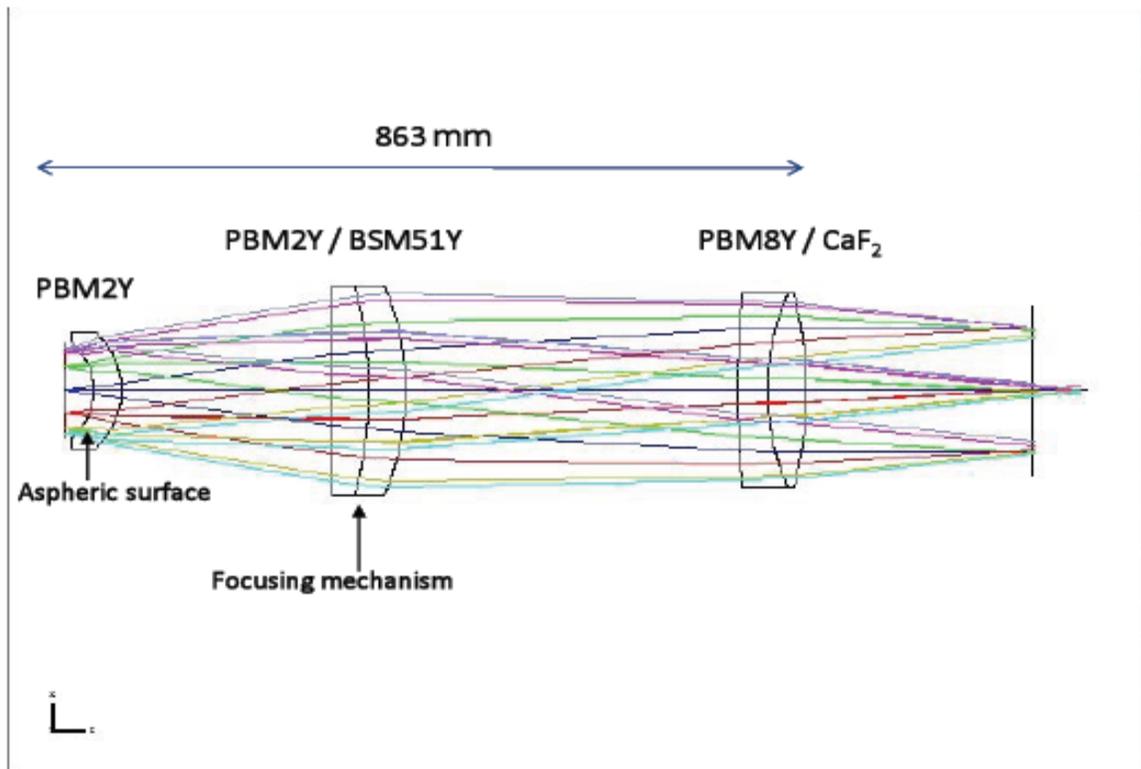


Figura 1.7: Diagrama del colimador. Está compuesto de un lente simple de PMB2Y (asférica) y dos dobletes. El primer doblete será el mecanismo de enfoque para optimizar la calidad de imagen en cada configuración.

Los valores de radios de curvatura, espesores y características principales de los lentes del colimador se presentan en secciones posteriores, ya que en esta tesis se utilizaron dos diseños distintos.

- **Pupila:** el tamaño de la pupila es de 160mm y las rejillas se colocaran en esta posición.
- **Geometría colimador-cámara:** la geometría es fija se tienen 68° entre el colimador y la cámara.
- **Cámara:**

## Capítulo 1: Introducción

La cámara está compuesta de dos dobletes y 3 lentes simples como se muestra en la figura 1.8

- Longitud focal de 245.9mm.
- Refractiva, f/1.5.
- El campo de imagen es de 61.4mm x 61.4mm cubriendo 4K x 4K pixeles.

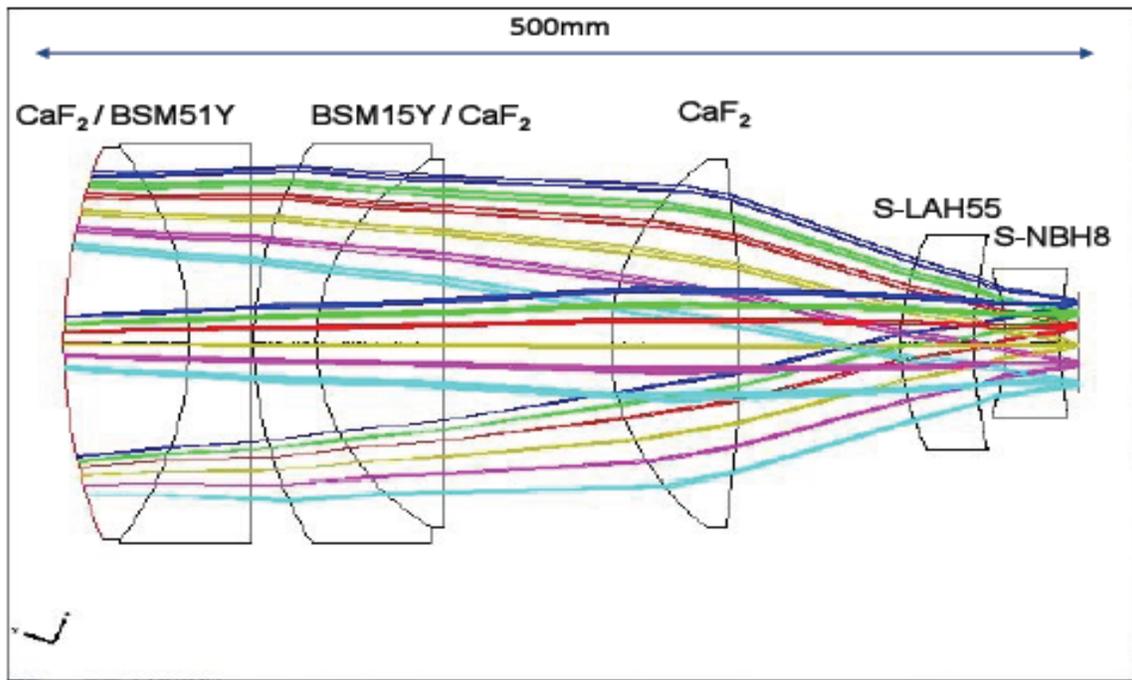


Figura 1.8: Diagrama de la cámara. Está compuesta por dos dobletes, cada uno de ellos con un lente de  $\text{CaF}_2$ . La última lente es la ventana del criostato.

- **Elementos de pupila:**

Diferentes tipos de elementos de pupila, todos basados en rejillas VPH, pueden ser acomodados en la posición de la pupila para proveer los diferentes modos espectrales, con una potencia de resolución que oscila entre 5,500 y 17,000. Los elementos de LR se pueden realizar con rejillas con ventanas planas de cada lado, los de MR se realizan con

la rejilla entre dos prismas simétricos que permiten que el haz de luz incida en la rejilla en el ángulo adecuado.

Nombre de la VPH	REED80	$\lambda$ Bragg Å	$\theta$ Bragg grados	Grabado líneas/mm	Vértice del prisma grados	Apertura óptica mm x mm
VPH405-LR	5,473	4,051	26.12	2,761	Plano	172 x 200
VPH480-LR	5,504	4,800	26.12	2,330	Plano	172 x 200
VPH570-LR	5,523	5,700	26.12	1,962	Plano	172 x 200
VPH675-LR	5,533	6,749	26.12	1,657	Plano	172 x 200
VPH865-LR	5,559	8,650	26.12	1,293	Plano	172 x 200
VPH410-MR	10,000	4,104	47,65	4,574	35.769	172 x 205
VPH443-MR	10,000	4,431	47,99	4,259	36.863	172 x 205
VPH481-MR	10,000	4,814	48,22	3,935	37.745	172 x 205
VPH521-MR	10,000	5,213	48,39	3,643	38.420	172 x 205
VPH567-MR	10,000	5,667	48,54	3,359	39.026	172 x 205
VPH617-MR	10,000	6,170	48,64	3,090	39.494	172 x 205
VPH712-MR	10,000	7,115	48,82	2,685	40.231	172 x 205
VPH777-MR	10,000	7,767	48,76	2,459	40.335	172 x 205
VPH926-MR	10,000	9,262	48,65	2,066	40.486	172 x 205
VPH665-HR	17,000	6,646	70,41	3,601	68.201	172 x 230
VPH863-HR	17,000	8,634	69,87	2,762	68.673	172 x 230

Tabla 1.2: Rejillas requeridas por MEGARA: especificaciones de las VPH.

La lista completa de las rejillas de MEGARA y sus parámetros se muestra en la tabla 1.2.

El ángulo entre el colimador y la cámara está fijo en  $68^\circ$ . Esto es equivalente a  $34^\circ$  entre el haz colimado y la normal de la rejilla. Este ángulo permite alcanzar resoluciones de  $R=10,000$  y  $17,000$  con el uso de prismas a ambos lados de las VPHs y

## Capítulo 1: Introducción

una  $R=5,500$  usando ventanas planas. En la figura 1.9 se muestran las diferentes configuraciones posibles y los diferentes tipos de elementos de pupila.

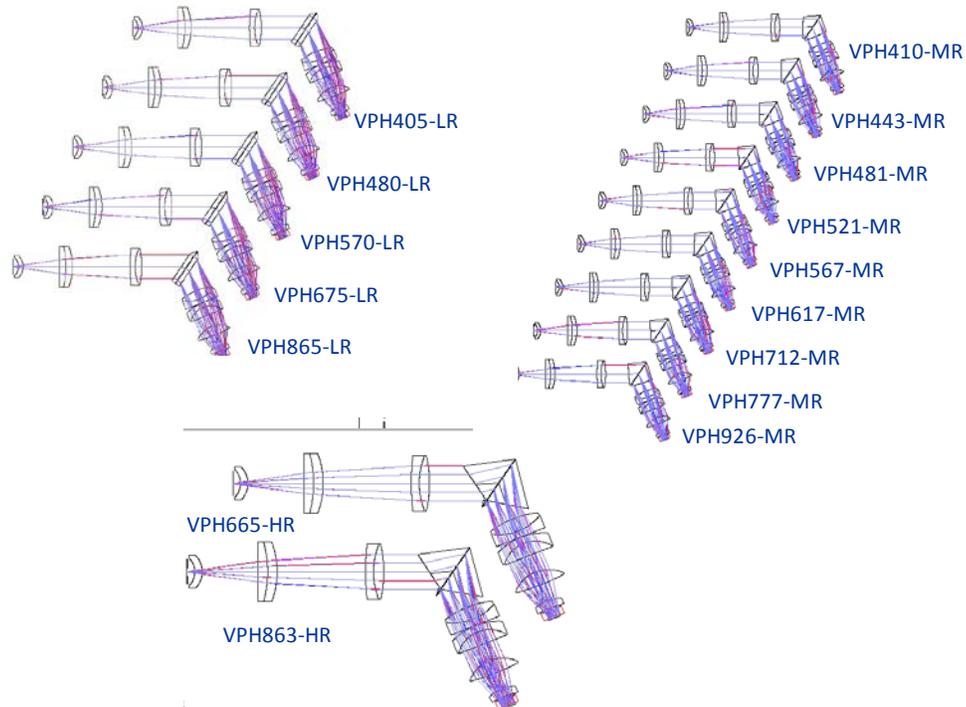


Figura 1.9: Diferentes configuraciones de MEGARA. 16 en total, 5 de baja resolución, 9 de media y 2 de alta.

Para las configuraciones de HR los prismas serían tan pesados y tan grandes que los haría ineficientes. Por esta razón, se adoptó otro enfoque para este elemento. Se llama pupila segmentada. Consiste en dividir la pupila en diferentes “rebanadas”, generando diferentes imágenes que son superpuestas en el detector y recuperando una imagen única. La dificultad de este diseño es la alineación de los prismas.

## Capítulo 2: Tolerancias

El diseño óptico y la ingeniería están cambiando continuamente, conforme los programas de diseño se desarrollan más y el poder computacional aumenta, se pueden investigar sistemas más complejos. Un paso crítico para traer a la realidad un diseño es la asignación de tolerancias. Este paso, idealmente, asegura el desempeño del sistema a un costo mínimo.

La asignación de tolerancias siempre es necesaria porque en los procesos de manufactura y en la metrología que se utilice el sistema resultante se desviará inevitablemente del diseño nominal. El objetivo de esta asignación es encontrar un equilibrio entre el desempeño óptico, el tiempo de producción y el costo.

### 2.1. TOLERANCIAS ÓPTICAS

Las dos dificultades más comunes al pasar del diseño a la fabricación son la subespecificación, en el sentido de que no se describe completamente lo que se requiere, y la sobreespecificación, donde las tolerancias establecidas son mucho más severas de lo necesario. Esta sección está basada en el capítulo 20 de Smith (2008), se explican los parámetros ópticos más comunes para ajustar a alguna tolerancia.

Si hay suficiente tiempo y dinero, se puede obtener casi cualquier grado de precisión. Así, las especificaciones deben ser determinadas en una base dual: 1) los límites que son determinados por los requerimientos de desempeño del sistema, y 2) el gasto de tiempo y dinero que está determinado por la aplicación. Las tolerancias ópticas pueden variar extensamente en magnitud. Por ejemplo, no es difícil controlar la esfericidad de una superficie a  $0.1\mu\text{m}$ , comparándola con la tolerancia de espesor que es alrededor de  $100\mu\text{m}$ , tres órdenes de magnitud mayor. Por esta razón es raro encontrar tolerancias estándares en óptica; a cada dimensión, o por lo menos cada clase de dimensión, se le aplican tolerancias individualmente.

La selección inteligente de especificaciones y tolerancias para fabricaciones ópticas es un esfuerzo extremadamente redituable. La filosofía detrás del establecimiento de tolerancias debe ser el permitir que una tolerancia sea tan grande como se pueda dentro de los requerimientos para un desempeño satisfactorio del sistema óptico. Los

## Capítulo 2: Tolerancias

diseños deberían establecerse teniendo la meta de minimizar los efectos producidos por las variaciones de producción de las dimensiones. Se debería estar seguro de que las dimensiones que están muy ajustadas en su especificación deben ser verdaderamente críticas en el sistema, así el tiempo y el dinero no son desperdiciados en otros parámetros para mantener precisión sin sentido.

### 2.1.1. Precisión de la superficie

Las dos principales características de una superficie óptica son la calidad y su precisión. Con *precisión* se hace referencia a las características dimensionales de una superficie, i.e., el valor y uniformidad del radio de curvatura.

La precisión de una superficie es usualmente especificada en términos de la longitud de onda de la luz de una lámpara de sodio, 589 nm, o un laser HeNe, 633nm. Una de las pruebas más usadas es la prueba de Newton, en la que la precisión está determinada por una comparación interferométrica de la superficie con una placa de pruebas, contando el número de aros o “franjas” y examinando la regularidad de estos. El espaciado entre la superficie de trabajo y la placa de pruebas cambia media longitud de onda por cada franja. La precisión del ajuste entre la superficie de trabajo y la placa se describe en términos del número de franjas observadas cuando la placa es colocada en contacto con la superficie que se esta trabajando.

Las placas de prueba están hechas completamente planas o completamente esféricas con una precisión de una fracción de franja. Sin embargo las esferas de prueba tienen un radio con una precisión que sólo es tan buena como los medios optomecánicos usados para medirlas. Así, el radio de una placa de pruebas es frecuentemente preciso hasta una parte en mil o uno en diez mil.

Un ajuste de cinco a diez franjas, con una esfericidad de un medio a una franja no es una tolerancia difícil. Ajustes de una a tres franjas con su correspondiente mejora en la esfericidad pueden ser obtenidos en producciones a gran escala con un incremento modesto del costo.

La silueta de una superficie puede ser medida fácilmente con un interferómetro. Mientras es más difícil de controlar el valor del radio con un interferómetro que con una

placa de pruebas, el interferómetro es muy superior cuando se habla de probar la regularidad o esfericidad de la superficie de trabajo. La razón es que el radio efectivo del frente de onda de comparación se debe ajustar para empatar el de la superficie de trabajo, también es porque el punto de vista del interferómetro siempre es normal a la superficie y por tanto no es sujeto de errores de oblicuidad que afectan las mediciones en una placa de pruebas.

### **2.1.2. Calidad de la superficie**

*Calidad* se refiere al acabado de la superficie e incluye defectos como arañones, raspaduras, pulido incompleto, manchas y similares. La calidad usualmente se extiende a defectos parecidos como burbujas e inclusiones. En general, con la excepción del pulido incompleto el cual es inaceptable, estos factores son meramente cosméticos y deben ser tratados como eso.

Los estándares de especificación ISO 10110 son utilizados ampliamente en la industria. La calidad de una superficie se especifica por un número tal como 80-50, en el cual los primeros dos dígitos están relacionados al ancho aparente de un rayón tolerable y los segundos dos indican el diámetro de un poro o burbuja permisible en centésimas de milímetro.

Así pues, calidades de superficie de 80-50 o más grandes son relativamente fáciles de alcanzar en la fabricación. Calidades de 60-40 y 40-30 demandan un pequeño costo extra. Superficies con especificaciones de calidad de 40-20, 20-10, 10-5, o combinaciones similares son considerablemente más caras de fabricar. Tales especificaciones usualmente sólo son utilizadas en lentes de campo, blanks de retículo u óptica laser.

### **2.1.3. Espesor**

Los efectos de los espesores y de las variaciones en los espaciamentos en el desempeño de un sistema siempre se analizan, ya sea por trazado de rayos o por un análisis de aberraciones de tercer orden. La importancia de estas variaciones difiere de sistema a sistema. En dobletes negativos de un objetivo Biotar (doble Gauss), el espesor es extremadamente crítico, especialmente en lo que corresponde a aberraciones esféricas, por esta razón el Crown y el Flint generalmente se seleccionan para que su espesor

## *Capítulo 2: Tolerancias*

combinado sea muy cercano al diseño nominal. En el otro extremo, una variación en espesor de un lente plano-convexo puede ser totalmente ignorada, dado que tiene muy poco o nada de efecto en el desempeño.

En general, los espesores y espaciamentos pueden ser críticos cuando la pendiente del rayo marginal es grande. Los lentes anastigmáticos en general, y los meniscos en particular, tienden a tener esta sensibilidad. Lentes de alta velocidad, objetivos de microscopio con apertura numérica grande, y similares son usualmente sensibles.

Una tolerancia razonable para un trabajo preciso es  $\pm 0.1\text{mm}$ . Esto puede causar en un taller algunas dificultades en ciertos tipos de lentes, por lo general los grandes; donde una relajación es posible, una tolerancia de  $\pm 0.15$  ó  $\pm 0.2\text{mm}$  es más económica. Es posible llegar a los  $\pm 0.05\text{mm}$  en producciones a gran escala teniendo cuidado a lo largo del proceso de fabricación. Claro que es posible, en base al trabajo a mano y la selección, producir piezas a cualquier nivel deseado de tolerancia, por ejemplo, se puede alcanzar  $\pm 0.01\text{mm}$  a cambio de un incremento significativo en el costo.

### **2.1.4. Centrado**

Las tolerancias en el centrado son 1) en el diámetro de la pieza (manufactura) y 2) en la precisión del centrado del eje óptico con el eje mecánico (ensamble). Si la pieza se quiere centrar, el diámetro se puede mantener en  $+0$  y  $-0.03\text{mm}$  con técnicas ordinarias y esta es la tolerancia estándar en la mayoría de los talleres. Tolerancias mas ajustadas son posibles, pero generalmente no son necesarias en trabajos ordinarios.

La concetricidad de un elemento es convenientemente especificada por su desviación. Ésta es el ángulo en el que un elemento desvía un rayo axial de luz dirigido al centro mecánico del lente. El ángulo de desviación de un grupo de elementos es simplemente la suma de las desviaciones de los elementos individuales.

Los ejes óptico y mecánico se pueden suponer separados por una desviación (descentramiento)  $\Delta$ . Como el rayo paralelo al eje óptico debe pasar por el punto focal, la desviación angular  $\delta$  en radianes del rayo apuntado a lo largo del eje mecánico está dada por el descentramiento dividido entre la longitud focal.

$$\delta = \frac{\Delta}{f} \text{ radianes} \quad (2.1)$$

El elemento descentrado puede ser expresado como el elemento mismo centrado más una cuña de material. El ángulo de cuña  $W$  está dado por la diferencia entre los espesores del borde máximo y el mínimo dividido entre el diámetro del elemento.

$$W = \frac{E_{max} - E_{min}}{d} \text{ radianes} \quad (2.2)$$

Si la desviación de un prisma delgado viene dada por  $D=(n-1)A$ , donde  $A$  es el ángulo del prisma, se puede relacionar de forma similar el ángulo de cuña de un elemento a su desviación con:

$$\delta = (n - 1)W \text{ radianes} \quad (2.3)$$

En la mayoría de las maquinas de fabricación el ángulo residual de cuña está dado por:

$$W = \frac{0.0127mm}{d} \quad (2.4)$$

Y la desviación resultante es:

$$\delta = \frac{0.0127mm (n-1)}{d} \quad (2.5)$$

Así, para lentes ordinarios del orden de  $n=1.5$  a  $1.6$  una estimación de la desviación razonable es:

$$\delta \approx \frac{1}{d} \text{ arcmin} \approx \frac{42.42 (n-1)}{d} \text{ arcmin} \quad (2.6)$$

donde  $d$  está en mm y el centrado se hace mecánicamente.

Si el centrado se realiza visualmente entonces la habilidad del ojo para detectar movimiento es el factor limitante. Si suponemos que el ojo puede detectar movimientos angulares de  $6$  ó  $7 \times 10^{-5}$  radianes equivalentes a  $14.4$  segundos de arco, entonces la desviación será aproximadamente:

$$\delta = (n - 1) \left( \frac{1}{R} \pm 0.06 \right) \pm \text{errores de contacto} \quad (2.7)$$

## Capítulo 2: Tolerancias

donde  $\delta$  esta en minutos de arco y R es el radio de curvatura de la superficie en mm.

### 2.1.5. Materiales

Las características de los materiales refractivos usados en el trabajo óptico que son de cuidado especial son el índice de refracción, la dispersión y la transmisión. Para los materiales ordinarios, la transmisión visual es raramente un problema. Ocasionalmente, cuando una pieza de vidrio denso se usa en una aplicación crítica, los límites de transmisión o color se deben especificar. Similarmente, la dispersión muy pocas veces es un problema. Para sistemas apocromáticos donde la razón parcial de dispersión es extremadamente crítica, se requieren precauciones.

El índice de refracción es usualmente un parámetro de preocupación en un vidrio óptico. La tolerancia estándar es de  $\pm 0.0005$  ó  $\pm 0.001$ , dependiendo del tipo de vidrio. El proveedor del material puede mantener los márgenes más cerrados incrementando el costo moderadamente. En la práctica el fabricante sólo usa una fracción de esta tolerancia ya que el índice dentro de una mezcla única del material es muy consistente. A veces es económico aceptar las tolerancias estándar y ajustar el diseño para compensar la variación en el índice cuando es crítico.

### 2.1.6. Factor de costo relativo

Para la producción óptica clásica con métodos “comunes”, el costo de un elemento varía aproximadamente como:

$$\text{Factor de costo de cantidad} = 1.07 + 2.26Q^{-0.42} \quad (2.8)$$

$$\text{Factor de costo de calidad} = \frac{1.5}{\sqrt[20]{S \cdot D \cdot P \cdot R \cdot T}} \quad (2.9)$$

donde Q=cantidad de piezas que se harán

S=numero de raya

D=número de poro

P=tolerancia de potencia de la superficie en franjas

R=tolerancia de regularidad de la superficie en franjas

T=tolerancia de espesor en milímetros

Estas ecuaciones son útiles para determinar el efecto en costo de cambiar las especificaciones.

A continuación se presenta una tabla con las tolerancias típicas que se utilizan en los talleres. Se debe tener en cuenta que solo representan valores *típicos* y que hay muchos casos especiales en los que este tipo de tabla no aplica.

	Calidad de la Superficie	Diámetro (mm)	Desviación (concentricidad) (min de arco)	Espesor (mm)	Radio (franjas)	Regularidad (asfericidad)	Dimensión lineal (mm)	Ángulos
Bajo costo	120-80	±0.2	>10	±0.5	Calibrador	Calibrador	±0.2	Grados
Comercial	80-50	±0.07	3-10	±0.25	10Fr	3Fr	±0.2	±15min
Preciso	60-40	±0.02	1-3	±0.1	5Fr	1Fr	±0.2	±5-10min
Extrapreciso	60-40	±0.01	<1	±0.05	1Fr	1/5Fr	Como se requiera	segs
Plástico	80-50		1	±0.02	10Fr	5Fr	0.02	mins

Tabla 2.1: Tolerancias típicas de la fabricación óptica. Extraída de Smith (2008).

## 2.2. ANÁLISIS DE TOLERANCIAS

En el análisis de tolerancias se parte de un diseño óptico que cumple con los requerimientos establecidos. La determinación del mejor diseño puede involucrar cuestiones de manufactura, cómo están balanceadas las aberraciones y detalles de simulaciones, cosas que involucran la integración del sistema en sí, como lo es la alineación, la inclinación de los componentes, etc. Si las tolerancias aplicadas se encuentran en un intervalo muy estrecho y si el sistema es muy sensible a cambios en sus parámetros el sistema será inalcanzable en la realidad. Un sistema óptico con un buen diseño, una buena distribución de la corrección de aberraciones, potencia y aberraciones primarias bajas usualmente tendrá más probabilidad de ser manufacturado. Nada sustituye a un buen diseñador, en la etapa del análisis de tolerancias nada salvará a un

## Capítulo 2: Tolerancias

diseño pobre de tener problemas de manufactura. Sin embargo, las tolerancias al final tienen un gran impacto en la manufactura, pruebas, costo y desempeño.

¿El problema está resuelto? Si bien es cierto que existen muchas herramientas y métodos que permiten a los diseñadores y los ingenieros obtener una solución exitosa, la complejidad de la mayoría de los problemas de tolerancias tienen más de una solución.

El análisis de tolerancias ópticas es el último paso en el proceso de diseño óptico. Consiste en asignar un conjunto de tolerancias a los diferentes parámetros del sistema óptico nominal. Se trata de balancear el costo con el desempeño final del sistema. En aplicaciones de alta especialización la meta sería más bien asegurar que el sistema trabaje como debe a pesar de cualquier error de manufactura. Consideraciones del proceso de fabricación son necesarias para determinar qué parámetros requieren tolerancias y cuáles serán los parámetros de control (compensadores). El proceso es iterativo y puede llegar a incluir el ajuste del diseño nominal. El problema es fundamentalmente matemático.

Se acostumbra usar una figura de mérito, como lo es el tamaño de mancha o el error del frente de onda, o un conjunto de dichos escalares. Para un diseño optimizado sin restricciones, la figura de mérito del diseño nominal puede aproximarse a una función cuadrática. Así, la primera y segunda derivada de esta figura de mérito se usan para aproximar el desempeño de un sistema creado a partir de una perturbación en el sistema original. El vector que representa la primera derivada es el gradiente. Las segundas derivadas son una matriz, llamada Hessiano (Youngworth et al, 2001). Este vector y matriz son esenciales para modelar la unión entre un conjunto de tolerancias dado y el intervalo de valores de la figura de mérito. Supongamos que la figura de mérito se puede representar como  $M_0$ , y los valores para  $N$  parámetros del sistema se denotan como  $\hat{s} = \hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_N$ . Si tomamos un sistema cuyos valores perturbados son  $s = s_1, s_2, \dots, s_N$ , la expresión de la figura de mérito se puede escribir:

$$M = M_0 + (s - \hat{s}) \cdot \frac{\partial M}{\partial s} + \frac{1}{2} (s - \hat{s}) \cdot \frac{\partial^2 M}{\partial s^2} \cdot (s - \hat{s})^T + O(3) \quad (2.10)$$

Donde  $O(3)$  representa los términos de tercer orden y mayores, y todas las derivadas en esta ecuación son evaluadas en el sistema nominal. El gradiente se representa así:

$$\frac{\partial M}{\partial s} = \left( \frac{\partial M}{\partial s_1}, \frac{\partial M}{\partial s_2}, \dots, \frac{\partial M}{\partial s_N} \right) \quad (2.11)$$

Y el Hessiano es la siguiente matriz:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial s^2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 M}{\partial s_1^2} & \frac{\partial^2 M}{\partial s_1 s_2} & \dots & \frac{\partial^2 M}{\partial s_1 s_N} \\ \frac{\partial^2 M}{\partial s_2 s_1} & \frac{\partial^2 M}{\partial s_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 M}{\partial s_2 s_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 M}{\partial s_N s_1} & \frac{\partial^2 M}{\partial s_N s_2} & \dots & \frac{\partial^2 M}{\partial s_N^2} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

En estas expresiones se incluyen los parámetros con tolerancias y los compensadores.

Con este espacio de diseño cercano a los valores nominales, consideremos un espacio mayor que consista en “colinas y valles”. Un valor menor o un valle sería un mejor desempeño que el de una colina. Si lo viéramos solo de la perspectiva del diseño nuestra meta sería alcanzar el valle más bajo, sin embargo cuando consideramos tolerancias lo que buscamos es un valle que sea lo suficientemente bajo para que cumpla las especificaciones de desempeño pero que también sea lo suficientemente amplio para que el sistema no sea tan sensible y las tolerancias no sean tan estrechas. Este problema es en una dimensión, en realidad el problema tiene una gran cantidad de variables y esta analogía se puede extender al hiperespacio alrededor del diseño nominal.

Hay casos en los que se tienen restricciones en los parámetros de diseño y se puede llegar a soluciones que en lugar de que se encuentren en un mínimo, estén en una pendiente. En el hiperespacio se busca que la solución quede en una pendiente poco profunda y no en una extrema.

La segunda faceta de la descripción matemática del análisis de tolerancias es el tratamiento estadístico del desempeño del sistema a manufacturar. En la actualidad, todos los parámetros de construcción son variables aleatorias porque los valores finales de dichos parámetros no son conocidos, sólo sus funciones de densidad de probabilidad son

## *Capítulo 2: Tolerancias*

teóricamente conocidas. Así el desempeño óptico también es una variable aleatoria y su valor esperado tiene una naturaleza estadística. Esto significa que la densidad de probabilidad de la función de mérito es dependiente de todas las densidades de probabilidad de todas las variables aleatorias que constituyen el sistema, sus tolerancias y la relación matemática entre las variables y la figura de mérito. En la práctica, para obtener las estadísticas de la figura de mérito se emplean métodos Monte Carlo.

### **2.3 EVOLUCIÓN DEL ANÁLISIS DE TOLERANCIAS**

En el pasado, el diseño de lentes era una tarea ardua donde era necesario aplicar la teoría de aberración o trazar rayos a mano. El análisis de tolerancias usualmente consistía en prueba y error en la etapa de fabricación, lo cual consumía mucho tiempo y recursos. Los sistemas se diseñaban para cumplir las especificaciones ya que la optimización no había sido introducida como una herramienta hasta empezando la década de los 60's. Como resultado, cualquier trabajo de tolerancias estaba basado en el estudio de las aberraciones porque el trazado de rayos era extremadamente arduo.

El trabajo de esos tiempos en tolerancias examinaba los cambios en los coeficientes de aberración y la función de mérito se basaba en la razón de Strehl (Strehl, 1902). Lord Raleigh buscaba el desenfoque máximo para un punto en el eje y derivaba la bien conocida regla del cuarto de longitud de onda (Raleigh, 1879). Para sistemas que no estaban delimitados por difracción otras medidas de la calidad de imagen como lo es la función de transferencia óptica eran necesarias porque la razón de Strehl sólo funciona con sistemas que están cerca del límite de difracción (Hopkins, 1957). Finalmente, el trabajo se hacía calculando analíticamente los cambios en el camino óptico de un rayo debido a perturbaciones en los parámetros de construcción (Rimmer, 1970). Estos métodos de perturbación, además de la computación moderna, trajeron una nueva era para el análisis de tolerancias, la que se usa en estos tiempos y se basa en el trazado de rayos.

En la era moderna del análisis de tolerancias, vigente desde los 70's, se utilizan métodos de trazado de rayos. Conforme el poder de computo aumenta, estos métodos han evolucionado para ser más eficientes, pero los mismos fundamentos del análisis de tolerancias han sido utilizados por décadas. Los detalles de cómo usar estas herramientas

varían de ingeniero a ingeniero, no hay un método que se utilice en todas las aplicaciones. No obstante, los pasos principales a seguir en un proceso de análisis de tolerancias en general son los siguientes (Shannon, 1997):

- a) Determinar las medidas de desempeño del sistema construido.
- b) Desarrollar un modelo y un esquema de simulación para determinar las tolerancias.
- c) Determinar los parámetros a los que se les asignarán tolerancias y los parámetros que serán de control.
- d) Proponer tolerancias con un presupuesto de error inicial usando estadística simple.
- e) Verificar el presupuesto de tolerancias con modelado, experimentación y análisis.
- f) Iterar y suministrar mejor información mientras el trabajo continúa.

Se utilizan herramientas para el análisis de tolerancias en varias etapas del problema. Las herramientas de trazado de rayos estándar permiten analizar sensibilidades inversas de los parámetros para dividir el presupuesto de tolerancias, reasignar tolerancias utilizando el análisis de sensibilidad y utilizar métodos Monte Carlo (Forse, 1996) para predecir el desempeño del sistema a construirse.

En estos tiempos el diseño óptico es más competitivo en el costo, la determinación pronta de las tolerancias y la confiabilidad asociada al diseño nominal harán mejoras sustanciales al negocio debido al enorme ahorro en costo realizado resolviendo problemas a tiempo en el proceso de diseño. El futuro del análisis de tolerancias dependerá del poder de cómputo y de la habilidad del diseñador para generar modelos sofisticados para satisfacer los requerimientos que son cada vez más retadores. Aquí se presentan algunas ideas y posibilidades para el futuro en tolerancias.

Los buenos ingenieros ópticos siempre han trabajado para conseguir los diseños más manufacturables con una distribución de aberraciones, pero los intentos de reducir la

## *Capítulo 2: Tolerancias*

sensibilidad vienen con la inclusión de ésta u otra medida del análisis de tolerancias en la figura de mérito. Intentos para usar los cálculos de sensibilidad en conjunto con la optimización se pueden ver en los trabajos de Grey (1970) y Grammatin et al (1973). La reducción de la sensibilidad de los parámetros también puede incluir características de diseño para tener tolerancias más holgadas como la utilización de superficies esféricas y difractivas.

Existe una variante en la desensibilización, el centrado del diseño. Esta técnica expuesta por Adams (1987), ha sido utilizada en la ingeniería eléctrica. En este método, un conjunto práctico de tolerancias es asignado. Aquí se trabaja a la inversa de lo acostumbrado, se cambian los valores nominales al pasar las simulaciones Monte Carlo para incrementar el desempeño, y las tolerancias se dejan fijas.

Consideremos otro caso en el que los cambios en el proceso de diseño incluyan variabilidad y tolerancias como una parte del diseño estructural. En un diseño integrado, las consideraciones de variabilidad y tolerancias son incluidas en su totalidad en la fase de diseño. En la figura 2.1 se muestra una comparación entre los diagramas de flujo convencional e integrado obtenido de Youngworth (2006):

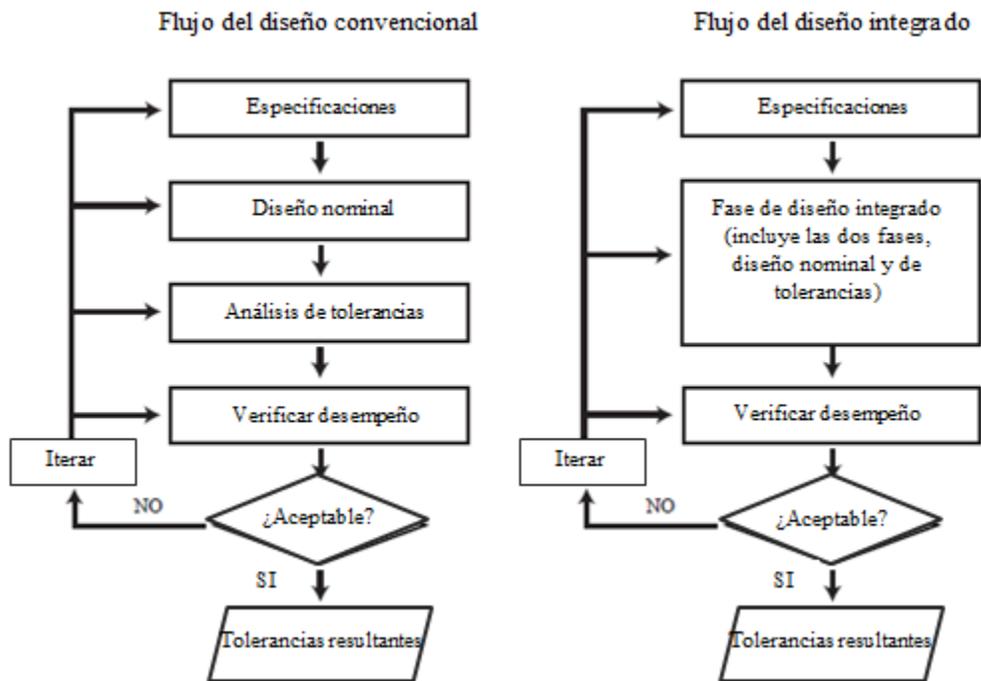


Figura 2.1: Comparativa de los diagramas de flujo del proceso de diseño de sistemas ópticos. En la izquierda el proceso convencional y a la derecha un proceso de diseño integrado en el que las tolerancias se toman en cuenta al mismo tiempo que se realiza el diseño nominal. Youngworth (2006).

Claramente, usar solamente los primeros dos momentos de una distribución quizás no sea una muy buena aproximación de la estadística real, especialmente en la importante región con cola característica de una distribución chi cuadrada donde sistemas rechazados ocurren. Hay mucho espacio en el futuro para el estudio a fondo de la estadística de las tolerancias en el diseño óptico.

Las tolerancias basadas en costo son las que usan un optimizador directamente para ser asignadas. Adams (1987) reconoció la necesidad de mejorar los métodos de asignación de tolerancias y al final la implementación de la tolerancia basada en costo debido al intercambio fundamental entre costo y desempeño. Las consideraciones de costo pueden ser agregadas de varias formas desde consultoría de manufactura hasta la

## Capítulo 2: Tolerancias

creación de funciones de costo. La manera más simple de modelar las funciones de costo es tomar el costo como el inverso de la tolerancia.

La figura 2.2 presenta un diagrama de flujo también extraído de Youngworth (2006), que muestra cómo funciona el análisis de tolerancias basado en costo utilizando un optimizador:

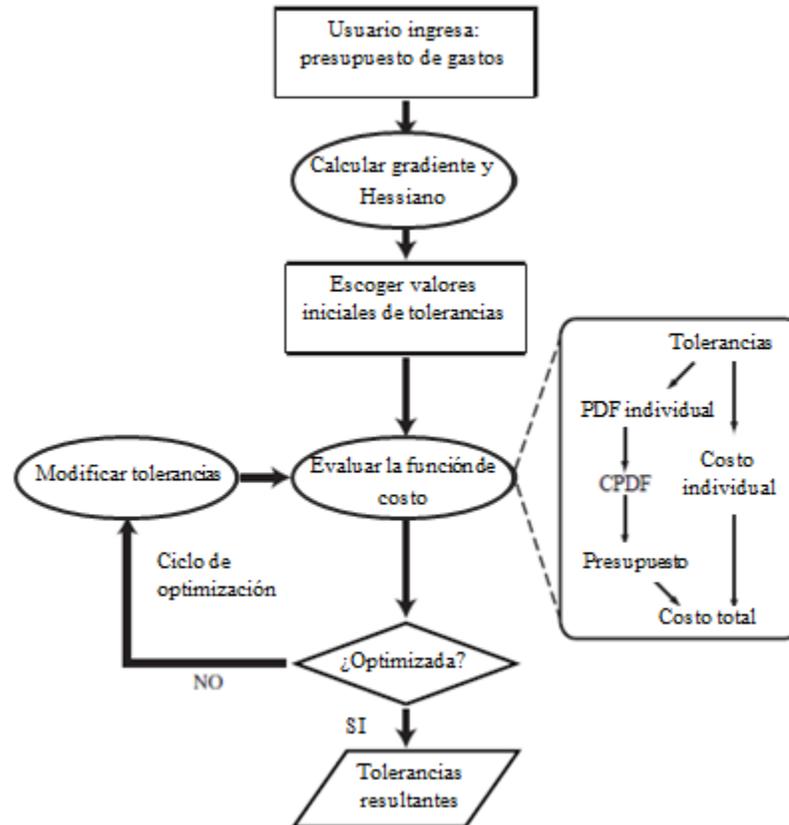


Figura 2.2: Diagrama de flujo de un análisis de tolerancias basado en costos utilizando un optimizador. PDF: función de distribución de probabilidad. Youngworth (2006).

El campo del diseño óptico continúa evolucionando y la complejidad de los requerimientos aumenta a la par. Aún es posible un gran desarrollo para utilizar completamente la computación moderna en la asignación óptima de las tolerancias de sistemas ópticos.

## 2.2. MÉTODOS DE ANÁLISIS

El análisis de tolerancias se puede realizar con tres diferentes métodos: usando ecuaciones diferenciales, usando cálculos exactos y utilizando métodos Monte Carlo. Gracias a las posibilidades ofrecidas por la computación moderna, ahora es posible usar diferente software para realizar estos cálculos, recolectar los resultados y producir tablas sintéticas y graficas que son rápidamente interpretables.

### *El método usando trazado de rayos diferencial (TOR)*

Basado en el trabajo hecho en Europa en la década de los 60's, este método usa ecuaciones exactas para calcular las variaciones de la diferencia de camino óptico (OPD) debido a las tolerancias, y también la posición del rayo central en la imagen. Esto se logra haciendo un solo trazo de rayos a lo largo del sistema, y aplicando estas ecuaciones a cada interfaz entre las superficies. Como es un cálculo basado en el frente de onda, los resultados son cantidades basadas en la OPD como lo son los errores RMS y la MTF. La gran ventaja de este método es la gran eficiencia en lo que respecta a tiempo de cómputo. Este método toma en cuenta las tolerancias acopladas, es decir el efecto de una sobre otra.

### *El método de "Tolerancias definidas por el usuario" (TOLFDIF)*

Su base es construir un archivo perturbado, pero en lugar de tomar todas las tolerancias simultáneamente, toma las tolerancias una tras otra. El ajuste del archivo perturbado, la compensación, está hecha por optimización, y después se calcula el desempeño. Al final, la rutina calcula las estadísticas para determinar las perdidas más probables en el desempeño, y también los rangos para ajustes. Este método no está limitado por desempeños basados en OPD. Cualquier desempeño que se pueda calcular puede ser analizado para sacar las tolerancias. Este método no toma en cuenta las tolerancias acopladas.

### *El método Monte Carlo (TOLMONTE)*

Este método consiste en construir archivos modificados del sistema óptico de acuerdo a un arreglo de tolerancias tomadas aleatoriamente. Para cada archivo creado, el ajuste es simulado y optimizado y después se calcula y memoriza el desempeño de cada

## *Capítulo 2: Tolerancias*

sistema. Como en el método anterior, cualquier desempeño que pueda ser calculado se puede analizar para tolerancias. Este toma en cuenta tolerancias acopladas.

### *Comparación*

Los resultados del TOLFDIF son generalmente optimistas comparados con los del TOR. Esto es porque TOLFDIF ignora términos cruzados, es decir tolerancias acopladas, en su análisis estadístico. En comparación, TOR considera los términos cruzados de orden dos.

Usualmente los resultados de TOLMONTE y TOR se correlacionan bastante bien, demostrando que las limitaciones de los términos cruzados de orden dos en el TOR es suficiente en la mayoría de los casos. Esto le da una gran ventaja a TOR ya que es hasta 2500 veces más rápido que el análisis de Monte Carlo.

TOR es sin duda la manera más eficiente de asignar tolerancias basándose en la MTF. Sin embargo, usar TOR y TOLFDIF puede ser ventajoso por las siguientes razones:

Algunas imprecisiones pueden aparecer en los resultados de TOR. Esto pasa cuando las ecuaciones que se utilizan en este método no son lo suficientemente precisas o cuando las degradaciones debido a las tolerancias son muy grandes.

TOR sólo considera los términos cruzados de orden dos. Cuando todos los términos deben ser considerados, el análisis por Monte Carlo es la solución.

### **Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos de MEGARA**

En ZEMAX las tolerancias se pueden calcular y analizar de tres formas diferentes:

*Análisis directo de sensibilidad:* para un conjunto de tolerancias dado, se determina el cambio en la función de mérito para cada tolerancia individualmente. Esto brinda información de las superficies más sensibles y de los parámetros más críticos en el sistema. Se obtiene un valor esperado del desempeño con una raíz de suma cuadrática (Radiant ZEMAX LLC, 2011).

*Análisis inverso de sensibilidad:* para un cambio permisible introducido por el usuario, usualmente un orden menor que el valor nominal de la función de mérito, el límite de cada tolerancia se calcula individualmente. El análisis inverso, se puede realizar colocando un límite al cambio en la función de mérito nominal, o introduciendo directamente un límite en ésta. Las tolerancias son reajustadas para cumplir con el límite que se le impuso a la función de mérito (Radiant ZEMAX LLC, 2011).

*Análisis Monte Carlo:* los análisis anteriores consideran los efectos en el sistema para cada tolerancia individualmente. El desempeño agregado se estima con una suma cuadrática de todas las funciones de mérito individuales de cada parámetro. Como una forma alternativa para estimar los efectos agregados de todas las tolerancias, se puede realizar una simulación Monte Carlo (MC). Esta simulación genera series de lentes aleatorios que cumplen las tolerancias especificadas y después evalúa la función de mérito. Como se consideran todas las tolerancias aplicables exacta y simultáneamente, es posible simular el desempeño esperado del sistema de una forma muy precisa (Juergens et al, 2007).

El proceso básico para realizar un análisis de tolerancias con la ayuda de ZEMAX es el siguiente:

- 1) Definir un conjunto apropiado de tolerancias para los lentes. Esto se realiza en el editor de tolerancias de ZEMAX.

### *Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos*

- 2) Modificar y ajustar tolerancias para que se cumplan los requerimientos del sistema.
- 3) Añadir compensadores. El compensador por defecto es la distancia focal posterior, que controla la superficie imagen. Otros compensadores se pueden añadir, no hay un límite.
- 4) Seleccionar una función de mérito (MF) apropiada, tal como el rms del tamaño de la mancha, el error de frente de onda, la función de transferencia de modulación, entre otros.
- 5) Seleccionar el modo, directo o inverso. Para el modo inverso, se deben escoger límites o incrementos del criterio, así como usar promedios de la MF o calcular cada campo individualmente.
- 6) Realizar el análisis Monte Carlo.
- 7) Revisar los datos generados y considerar el presupuesto de error. Si se requiere, modificar las tolerancias y repetir el análisis.

Este capítulo se enfoca en el tercer tipo de análisis, el Monte Carlo. Ya que en Sánchez-Blanco (2011) se expresan las tolerancias de diseño en las que se realizó un análisis directo de sensibilidad y se llegó a la conclusión que eran tolerancias factibles.

Se busca una representación precisa del desempeño final del sistema fabricado teniendo en cuenta los requerimientos de calidad de la imagen (Véase capítulo 4).

#### **3.1. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Utilizar ZEMAX para realizar un análisis de tolerancias definidas por el usuario, en un diseño preliminar de MEGARA usando una sola configuración representativa y definiendo los compensadores adecuados para reducir las aberraciones.
- Comparar los resultados obtenidos con Sánchez-Blanco (2011) para corroborar los mismos y al mismo tiempo comprobar que el método utilizado en este trabajo es confiable.

- Ampliar el estudio al utilizar más muestras en los MC para mejorar la precisión de los resultados.

### 3.2. DESARROLLO

Los errores asociados a las diferentes tolerancias son calculados con modelos Monte Carlo. Se utiliza una distribución probabilística normal donde el error asociado es considerado al 90% de ocurrencias, es decir que la función de mérito que determina el desempeño final ya con los errores agregados tiene un 90% de probabilidad de encontrarse en un intervalo asociado.

Como se menciona anteriormente, el diseño de MEGARA cuenta con un colimador y una cámara y tiene varias configuraciones para distintas resoluciones. Los elementos del sistema están etiquetados como se ve en la fig. 3.1.

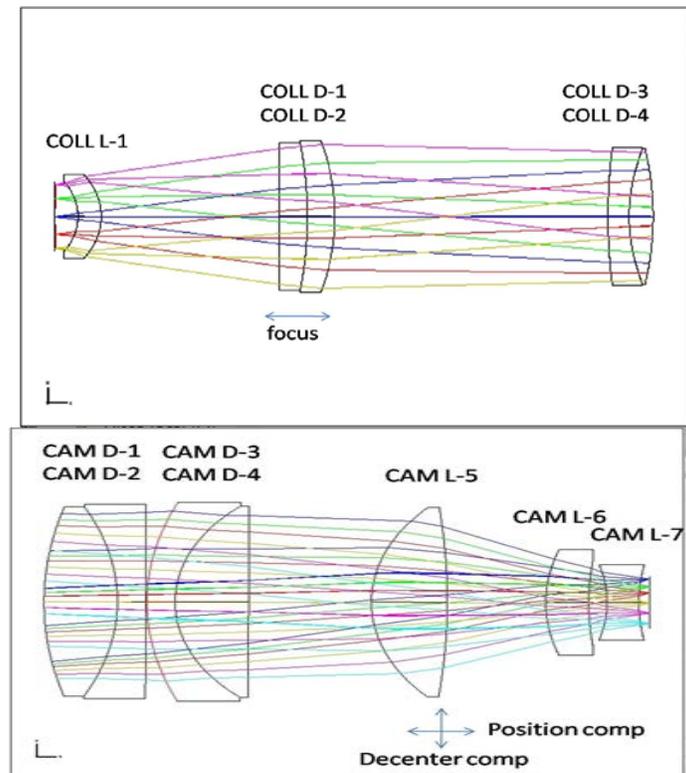


Figura 3.1: Etiquetas de los elementos del sistema. Arriba el colimador, debajo la cámara. El elemento CAM L-5 se utiliza como compensador del sistema.

**Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos**

Para el análisis se usa la configuración con la VPH481-MR (tabla 1.2) usando las longitudes de onda de 440, 470, 480, 495 y 515 nm y los campos de -55, -30, 0, 30 y 55 mm a lo largo de la rendija. El editor de ZEMAX se muestra en la figura 3.2.

Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	1100.000	0.000		55.000	0.000
1	Standard	Infinity	33.500		57.990	0.000
2	Even Asphere	-96.030	33.000	S-NBH53	60.065	0.000
3	Standard	-115.969	256.294 V		72.272	0.000
4	Standard	1.102E+004	40.000	PBM2Y	122.774	0.000
5	Standard	-806.303	40.000	BSM51Y	125.989	0.000
6	Standard	-416.780	392.706 S		129.184	0.000
7	Standard	1155.615	30.000	PBM8Y	118.123	0.000
8	Standard	350.513	35.000	CAF2	115.790	0.000
9	Standard	-584.999	40.000		115.645	0.000
10	Coordinate Br..		70.000	-	0.000	
11	Coordinate Br..		0.000	-	0.000	
12*	Standard	Infinity	0.000	SILICA	151.244	0.000
13	Coordinate Br..		30.000	-	0.000	
14*	Standard	Infinity	1.000	1.27,0.0	164.290	0.000
* Diffraction G..		Infinity	0.000	1.27,0.0	90.000 U	0.000
16*	Standard	Infinity	1.000	1.27,0.0	164.805	0.000
17*	Standard	Infinity	30.000	SILICA	164.192	0.000
18	Coordinate Br..		0.000	-	0.000	
19*	Standard	Infinity	0.000		152.746	0.000
20	Coordinate Br..		70.000	-	0.000	
21	Coordinate Br..		40.000	-	0.000	
22	Standard	395.698	60.000	CAF2	108.657	
23	Standard	-252.083	23.000	BSM51Y	108.641	
24	Standard	Infinity	1.000		110.922	
25	Standard	286.056	23.000	BAL15Y	112.714	
26	Standard	145.898	60.000	CAF2	108.518	
27	Standard	Infinity	107.909		108.442	
28	Coordinate Br..		0.000	-	0.000	
29	Standard	156.910	62.000	CAF2	108.243	
30	Standard	-932.780	0.000		103.535	
31	Coordinate Br..		0.000	-	0.000	
32	Standard	Infinity	76.431 T		101.167	
33	Standard	188.937	35.100	S-LAH55	62.530	
34	Standard	386.570	14.932		51.147	
35*	Standard	-158.045	26.000	S-NBH8	45.000 U	
36*	Standard	240.378	9.012		45.000 U	
37	Coordinate Br..		0.000	-	0.000	
*	Standard	Infinity	-		40.796	

EFFL: 362.883      WFNO: 1.59748      ENPD: 3.32502e+009

Figura 3.2: Óptica de MEGARA en el editor de lentes de ZEMAX. Diseño de Agosto de 2011.

En la fig. 3.3 se muestra el desempeño nominal de la función de mérito a lo largo de la rendija. Se puede observar que el radio rms del manchón nunca excede los 25µm.

Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos

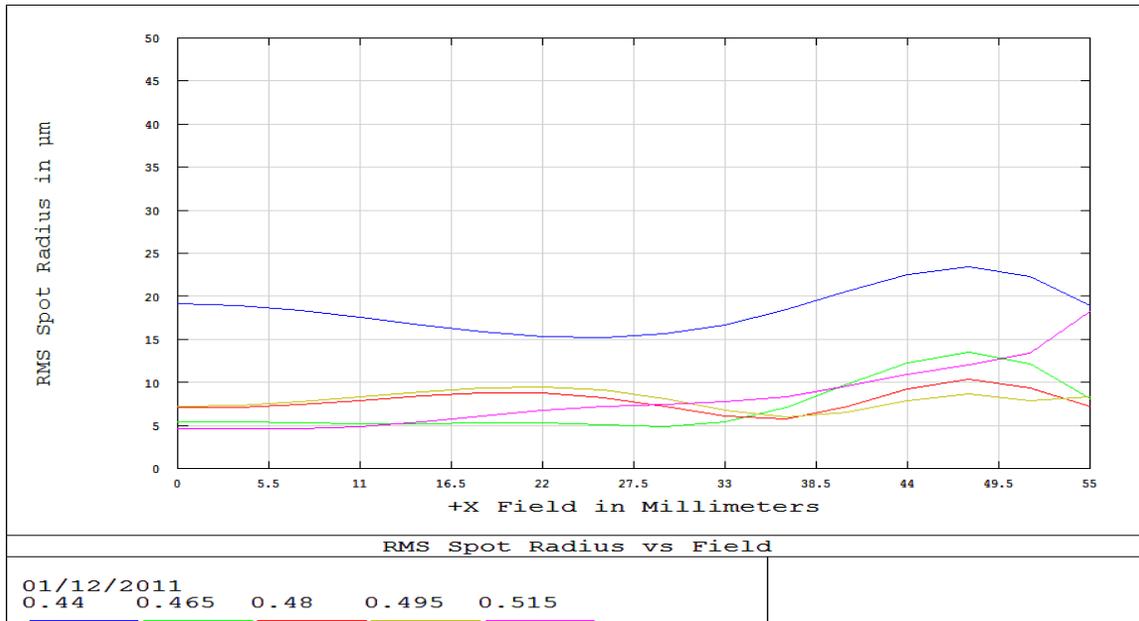


Figura 3.3: Comportamiento nominal de la función de mérito (RMS del tamaño de la mancha) a lo largo de la rendija.

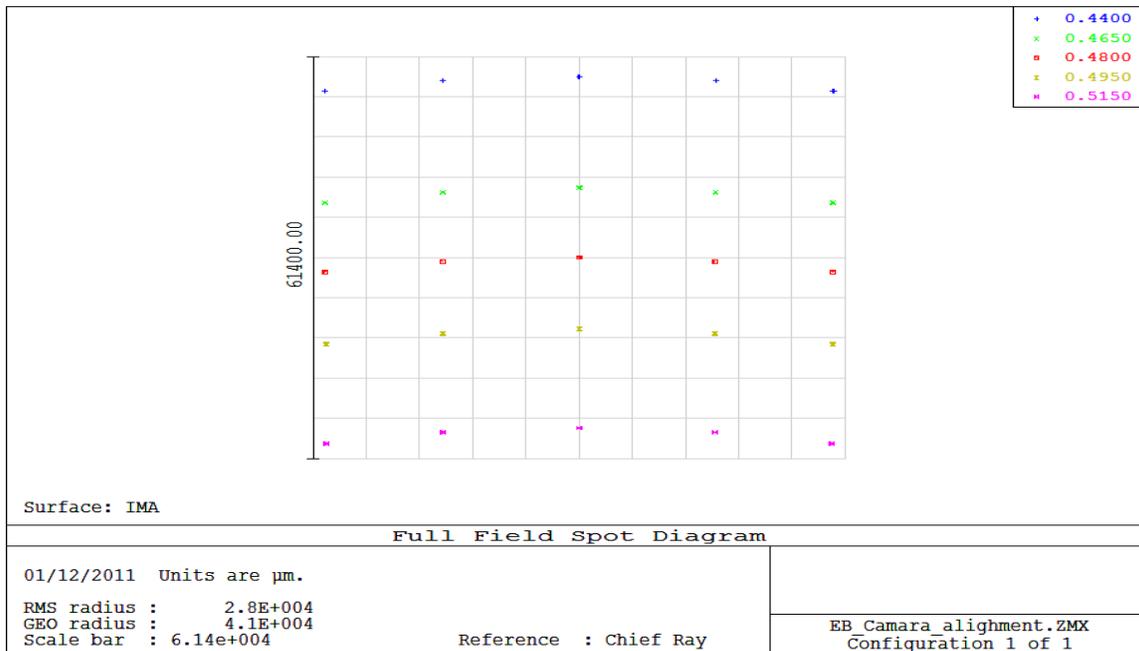


Figura 3.4: Diagrama de manchas en el campo completo de la configuración utilizada en el análisis.

**Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos**

En la fig. 3.4 se muestra que la imagen completa del espectro es de tamaño adecuado para observado perfectamente en el detector especificado en la sección 1.3. La imagen de campo completo está embebida en un área de 61.5x61.5mm<sup>2</sup>.

Las tolerancias utilizadas deben ser separadas por su origen, ya sea fabricación o alineación. Aquí se presentan las que se usarán para el análisis, son realizables con el equipo con que se cuenta para fabricar los lentes y los métodos de ensamblaje que se tienen. En el análisis se parte de éstas para calcular el error en el desempeño del sistema.

TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL COLIMADOR						
ELEMENTO	R1 (mm)	R2 (mm)	Espesor (mm)	Cuña (arcmin)	Superficie (franjas @ 0.632nm)	Índice de Refracción
COLL L_1	-96.03±0.2	-115.96±0.2	33.5±0.15	±2	-	±1e-4
COLL D_1	-11020±5	-806±2	40±0.15	±2	2	±1e-4
COLL D_2	-806±3	-416±2	40±0.15	±2	2	±1e-4
COLL D_3	1155±4	350±0.5	30±0.15	±2	2	±1e-4
COLL D_4	350±0.5	-585±0.6	35±0.15	±2	2	±1e-4

Tabla 3.1: Valores nominales y tolerancias de los parámetros de fabricación de cada elemento del colimador. Diseño de Agosto de 2011.

Coefficiente de Asfericidad	R <sup>2</sup>	R <sup>4</sup>	R <sup>6</sup>
Tolerancia (mm)	±2.77e-6	±7.7e-10	±2.14e-13

Tabla 3.2: Tolerancias de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador. Diseño de Agosto de 2011.

TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA CÁMARA						
ELEMENTO	R1 (mm)	R2 (mm)	Espesor (mm)	Cuña (arcmin)	Superficie (franjas@ 0.632nm)	Índice de Refracción
CAM D_1	395.7±0.2	-252.1±0.2	60±0.1	±2	2	±1e-4
CAM D_2	-252.1±0.2	Plano	23±0.1	±2	2	±1e-4
CAM D_3	286.05±0.2	145.9±0.1	23±0.1	±2	2	±1e-4
CAM D_4	145.9±0.1	Plano	60±0.1	±2	2	±1e-4
CAM L_5	156.9±0.1	-932.8±0.5	62±0.1	±2	2	±1e-4
CAM L_6	188.9±0.2	386.5±0.3	35.1±0.1	±2	2	±1e-4
CAM L_7	-158.0±0.2	240.4±0.2	26±0.1	±2	2	±1e-4

**Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos**

Tabla 3.3: Valores nominales y tolerancias de los parámetros de fabricación de cada elemento de la cámara. Diseño de Agosto de 2011.

TOLERANCIAS DE ALINEACIÓN DEL COLIMADOR				
ELEMENTO	Inclinación en X (arcmin)	Inclinación en Y (arcmin)	Descentrado en X (mm)	Descentrado en Y (mm)
Lente simple (asfera)	±2.1	±2.1	±0.3	±0.3
Doblete 1	±2.1	±2.1	±0.3	±0.3
Doblete 2	±2.1	±2.1	±0.3	±0.3

Tabla 3.4: Valores de tolerancias de los parámetros de alineación de cada uno de los elementos del colimador.

TOLERANCIAS DE ALINEACIÓN DE LA CÁMARA				
ELEMENTO	Inclinación en X (arcmin)	Inclinación en Y (arcmin)	Descentrado en X (mm)	Descentrado en Y (mm)
Doblete 1	±2.1	±2.1	±0.15	±0.15
Doblete 2	±2.1	±2.1	±0.15	±0.15
Lente simple 1	±2.1	±2.1	Compensador	Compensador
Lente simple 2	±2.1	±2.1	±0.15	±0.15
Lente simple 3	±2.1	±2.1	±0.15	±0.15

Tabla 3.5: Valores de tolerancias de los parámetros de alineación de cada uno de los elementos de la cámara.

Se puede ver en la tabla 3.5 que se utilizan compensadores en la cámara, esto es para corregir aberraciones, ya sean simétricas, como lo es el desenfoque o la aberración esférica, o asimétricas, como la coma. Las asimétricas se pueden corregir con desplazamientos laterales y las simétricas ajustando las distancias entre los lentes. Por defecto ZEMAX utiliza la distancia focal para compensar estas aberraciones, pero se pueden añadir compensadores dependiendo de las tolerancias a analizar. Por lo general el elemento más sensible a cambios es el que se usa como compensador, en este caso el elemento CAM L\_5.

Las tolerancias en el número de Abbe, que es una medida adimensional de la dispersión del material, son despreciables debido a la calidad de los materiales y a que la

### Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos

dispersión de los lentes no afecta sustancialmente al espectrógrafo y por tanto no son tomadas en cuenta para el análisis.

Después de revisar los dos tipos de tolerancias anteriores, las de fabricación y las de alineación, tenemos que considerar un tercer tipo: los errores desconocidos, como pueden ser los errores de precisión al medir las superficies fabricadas. Estos se compensan con la longitud focal final del sistema fabricado.

ELEMENTO	Tolerancias desconocidas de MEGARA (mm)
Medida del R de Curvatura	$\pm 0.02$
Medida del espesor	$\pm 0.01$
Precisión del descentrado del compensador	$\pm 0.005$
Posición de los lentes	$\pm 0.1$

Tabla 3.6: Valores de las tolerancias de errores desconocidos. Errores intrínsecos de los aparatos de medición.

Para cada conjunto de tolerancias se generó un análisis Monte Carlo con 100 evaluaciones para observar el comportamiento del sistema y comparar con los resultados obtenidos en Sánchez-Blanco (2011) y después se realizaron simulaciones con 1000 MC para mejorar la predicción del error. Por tanto se tienen cinco resultados, uno para cada conjunto de tolerancias. Se calcula el promedio de la función de mérito en los campos especificados al inicio de esta sección.

### 3.3. RESULTADOS

#### 3.3.1. Tolerancias de manufactura del colimador

Nemotécnica:

- TRAD: Tolerancia en radio de curvatura.
- TTHI: Tolerancia en espesor.
- TSTX: Tolerancia en inclinación de la superficie en x (grados).
- TSTY: Tolerancia en inclinación de la superficie en y (grados).

*Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos*

- TIRR: Tolerancia en irregularidad (franjas).
- TPAR: Tolerancia en algún parámetro definido.
- TIND: Tolerancia en índice de refracción Nd.
- TETX: Tolerancia en inclinación del elemento en x (grados).
- TETY: Tolerancia en inclinación del elemento en y (grados).

El comando TPAR se utiliza en este caso para dar las tolerancias a los coeficientes de asfericidad. A continuación se presentan los resultados de las pruebas Monte Carlo extraídos de ZEMAX, implementando las tolerancias de diseño de la tabla 3.1. Como compensador se utiliza la distancia focal del sistema que se encuentra en el segundo elemento del colimador.

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01125131		
Best	0.01116567	Trial	75
Worst	0.01175312	Trial	604
Mean	0.01134561		
Std Dev	8.5589E-005		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:			
Nominal	:		256.293946
Minimum	:		254.557268
Maximum	:		258.370022
Mean	:		256.311465
Standard Deviation	:		0.675243

98% >	0.01156733
90% >	0.01145241
80% >	0.01140804
50% >	0.01133758
20% >	0.01127368
10% >	0.01124530
2% >	0.01120367

Se tiene que el 90% de ocurrencias del sistema se reporta un desempeño, medido por la función de mérito, de 0.01145mm rms. Tomando en cuenta que el radio rms

### Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos

nominal es de 0.01125, la degradación que genera este conjunto de tolerancias es de 0.00213mm rms, lo que equivale a un 19% del valor nominal.

#### 3.3.2. Tolerancias de manufactura de la cámara

Para la cámara se utiliza el descentrado del primer lente simple como compensador, ya que éste es el elemento más sensible del sistema en un análisis directo (Sánchez-Blanco 2011) y ayuda a corregir aberraciones en el sistema final.

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.00970141		
Best	0.00932882	Trial	542
Worst	0.01048650	Trial	556
Mean	0.00980675		
Std Dev	0.00018177		

#### Compensator Statistics:

Thickness Surf 27:

Nominal	:	107.928312
Minimum	:	107.825916
Maximum	:	108.247179
Mean	:	108.030127
Standard Deviation	:	0.075352

Thickness Surf 37:

Nominal	:	0.015829
Minimum	:	-0.125091
Maximum	:	0.125763
Mean	:	-0.004535
Standard Deviation	:	0.036893

Parameter 1 Surf 28:

Nominal	:	-0.000003
Minimum	:	-0.124211
Maximum	:	0.141920
Mean	:	0.000423
Standard Deviation	:	0.044819

Parameter 2 Surf 28:

Nominal	:	0.107048
Minimum	:	-0.023140
Maximum	:	0.257993
Mean	:	0.110294
Standard Deviation	:	0.043318

98% >	0.01022539
90% >	0.01004663

### *Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos*

80% >	0.00994810
50% >	0.00980144
20% >	0.00964605
10% >	0.00957662
2% >	0.00946757

Se tiene que el 90% de ocurrencias del sistema se reporta un desempeño, medido por la función de mérito, de 0.01005mm rms. Tomando en cuenta que el radio rms nominal es de 0.00970, la degradación que genera este conjunto de tolerancias es de 0.00261mm rms, lo que equivale a un 27% del valor nominal.

#### **3.3.3. Tolerancias de alineación del colimador**

Nemotécnica:

- TEDX: Tolerancia en descentrado del elemento en x.
- TEDY: Tolerancia en descentrado del elemento en y.
- TETX: Tolerancia en inclinación del elemento en x (grados).
- TETY: Tolerancia en inclinación del elemento en y (grados).

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01125131		
Best	0.01119318	Trial	398
Worst	0.01178277	Trial	987
Mean	0.01132739		
Std Dev	8.4814E-005		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	256.293946
Minimum	:	256.291173
Maximum	:	256.297472
Mean	:	256.294338
Standard Deviation	:	0.001007

98% >	0.01157427
90% >	0.01144139
80% >	0.01137545
50% >	0.01130794
20% >	0.01126324
10% >	0.01124444

### Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos

2% > 0.01122022

Se tiene que el 90% de ocurrencias del sistema se reporta un desempeño, medido por la función de mérito, de 0.01144mm rms. Tomando en cuenta que el radio rms nominal es de 0.01125, la degradación que genera este conjunto de tolerancias es de 0.00207mm rms, lo que equivale a un 18.4% del valor nominal.

#### 3.3.4. Tolerancias de alineación de la cámara

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.00970964		
Best	0.00919395	Trial	53
Worst	0.01136135	Trial	129
Mean	0.00994800		
Std Dev	0.00036394		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	256.293818
Minimum	:	256.287406
Maximum	:	256.300186
Mean	:	256.293829
Standard Deviation	:	0.002207

Parameter 1 Surf 28:

Nominal	:	-0.000000
Minimum	:	-0.206886
Maximum	:	0.266514
Mean	:	0.025280
Standard Deviation	:	0.087372

Parameter 2 Surf 28:

Nominal	:	0.109219
Minimum	:	-0.142812
Maximum	:	0.371088
Mean	:	0.111269
Standard Deviation	:	0.088799

98% > 0.01084497  
90% > 0.01044372  
80% > 0.01023460  
50% > 0.00989725  
20% > 0.00964594  
10% > 0.00951009

### *Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos*

2% > 0.00934673

Se tiene que el 90% de ocurrencias del sistema se reporta un desempeño, medido por la función de mérito, de 0.01044mm rms. Tomando en cuenta que el radio rms nominal es de 0.00971, la degradación que genera este conjunto de tolerancias es de 0.00385mm rms, lo que equivale a un 40% del valor nominal.

#### **3.3.5. Tolerancias de errores desconocidos**

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01125131		
Best	0.01065872	Trial	175
Worst	0.01506469	Trial	182
Mean	0.01149521		
Std Dev	0.00067946		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	256.293946
Minimum	:	255.317109
Maximum	:	257.018840
Mean	:	256.287607
Standard Deviation	:	0.265277

98% > 0.01330844  
90% > 0.01244801  
80% > 0.01200344  
50% > 0.01132630  
20% > 0.01090934  
10% > 0.01081296  
2% > 0.01072790

Se tiene que el 90% de ocurrencias del sistema se reporta un desempeño, medido por la función de mérito, de 0.01245mm rms. Tomando en cuenta que el radio rms nominal es de 0.01125, la degradación que genera este conjunto de tolerancias es de 0.00532mm rms, lo que equivale a un 47% del valor nominal.

#### **3.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo sólo se expusieron los resultados de los modelos MC correspondientes al diseño de Agosto de 2011, que son los que revelan el nivel de degradación que se tendrá en la imagen después de todo. Cabe mencionar que las

*Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos*

tolerancias que se utilizaron aquí se mantienen para los análisis posteriores en el diseño de Noviembre de 2011 (Capítulos 4 y 5). En la tabla 3.7 se muestra una comparación entre los resultados de Sánchez-Blanco (2011) y los que se obtuvieron en este trabajo. Ambas simulaciones MC fueron realizadas con 100 muestras, también se compara con el valor nominal de la MF.

		Sánchez-Blanco (2011)	Este Trabajo	
Tipos de tolerancias analizadas	Valor nominal de la MF (mm rms)	Valor de la MF en 90% de ocurrencias (mm rms)	Valor de la MF en 90% de ocurrencias (mm rms)	Diferencia (%)
Tol. de manufactura del colimador	0.01125131	0.01145296	0.01147403	0.18
Tol. de manufactura de la cámara	0.00970141	0.01003059	0.01007416	0.43
Tol. de alineación del colimador	0.01125131	0.01140094	0.01143024	0.25
Tol. de alineación de la cámara	0.00970964	0.01043011	0.01058689	1.5
Tol. desconocidas	0.01125131	0.01231704	0.01275095	3.4

Tabla 3.7: Comparativa entre los resultados obtenidos en Sánchez-Blanco (2011) y en este trabajo de tesis, a la derecha la diferencia en porcentaje entre los dos valores.

Los resultados concuerdan bastante bien como se puede apreciar en la tabla 3.7 las diferencias entre los dos valores no exceden el 3.5% y sólo se diferencian porque las simulaciones son aleatorias y no se puede obtener un resultado idéntico de un análisis a otro.

No sólo se logró reproducir los resultados sino que también se realizaron simulaciones MC más precisas, de 1000 muestras. En la tabla 3.8 se presenta una comparativa entre los resultados de 100 MC contra 1000 MC.

*Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos*

Tipos de tolerancias analizadas	Valor nominal de la MF (mm rms)	MF en 90% 100 MC (mm rms)	MF en 90% 1000 MC (mm rms)	Diferencia (%)
Tol. de manufactura del colimador	0.01125131	0.01147403	0.01145241	0.20
Tol. de manufactura de la cámara	0.00970141	0.01007416	0.01004663	0.27
Tol. de alineación del colimador	0.01125131	0.01143024	0.01144139	0.10
Tol. de alineación de la cámara	0.00970964	0.01058689	0.01044372	1.4
Tol. desconocidas	0.01125131	0.01275095	0.01244801	2.3

Tabla 3.8: Comparativa entre los resultados de 100 y 1000 MC el valor más confiable tiende a ser el de 1000 MC ya que se tienen 10 veces más muestras.

En la tabla 3.8 se observa una mejora en los resultados de 1000 MC en casi todos los rubros excepto en las tolerancias de alineación del colimador. Los resultados utilizando 1000 MC se diferencian de los de 100 en que al tener más muestras se puede obtener más certeza en los valores de probabilidad y por tanto el valor esperado de desempeño es más preciso. Estos resultados se deben interpretar: al realizar una resta de cuadrados con el valor nominal del rms del radio la mancha podemos obtener la degradación de la imagen. En la tabla 3.9 se observa la comparación entre las degradaciones obtenidas por Sánchez-Blanco (2011) con 100 simulaciones MC y las que se obtuvieron con los 1000 MC.

*Capítulo 3: Reproducción de los resultados para las tolerancias de diseño de los elementos ópticos*

	Sánchez-Blanco (2011)	Este Trabajo	
Tipos de tolerancias analizadas	Degradación de la imagen (mm rms)	Degradación de la imagen (mm rms)	Diferencia (%)
Tol. de manufactura del colimador	0.00213	0.00213	0.0
Tol. de manufactura de la cámara	0.00297	0.00261	12
Tol. de alineación del colimador	0.00184	0.00207	12.5
Tol. de alineación de la cámara	0.00420	0.00385	8.3
Tol. desconocidas	0.00590	0.00532	9.8

Tabla 3.9: Comparación de las degradaciones predichas en cada uno de los 5 rubros de tolerancias tratadas.

De la tabla 3.9 se puede ver que utilizando un muestreo de 1000 comparado con 100 MC es hasta un 12.5% más precisa en el cálculo del desempeño final del sistema. Esto ofrece más certidumbre para la fabricación de los elementos.

**Concluyendo:**

Se partió de los análisis de tolerancias realizados y de las tolerancias proporcionadas por Sánchez-Blanco (2011) quien es diseñador del sistema óptico del espectrógrafo. Se realizaron las mismas pruebas que realizó él. El objetivo principal era lograr reproducir los resultados que ya se habían obtenido. No sólo se alcanzó el objetivo sino que se pudo mejorar la precisión de ellos al aumentar las muestras.

## **Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA**

El capítulo se enfoca en análisis posteriores de la misma índole que el anterior. Cuando se emularon los resultados del diseñador, se utilizó un diseño de Agosto de 2011, éste ha ido evolucionando como resultado natural tanto de los requerimientos científicos como de sugerencias relacionadas con la manufactura. El diseño que se presenta en este capítulo corresponde a Noviembre de 2011. Así mismo, ahora se realiza un análisis de tolerancias con diferentes configuraciones representativas del espectrógrafo para mostrar que es confiable en todas las longitudes de onda y en todas las resoluciones que se planean utilizar.

### **4.1. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Utilizar ZEMAX para realizar un análisis de tolerancias definidas por el usuario, utilizando simulaciones Monte Carlo en un diseño preliminar de MEGARA usando cuatro configuraciones representativas y definiendo los compensadores adecuados para reducir las aberraciones.
- Comparar los resultados en las diferentes configuraciones.
- Ampliar el estudio anterior al utilizar una versión más reciente del diseño e incluir otras fuentes de error.
- Verificar que se cumple con el requerimiento de imagen en todas las configuraciones.

### **4.2. DESARROLLO**

Para este análisis se usaron cuatro configuraciones distintas que son representativas de todas las configuraciones posibles, una de baja resolución (LR), una de alta resolución (HR), y dos de resolución media en rojo y azul (MR\_R y MR\_B) las VPHs utilizadas fueron: VPH480-LR, VPH481-MR (MR\_B), VPH712-MR (MR\_R) y VPH863-HR (Ver tabla 1.2). Se escogieron éstas puesto que son 19 configuraciones y se tomaron las representativas de los tres grupos en que se dividen; resolución baja, media y

**Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA**

alta. En estas configuraciones se manejan las siguientes longitudes de onda en nanómetros:

- 440,455,470,480,495,515 (LR).
- 460,470,481,490,495,503 (MR\_B).
- 674,690,712,720,730,740 (MR\_R).
- 838,850,863,870,880,885 (HR).

Y los campos -50, -30, 0, 30, 50 mm a lo largo de la rendija.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		1075.000	0.000		50.000	0.000
1	Standard		Infinity	33.500		55.213	0.000
2*	Even Asph..		-91.368	32.500	PBM2Y	63.000	U 0.000
3*	Standard		-108.804	241.365		80.000	U 0.000
4*	Standard		Infinity	42.000	PBM2Y	135.000	U 0.000
5*	Standard		-529.723	42.000	BSM51Y	135.000	U 0.000
6*	Standard		-389.110	389.635	S	135.000	U 0.000
7*	Standard		1197.768	35.000	PBM8Y	125.000	U 0.000
8*	Standard		346.286	45.000	CAF2	125.000	U 0.000
9*	Standard		-563.605	180.000		125.000	U 0.000
10	Coordinat..			70.000	-	0.000	
11	Coordinat..			0.000	-	0.000	
12*	Standard		Infinity	0.000	SILICA	156.995	0.000
13	Coordinat..			30.000	-	0.000	
14*	Standard		Infinity	1.000	1.27,0.0	170.665	0.000
*	Diffracti..		Infinity	0.000	1.27,0.0	155.640	0.000
16*	Standard		Infinity	1.000	1.27,0.0	171.204	0.000
17*	Standard		Infinity	30.000	F SILICA	170.562	0.000
18	Coordinat..			0.000	-	0.000	
19*	Standard		Infinity	0.000		158.599	0.000
20	Coordinat..			70.000	F -	0.000	
21	Coordinat..			50.000	-	0.000	
22*	Standard		391.815	60.000	CAF2	118.000	U 0.000
23*	Standard		-227.413	30.000	BSM51Y	118.000	U 0.000
24*	Standard		Infinity	1.000		120.000	U 0.000
25*	Standard		273.438	30.000	BAL15Y	120.000	U 0.000
26*	Standard		140.332	60.000	CAF2	110.000	U 0.000
27*	Standard		Infinity	79.667		110.000	U 0.000
28	Coordinat..	Element Tilt		0.000	-	0.000	
29*	Standard		155.224	62.000	CAF2	112.000	U 0.000
30*	Standard		-887.497	-62.000	T	112.000	U 0.000
31	Coordinat..	Element Tilt		62.000	P -	0.000	
32	Standard	Dummy	Infinity	77.196		107.490	0.000
33*	Standard		175.017	35.100	S-LAH55	65.000	U 0.000
34*	Standard		329.328	14.932		65.000	U 0.000
35*	Standard		-152.794	26.000	S-NB8	45.000	U 0.000
36*	Standard		240.378	9.012		40.000	U 0.000
37	Coordinat..			0.000	-	0.000	
*	Standard		Infinity	-		37.290	0.000

EFFL: 778.208

WFNO: 1.49726

ENPD: 3.32502e+009

TOTR: 1777.91

*Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA*

Figura 4.1: Editor de lentes en ZEMAX, se muestran cada una de las superficies de cualquier configuración de MEGARA, de hecho lo único que cambia es el elemento de pupila en las diferentes configuraciones.

La longitud focal efectiva varía muy poco entre configuraciones. Se debe notar que se agregaron dos superficies de inclinación de elemento en las superficies 28 y 29. La inclinación se deja en cero y sólo es para propósitos de compensar cuando se están analizando las tolerancias de la cámara y así reducir las aberraciones.

Los coeficientes de la superficie esférica (superficie 2 en el editor) son:

$$R^2 = 1.036 \times 10^{-4}; R^4 = -1.447 \times 10^{-8}; R^6 = -1.302 \times 10^{-11}$$

El requerimiento de la calidad de la imagen es tener el 80% de la energía de la fibra en el elemento de resolución de 4 pixeles que equivalen a  $60 \mu\text{m}$  (Sánchez-Blanco, 2011).

El valor que contiene el 80% de energía encerrada que proviene de una fibra óptica cuya proyección es  $50 \mu\text{m}$  es un diámetro de  $35 \mu\text{m}$ .

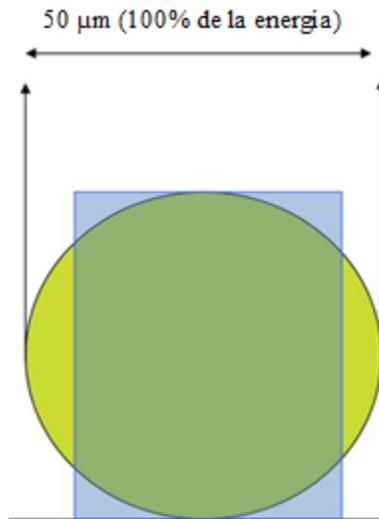


Figura 4.2: Ilustración representativa del tamaño de mancha requerido y del 80% de energía (área verde).

Por esta razón la degradación de la calidad de la imagen permisible está dada por:

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

$$EE_{80} = 60^2 - 35^2 = 48.7^2$$

Así pues la degradación tiene que ser menor o igual a 48.7  $\mu\text{m}$  en diámetro, ó 24.3  $\mu\text{m}$  en radio. Por lo tanto, el valor del requerimiento cuando se analiza el desempeño de la imagen deberá tener un valor de  $EER_{80} \leq 24.3 \mu\text{m}$ .

Todos los elementos contemplados para el análisis deben sumar una degradación máxima de  $EED_{80} < 48.7 \mu\text{m}$ . No obstante, para propósitos prácticos del análisis óptico, la evaluación del desempeño no será dada en términos de  $EED_{80}$ , sino en términos de rms del radio de la mancha y considerando un perfil Gaussiano 1d en la dirección espectral, dado que este es un criterio de comparación que muestra la degradación de la imagen del valor nominal de una manera simple y geométrica como se mostró en el capítulo anterior.

Así, para poder calcular los errores, se transforma de  $EE_{80}$  a la  $\sigma$  de una Gaussiana. El 80% de la energía en una Gaussiana 1d esta contenida por debajo de  $\pm 1.28 \sigma$ .

Así que  $EED_{80} = 48.7 \mu\text{m}$  se convierte en  $EER_{80} = 24.3 \mu\text{m}$  ó  $\sigma = EER_{80} / 1.28 = 19 \mu\text{m}$ .

Los errores totales se calculan como una suma cuadrática:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{diseño}^2 + \sigma_{fabricación}^2 + \sigma_{alineamiento}^2 + \dots$$

Los valores nominales en el diseño presentado en este capítulo cambian un poco respecto a los que se utilizaron en el anterior, pero se puede ver de las tablas 3.1 a 3.5 que las tolerancias se mantienen iguales en casi todos los parámetros, al compararlas con las tablas 4.1 a 4.5. A continuación se presentan los valores de los parámetros que se utilizaron para el desarrollo de este análisis y el del capítulo 5.

*Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA*

TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL COLIMADOR						
ELEMENTO	R1 (mm)	R2 (mm)	Espesor (mm)	Cuña (arcmin)	Calidad de la Superficie (franjas @ 0.632nm)	Índice de Refracción
COLL L_1	-91.37±0.2	-108.80±0.2	32.5±0.15	±2	-	±1e-4
COLL D_1	Plano	-529.72±2	42±0.15	±2	2	±1e-4
COLL D_2	-529.72±2	-389.11±2	42±0.15	±2	2	±1e-4
COLL D_3	1197.8±5	346.3±0.5	35±0.15	±2	2	±1e-4
COLL D_4	346.3±0.5	-563.6±0.6	45±0.15	±2	2	±1e-4

Tablas 4.1: Valores nominales y tolerancias de los parámetros de fabricación de cada elemento del colimador. Diseño de Noviembre de 2011.

Coefficiente de Asfericidad	R2	R4	R6
Valor (mm)	+1.036e-4	-1.447e-8	-1.302e-11
Tolerancia (mm)	±2.77e-6	±7.7e-10	±2.14e-13

Tablas 4.2: Tolerancias de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador. Diseño de Noviembre de 2011.

TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA CÁMARA						
ELEMENTO	R1 (mm)	R2 (mm)	Espesor (mm)	Cuña (arcmin)	Calidad de la Superficie (franjas @ 0.632nm)	Índice de Refracción
CAM D_1	391.8±0.3	-227.4±0.3	60±0.1	±2	2	±1e-4
CAM D_2	-227.4±0.3	Plano	30±0.1	±2	2	±1e-4
CAM D_3	273.4±0.1	140.3±0.1	30±0.1	±2	2	±1e-4
CAM D_4	140.3±0.1	Plano	60±0.1	±2	2	±1e-4
CAM L_5	155.2±0.1	-887.5±0.5	62±0.1	±2	2	±1e-4
CAM L_6	175±0.2	339.3±0.3	35.1±0.1	±2	2	±1e-4
CAM L_7	-152.8±0.2	240.4±0.2	26±0.1	±2	2	±1e-4

Tabla 4.3: Valores nominales y tolerancias de los parámetros de fabricación de cada elemento de la cámara. Diseño de Noviembre de 2011.

*Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA*

TOLERANCIAS DE ALINEACIÓN DEL COLIMADOR				
ELEMENTO	Inclinación en X (arcmin)	Inclinación en Y (arcmin)	Descentrado en X (mm)	Descentrado en Y (mm)
Singlete (asfera)	±2.1	±2.1	±0.2	±0.3
Doblete 1	±2.1	±2.1	±0.3	±0.3
Doblete 2	±2.1	±2.1	±0.3	±0.3

Tabla 4.4: Valores de tolerancias de los parámetros de alineación de cada uno de los elementos del colimador. Diseño de Noviembre de 2011.

TOLERANCIAS DE ALINEACIÓN DE LA CÁMARA				
ELEMENTO	Inclinación en X (arcmin)	Inclinación en Y (arcmin)	Descentrado en X (mm)	Descentrado en Y (mm)
Doblete 1	±2.1	±2.1	±0.15	±0.15
Doblete 2	±2.1	±2.1	±0.15	±0.15
Singlete 1	±2.1	±2.1	Compensador	Compensador
Singlete 2	±2.1	±2.1	±0.1	±0.15
Singlete 3	±2.1	±2.1	±0.1	±0.15

Tabla 4.5: Valores de tolerancias de los parámetros de alineación de cada uno de los elementos de la cámara. Diseño de Noviembre de 2011.

Las tolerancias para errores desconocidos se mantienen como en la tabla 3.6. Ya que los instrumentos con los que se tomaran las mediciones finales no cambiaran del todo.

El procedimiento que se realizó es similar al del capítulo 3, los cambios importantes fueron:

- Diseño de Agosto de 2011 al diseño de Noviembre de 2011 con cambios en parámetros nominales expresados en las tablas de arriba.
- Se utilizaron cuatro configuraciones representativas en lugar de una sola: una de baja resolución, dos de media y una de alta.
- Se comparan las degradaciones totales del sistema con los requerimientos de imagen, se suman efectos térmicos, homogeneidad del material y los errores en los elementos de pupila.

## Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

Para cada juego de tolerancias se generó un análisis Monte Carlo con 100 evaluaciones para observar el comportamiento del sistema, después realizamos las simulaciones con 1000 MC para mejorar la predicción del error. Por lo tanto, se tienen cinco resultados por cada configuración: dos de los conjuntos de tolerancias de fabricación, otros dos de las tolerancias de alineación y uno de las tolerancias de errores desconocidos para un total de veinte resultados ya que se utilizan cuatro configuraciones.

### 4.3. RESULTADOS

#### 4.3.1. Tolerancias de manufactura del colimador

Para el análisis de tolerancias en la primera parte del sistema, sólo se usó la distancia focal como compensador. Como se menciona antes, la función de mérito usada es el rms del radio de la mancha.

##### 4.3.1.1. Baja Resolución (LR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01454854		
Best	0.01412869	Trial	344
Worst	0.01513851	Trial	710
Mean	0.01460206		
Std Dev	0.00016684		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	241.287181
Minimum	:	239.578114
Maximum	:	243.189127
Mean	:	241.298390
Standard Deviation	:	0.690984

98% >	0.01497382
90% >	0.01481585
80% >	0.01474184
50% >	0.01459687
20% >	0.01445627
10% >	0.01438794
2% >	0.01426961

#### **Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA**

La función de mérito nominal fue de 0.01455 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01482 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00282 mm rms, lo que equivale a un 19% del valor nominal.

##### **4.3.1.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)**

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.00761330		
Best	0.00749365	Trial	756
Worst	0.00826868	Trial	171
Mean	0.00771827		
Std Dev	0.00010149		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	241.418967
Minimum	:	239.520648
Maximum	:	243.236755
Mean	:	241.434639
Standard Deviation	:	0.673417

98% >	0.00797821
90% >	0.00784513
80% >	0.00779771
50% >	0.00770315
20% >	0.00763518
10% >	0.00760057
2% >	0.00754725

La función de mérito nominal fue de 0.00761 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.00784 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00188 mm rms, lo que equivale a un 25% del valor nominal.

##### **4.3.1.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)**

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01002236		
Best	0.00978009	Trial	923
Worst	0.01050613	Trial	886
Mean	0.01010070		
Std Dev	0.00010582		

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

##### Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:  
Nominal : 244.646470  
Minimum : 242.526085  
Maximum : 246.633500  
Mean : 244.674830  
Standard Deviation : 0.691422

98% > 0.01033186  
90% > 0.01024707  
80% > 0.01018255  
50% > 0.01009169  
20% > 0.01001298  
10% > 0.00996810  
2% > 0.00991042

La función de mérito nominal fue de 0.01002 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01025 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00215 mm rms, lo que equivale a un 21% del valor nominal.

##### 4.3.1.4. Alta Resolución (HR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal 0.01201125  
Best 0.01180975 Trial 36  
Worst 0.01238057 Trial 691  
Mean 0.01207497  
Std Dev 7.7012E-005

##### Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:  
Nominal : 245.607609  
Minimum : 243.706440  
Maximum : 247.887024  
Mean : 245.596440  
Standard Deviation : 0.689426

98% > 0.01224776  
90% > 0.01217077  
80% > 0.01213716  
50% > 0.01207033  
20% > 0.01201204  
10% > 0.01197820  
2% > 0.01192145

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

La función de mérito nominal fue de 0.01201 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01217 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00196 mm rms, lo que equivale a un 16% del valor nominal.

En lo que respecta al compensador en la distancia focal, la variación de su posición en las cuatro configuraciones se mantuvo  $< \pm 2.3$ mm.

#### 4.3.2. Tolerancias de manufactura de la cámara

En este caso se utilizó el elemento CAM L\_5 como compensador además de la distancia focal dada por el espesor 3, ya que se podrá descentrar y mover en el eje para reducir las aberraciones después de que todo esté fabricado y ensamblado. La función de mérito como en el caso anterior es el rms del radio de la mancha.

##### 4.3.2.1. Baja Resolución (LR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01249748		
Best	0.01165415	Trial	559
Worst	0.01494935	Trial	874
Mean	0.01286491		
Std Dev	0.00046101		

##### Compensator Statistics:

Thickness Surf 27:			
Nominal	:		78.698100
Minimum	:		78.415648
Maximum	:		79.195834
Mean	:		78.796394
Standard Deviation	:		0.134681

Thickness Surf 37:			
Nominal	:		0.112988
Minimum	:		-0.178370
Maximum	:		0.177554
Mean	:		0.004230
Standard Deviation	:		0.057488

Parameter 1 Surf 28:			
Nominal	:		-0.000001
Minimum	:		-0.153053
Maximum	:		0.112993
Mean	:		0.001748

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

Standard Deviation : 0.042010

Parameter 2 Surf 28:

Nominal : 0.121856  
Minimum : -0.009549  
Maximum : 0.319616  
Mean : 0.165055  
Standard Deviation : 0.050689

98% > 0.01390896  
90% > 0.01346289  
80% > 0.01322941  
50% > 0.01283404  
20% > 0.01246481  
10% > 0.01229484  
2% > 0.01203660

La función de mérito nominal fue de 0.01250 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01346 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00499 mm rms, lo que equivale a un 40% del valor nominal.

##### 4.3.2.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal 0.00716164  
Best 0.00683446 Trial 15  
Worst 0.01080338 Trial 907  
Mean 0.00789069  
Std Dev 0.00056838

Compensator Statistics:

Thickness Surf 27:

Nominal : 78.949163  
Minimum : 78.236315  
Maximum : 79.675980  
Mean : 78.883384  
Standard Deviation : 0.210276

Thickness Surf 37:

Nominal : 0.083471  
Minimum : -0.143174  
Maximum : 0.152961  
Mean : -0.008928  
Standard Deviation : 0.044281

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

Parameter 1 Surf 28:  
Nominal : -0.000001  
Minimum : -0.115752  
Maximum : 0.129566  
Mean : -0.000598  
Standard Deviation : 0.041182

Parameter 2 Surf 28:  
Nominal : 0.034631  
Minimum : -0.082535  
Maximum : 0.173189  
Mean : 0.058563  
Standard Deviation : 0.046236

98% > 0.00940698  
90% > 0.00864663  
80% > 0.00833221  
50% > 0.00776298  
20% > 0.00741552  
10% > 0.00729160  
2% > 0.00708946

La función de mérito nominal fue de 0.00716 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.00865 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00485 mm rms, lo que equivale a un 68% del valor nominal.

##### 4.3.2.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.00984563		
Best	0.00910594	Trial	960
Worst	0.01532063	Trial	644
Mean	0.01114722		
Std Dev	0.00098542		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 27:  
Nominal : 80.245529  
Minimum : 79.671671  
Maximum : 80.828539  
Mean : 80.201750  
Standard Deviation : 0.208955

Thickness Surf 37:  
Nominal : -0.067184

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

Minimum : -0.290697  
Maximum : -0.032528  
Mean : -0.157690  
Standard Deviation : 0.043296

Parameter 1 Surf 28:  
Nominal : -0.000003  
Minimum : -0.138698  
Maximum : 0.127120  
Mean : -0.001015  
Standard Deviation : 0.043322

Parameter 2 Surf 28:  
Nominal : -0.013420  
Minimum : -0.133293  
Maximum : 0.158033  
Mean : 0.018261  
Standard Deviation : 0.046745

98% > 0.01333547  
90% > 0.01244106  
80% > 0.01199677  
50% > 0.01107922  
20% > 0.01028146  
10% > 0.00989373  
2% > 0.00943313

La función de mérito nominal fue de 0.00984 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01244 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00761 mm rms, lo que equivale a un 77% del valor nominal.

#### 4.3.2.4. Alta Resolución (HR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal 0.01053288  
Best 0.00921004 Trial 734  
Worst 0.01668661 Trial 698  
Mean 0.01212152  
Std Dev 0.00122132

Compensator Statistics:

Thickness Surf 27:  
Nominal : 80.778472  
Minimum : 80.084079  
Maximum : 81.497857

**Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA**

Mean : 80.700874  
Standard Deviation : 0.219125

Thickness Surf 37:  
Nominal : -0.134142  
Minimum : -0.345858  
Maximum : -0.102071  
Mean : -0.225282  
Standard Deviation : 0.042966

Parameter 1 Surf 28:  
Nominal : 0.000003  
Minimum : -0.130254  
Maximum : 0.128955  
Mean : -0.001933  
Standard Deviation : 0.043027

Parameter 2 Surf 28:  
Nominal : -0.083263  
Minimum : -0.202039  
Maximum : 0.076233  
Mean : -0.063259  
Standard Deviation : 0.043195

98% > 0.01489251  
90% > 0.01365600  
80% > 0.01314658  
50% > 0.01204439  
20% > 0.01104915  
10% > 0.01059320  
2% > 0.00988058

La función de mérito nominal fue de 0.01053 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01366 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00870 mm rms, lo que equivale a un 83% del valor nominal.

Con respecto a los compensadores en el elemento L5, el rango de descentrado en todas las configuraciones se mantuvo <0.25mm, el rango de posición <±0.16mm y el rango de variación de la distancia focal <±0.12mm.

### 4.3.3. Tolerancias de alineación del colimador

#### 4.3.3.1. Baja Resolución (LR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01454854		
Best	0.01424161	Trial	573
Worst	0.01498723	Trial	480
Mean	0.01460087		
Std Dev	0.00013529		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	241.287181
Minimum	:	241.284063
Maximum	:	241.290392
Mean	:	241.287419
Standard Deviation	:	0.001104

98% >	0.01489080
90% >	0.01478387
80% >	0.01471953
50% >	0.01459492
20% >	0.01448323
10% >	0.01442279
2% >	0.01434922

La función de mérito nominal fue de 0.01455 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01478 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00260 mm rms, lo que equivale a un 18% del valor nominal.

#### 4.3.3.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.00761330		
Best	0.00754076	Trial	397
Worst	0.00846399	Trial	725
Mean	0.00770304		
Std Dev	9.4757E-005		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	241.418967
Minimum	:	241.416685

#### **Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA**

Maximum : 241.421414  
Mean : 241.418933  
Standard Deviation : 0.000823

98% > 0.00796933  
90% > 0.00781680  
80% > 0.00776218  
50% > 0.00768263  
20% > 0.00763091  
10% > 0.00761022  
2% > 0.00758246

La función de mérito nominal fue de 0.00761 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.00782 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00180 mm rms, lo que equivale a un 24% del valor nominal.

##### **4.3.3.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)**

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal 0.01002236  
Best 0.00983750 Trial 509  
Worst 0.01046991 Trial 267  
Mean 0.01008455  
Std Dev 9.6792E-005

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:  
Nominal : 244.646470  
Minimum : 244.644351  
Maximum : 244.648844  
Mean : 244.646682  
Standard Deviation : 0.000867

98% > 0.01031054  
90% > 0.01020423  
80% > 0.01016205  
50% > 0.01007999  
20% > 0.01000243  
10% > 0.00995829  
2% > 0.00990327

La función de mérito nominal fue de 0.01002 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01020 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00190 mm rms, lo que equivale a un 19% del valor nominal.

## Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

### 4.3.3.4. Alta Resolución (HR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01201125		
Best	0.01191616	Trial	191
Worst	0.01257445	Trial	571
Mean	0.01206211		
Std Dev	7.0637E-005		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	245.607609
Minimum	:	245.605247
Maximum	:	245.609876
Mean	:	245.607868
Standard Deviation	:	0.000795

98% >	0.01223768
90% >	0.01215668
80% >	0.01211640
50% >	0.01205624
20% >	0.01200261
10% >	0.01198109
2% >	0.01194373

La función de mérito nominal fue de 0.01201 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01216 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00190 mm rms, lo que equivale a un 16% del valor nominal.

En lo que respecta al compensador en la distancia focal, la variación de su posición en las cuatro configuraciones se mantuvo  $< \pm 0.25$  mm

### 4.3.4. Tolerancias de alineación de la cámara

#### 4.3.4.1. Baja Resolución (LR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01271410		
Best	0.01148973	Trial	61
Worst	0.01482054	Trial	356
Mean	0.01290321		
Std Dev	0.00058384		

Compensator Statistics:

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

Thickness Surf 3:  
Nominal : 241.351880  
Minimum : 241.324810  
Maximum : 241.374783  
Mean : 241.351548  
Standard Deviation : 0.009249

Parameter 1 Surf 28:  
Nominal : 0.000001  
Minimum : -0.208728  
Maximum : 0.237351  
Mean : 0.018027  
Standard Deviation : 0.079901

Parameter 2 Surf 28:  
Nominal : 0.119195  
Minimum : -0.142887  
Maximum : 0.375292  
Mean : 0.120837  
Standard Deviation : 0.083357

98% > 0.01415422  
90% > 0.01366534  
80% > 0.01338675  
50% > 0.01288432  
20% > 0.01238867  
10% > 0.01216323  
2% > 0.01182360

La función de mérito nominal fue de 0.01271 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01366 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.0050 mm rms, lo que equivale a un 40% del valor nominal.

#### 4.3.4.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal 0.00737230  
Best 0.00721390 Trial 738  
Worst 0.00879427 Trial 930  
Mean 0.00766268  
Std Dev 0.00029843

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:  
Nominal : 241.425115

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

Minimum : 241.417167  
Maximum : 241.432019  
Mean : 241.425252  
Standard Deviation : 0.002340

Parameter 1 Surf 28:  
Nominal : 0.000000  
Minimum : -0.252880  
Maximum : 0.241858  
Mean : 0.017804  
Standard Deviation : 0.083754

Parameter 2 Surf 28:  
Nominal : 0.033980  
Minimum : -0.256170  
Maximum : 0.286684  
Mean : 0.034236  
Standard Deviation : 0.082135

98% > 0.00845975  
90% > 0.00811703  
80% > 0.00787761  
50% > 0.00758844  
20% > 0.00741312  
10% > 0.00734551  
2% > 0.00726875

La función de mérito nominal fue de 0.00737 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.00812 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.0034 mm rms, lo que equivale a un 46% del valor nominal.

##### 4.3.4.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal 0.00997539  
Best 0.00964821 Trial 452  
Worst 0.01155691 Trial 360  
Mean 0.01021158  
Std Dev 0.00029592

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:  
Nominal : 244.640090  
Minimum : 244.626081  
Maximum : 244.656746

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

Mean : 244.640102  
Standard Deviation : 0.005386

Parameter 1 Surf 28:  
Nominal : 0.000001  
Minimum : -0.238800  
Maximum : 0.248725  
Mean : 0.022102  
Standard Deviation : 0.082858

Parameter 2 Surf 28:  
Nominal : -0.015435  
Minimum : -0.237216  
Maximum : 0.210426  
Mean : -0.017119  
Standard Deviation : 0.084251

98% > 0.01097798  
90% > 0.01058427  
80% > 0.01041357  
50% > 0.01017441  
20% > 0.00995997  
10% > 0.00987724  
2% > 0.00975671

La función de mérito nominal fue de 0.00998 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01098 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00458 mm rms, lo que equivale a un 46% del valor nominal.

#### 4.3.4.4. Alta Resolución (HR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal 0.01091414  
Best 0.01028876 Trial 985  
Worst 0.01293643 Trial 943  
Mean 0.01113231  
Std Dev 0.00045353

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:  
Nominal : 245.586789  
Minimum : 245.576120  
Maximum : 245.597507  
Mean : 245.586937  
Standard Deviation : 0.003778

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

```
Parameter 1 Surf 28:  
Nominal      :      -0.000001  
Minimum      :      -0.203965  
Maximum      :           0.238432  
Mean         :           0.017398  
Standard Deviation :      0.079456
```

```
Parameter 2 Surf 28:  
Nominal      :      -0.085466  
Minimum      :      -0.351853  
Maximum      :           0.120116  
Mean         :      -0.085577  
Standard Deviation :      0.084146
```

```
98% >      0.01226664  
90% >      0.01179234  
80% >      0.01148143  
50% >      0.01106741  
20% >      0.01073693  
10% >      0.01061568  
2% >       0.01042437
```

La función de mérito nominal fue de 0.01091 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01179 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00446 mm rms, lo que equivale a un 41% del valor nominal.

Con respecto a los compensadores en el elemento L5, en las cuatro configuraciones se mantuvo el intervalo de descentrado <0.34mm y el intervalo de posición <±0.02mm.

#### 4.3.5. Tolerancias de errores desconocidos

Sólo se utiliza la distancia focal en el colimador para compensar.

##### 4.3.5.1. Baja Resolución

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

```
Nominal      0.01454854  
Best         0.01374543      Trial      200  
Worst        0.01789555      Trial      426  
Mean         0.01472061  
Std Dev      0.00071189
```

#### **Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA**

```
Compensator Statistics:
  Thickness Surf 3:
Nominal      :      241.287180
Minimum     :      240.636958
Maximum     :      241.855111
Mean        :      241.293842
Standard Deviation :      0.204601

98% >      0.01663128
90% >      0.01565350
80% >      0.01525613
50% >      0.01455299
20% >      0.01408881
10% >      0.01399570
 2% >      0.01389351
```

La función de mérito nominal fue de 0.01455 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01565 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00576 mm rms, lo que equivale a un 40% del valor nominal.

##### **4.3.5.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)**

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

```
Nominal      0.00761330
Best         0.00743014   Trial    759
Worst       0.00939287   Trial    120
Mean        0.00782075
Std Dev     0.00030379
```

```
Compensator Statistics:
  Thickness Surf 3:
Nominal      :      241.418967
Minimum     :      240.838469
Maximum     :      241.968085
Mean        :      241.421690
Standard Deviation :      0.193682

98% >      0.00868363
90% >      0.00824989
80% >      0.00801318
50% >      0.00771716
20% >      0.00759502
10% >      0.00755881
 2% >      0.00749653
```

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

La función de mérito nominal fue de 0.00761 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.00825 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00318 mm rms, lo que equivale a un 41% del valor nominal.

##### 4.3.5.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01002236		
Best	0.00969060	Trial	449
Worst	0.01205009	Trial	996
Mean	0.01021638		
Std Dev	0.00037265		

Compensator Statistics:

Thickness Surf 3:

Nominal	:	244.646471
Minimum	:	244.032349
Maximum	:	245.175307
Mean	:	244.650088
Standard Deviation	:	0.195199

98% >	0.01127789
90% >	0.01074041
80% >	0.01044533
50% >	0.01009035
20% >	0.00993188
10% >	0.00987602
2% >	0.00979643

La función de mérito nominal fue de 0.01002 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01074 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00387 mm rms, lo que equivale a un 39% del valor nominal.

##### 4.3.5.4. Alta Resolución (HR)

Number of traceable Monte Carlo files generated: 1000

Nominal	0.01201125		
Best	0.01164789	Trial	100
Worst	0.01342811	Trial	106
Mean	0.01214181		
Std Dev	0.00029144		

Compensator Statistics:

#### Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA

Thickness Surf 3:  
Nominal : 245.607609  
Minimum : 245.043806  
Maximum : 246.201467  
Mean : 245.613987  
Standard Deviation : 0.195903

98% > 0.01296503  
90% > 0.01254387  
80% > 0.01233065  
50% > 0.01205824  
20% > 0.01191592  
10% > 0.01186074  
2% > 0.01178086

La función de mérito nominal fue de 0.01201 mm rms. El 90% de los sistemas estuvieron por debajo de 0.01254 mm rms, por tanto la degradación de la imagen es de 0.00360 mm rms, lo que equivale a un 30% del valor nominal.

Con respecto al compensador en la distancia focal del sistema, la variación de la posición en las cuatro configuraciones se mantuvo  $\leq \pm 0.5$ mm.

#### 4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Origen	Degradación ( $\mu\text{m}$ )			
	LR	MR_B	MR_R	HR
Fabricación del colimador	2.82	1.88	2.15	1.96
Fabricación de la cámara	4.99	4.85	7.61	8.70
Alineación del colimador	2.60	1.80	1.90	1.90
Alineación de la cámara	5.0	3.4	4.58	4.46
Errores sin compensar	5.76	3.18	3.87	3.60
Total (suma cuadrática)	9.89	7.2	10.1	10.77

Tabla 4.6: Comparativa de las degradaciones totales entre las cuatro configuraciones de MEGARA utilizadas en el análisis.

*Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA*

En la tabla 4.6 se realiza un resumen de los datos obtenidos en las cuatro diferentes configuraciones, se obtiene un total de degradación debida a las tolerancias que se utilizaron en este capítulo. Cabe mencionar que no son los únicos factores que afectan el desempeño de un sistema, para obtener una mejor aproximación del error y de la degradación se deben tomar en cuenta errores térmicos, la homogeneidad del material y los elementos de pupila. En la tabla 4.7 se presenta un comparativa en la que se toman en cuenta estos parámetros y el desempeño nominal del sistema para obtener una visión completa de los errores que se estiman.

Elemento	$\sigma$ ( $\mu\text{m}$ ) en una fibra óptica de 100 $\mu\text{m}$ de núcleo			
	LR	MR_B	MR_R	HR
Desempeño nominal (Promedio)	13.77	7.47	9.98	11.5
Fabricación del colimador	2.82	1.88	2.15	1.96
Fabricación de la cámara	4.99	4.85	7.61	8.70
Alineación del colimador	2.60	1.80	1.90	1.90
Alineación de la cámara	5.0	3.4	4.58	4.46
Errores sin compensar	5.76	3.18	3.87	3.60
Errores térmicos*	2.1	2.1	2.1	2.1
Homogeneidad del material*	1.7	1.7	1.7	1.7
Elementos de pupila*	5	5	5	5
TOTAL	17.88	11.84	15.30	16.75

Tabla 4.7: Degradación total esperada en las cuatro configuraciones debido a los diferentes tipos de error. \*Valores tomados de Sánchez-Blanco (2011).

#### *Capítulo 4: Análisis extensivo de tolerancias de los elementos ópticos de MEGARA*

Los resultados muestran una degradación menor a la requerida, que es de máximo 19  $\mu\text{m}$ , por lo que con las tolerancias aquí obtenidas, se puede fabricar un sistema confiable y estable. Las tolerancias utilizadas son reales y factibles con el equipo que se tiene en el CIO, donde se fabricarán estas piezas.

Las tolerancias de los coeficientes de asfericidad que se utilizaron para este modelo (Noviembre de 2011) son las mismas que para el diseño anterior (Agosto de 2011) aunque los coeficientes ya no son los mismos. Pareciera que para los nuevos coeficientes son muy holgadas, pero no presentaron alta sensibilidad en los análisis MC en ninguna de las configuraciones usadas. Se pueden estrechar los intervalos pero esto no afectará sustancialmente los resultados de las simulaciones.

Las tolerancias “desconocidas” no parecen ser un problema con el diseño robusto que se tiene. Al definir el elemento CAM L\_5 como un elemento crítico, se tomó la decisión de usarlo como compensador y así reducir aberraciones sin perder desempeño, al hacer esto, se genera otra fuente de error, la precisión de la medida de descentrado, cuando se va a compensar como se puede ver en la tabla 3.6, pero a cambio tenemos la ventaja de poder reducir los errores de otros parámetros particularmente de la cámara que es donde el compensador se pone en acción en la simulaciones. Se puede ver en la tabla 4.7 que los errores que producen mayor degradación de la imagen son los de fabricación de la cámara, sobre todo en alta resolución, pero incluso la degradación máxima en este aspecto es de 8 $\mu\text{m}$  aproximadamente. Con respecto a los errores de alineación se puede ver que en las cuatro configuraciones se obtienen degradaciones similares, de alrededor de 2 $\mu\text{m}$  en el colimador, pero en la cámara estos errores parecen afectar un poco más, aproximadamente 5 $\mu\text{m}$  por configuración, lo cual es el doble de las del colimador.

MEGARA tiene un diseño muy confiable y que se desempeña bien en todas sus configuraciones, dado que se tomaron las más representativas y todas brindan resultados satisfactorios. El diseño sigue en fase preliminar y puede variar en algunos detalles pero se seguirán realizando estas pruebas para asegurar que el desempeño siga siendo bueno y cumpla con los requerimientos establecidos en el capítulo 1. Una combinación entre el análisis directo, Monte Carlo y el análisis inverso, que se revisa en el siguiente capítulo, descartará cualquier problema de diseño en la etapa de prefabricado además de optimizar los márgenes de error.

## Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

En esta sección se emplea una continuación del método de tolerancias propuesto en este trabajo, este análisis es diferente a los dos anteriores y es la parte que muchas veces se omite en el diseño y fabricación de elementos ópticos, se le conoce como análisis inverso de sensibilidad y será el estudio más extenso. Se mantiene el uso de cuatro configuraciones representativas y para motivos de comparación serán exactamente las mismas utilizadas en el capítulo anterior. Las conclusiones que emergen de este tipo de análisis son las más importantes y novedosas para el proceso que lleva el instrumento.

Cuando se realiza un análisis de sensibilidad inverso, las tolerancias se calculan del mismo modo que para el directo. Sin embargo, los cálculos son realizados iterativamente dentro de un ciclo mientras se ajustan las tolerancias máximas y mínimas. ZEMAX trabaja dos modalidades distintas “límite inverso” e “incremento inverso”. En el primero los ajustes son hechos hasta que la función de mérito resultante es aproximadamente igual al criterio máximo que se inserta como parámetro inicial. En el segundo, se ajustan los mínimos y máximos hasta que el cambio en el criterio es aproximadamente igual al valor de incremento insertado como parámetro inicial.

Para que las iteraciones del análisis inverso converjan al valor de tolerancia deseado, el criterio debe cambiar suave y monótonicamente con cada valor de tolerancia. Para el criterio que se utiliza en este trabajo, que es el rms del tamaño de la mancha, éste es normalmente el caso.

Si el valor en el que se comienza a hacer el análisis arroja un mejor desempeño que el criterio máximo introducido o es mejor que el valor de incremento, la tolerancia no recibe cambio alguno. Esto significa que la tolerancia no será relajada; ZEMAX sólo la estrechara en el análisis inverso. Por lo tanto, para poder calcular al intervalo deseado, la tolerancia primero debe ser relajada manualmente, es decir, tener un margen de error mayor al del que se necesitaría.

El motivo de este último análisis es complementar el proceso de asignación de tolerancias y determinar las óptimas, cuales pudieran dejarse un poco más holgadas de lo

## *Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

que se prevé en teoría y a cuales hay que ejercerles un especial cuidado, facilitando la fabricación a los técnicos, ahorrando tiempos y costos donde sea posible.

La interpretación de los resultados de éste análisis será de gran ayuda para el CIO que realizará cada uno de los elementos ópticos de MEGARA, ya que además de las tolerancias propuestas por Sánchez-Blanco (2011) se contará con más criterios para manejar cada uno de los elementos.

### **5.1. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Utilizar ZEMAX para realizar un análisis de tolerancias inverso en el diseño preliminar de MEGARA, del cual se obtendrán conclusiones acerca de cada parámetro de cada lente.
- Determinar los parámetros más críticos en el sistema
- Realizar un ajuste de las tolerancias.
- Estudiar el comportamiento de los parámetros en las distintas configuraciones.

### **5.2. DESARROLLO**

Para este análisis se usaron las mismas cuatro configuraciones representativas de todas las configuraciones posibles de MEGARA: LR, HR, MR\_R y MR\_B. Los campos de visión también se mantienen: -50, -30, 0, 30, 50 mm a lo largo de la rendija.

Lo primero que se debe realizar en este análisis es separar las tolerancias como anteriormente se propuso: tolerancias de fabricación y tolerancias de alineación, además de separar las del colimador y de la cámara. En este tipo de análisis no se tomarán en cuenta las tolerancias de errores desconocidos ya que son errores sistemáticos no involucrados directamente con los elementos del sistema sino con los instrumentos utilizados para las mediciones de los parámetros.

Las tolerancias utilizadas en las tablas 4.1 a 4.5 se deben relajar primero ya que como se explica anteriormente, el software utilizado sólo ajusta las tolerancias que están por debajo del desempeño esperado.

Las tolerancias del colimador son bastante nobles, por lo que se pueden trabajar en conjunto, justo como se trabajaron en las secciones anteriores, no así las de la cámara, ya que esa parte del sistema es más compleja y más sensible a cambios en los parámetros. En ésta se tuvieron que trabajar diferentes tolerancias por separado para que la función de mérito no sufriera cambios tan drásticos en el desempeño final que se mide con las simulaciones MC y así obtener resultados que se pudieran interpretar.

Después se ingresa un límite o un incremento máximo de la función de mérito para que se puedan ajustar las tolerancias, ya relajadas, al desempeño deseado. Se usa el valor de incremento de la MF original y se limita a un valor máximo de 0.0001 mayor que el valor nominal en casi todos los casos, hubo excepciones en las que se ajustan más las tolerancias y se reduce el incremento a 0.00005, se hará hincapié cuando esto suceda.

Finalmente, se realizan pruebas MC con las tolerancias reajustadas para obtener un valor probable del desempeño total del sistema como se hizo en los casos anteriores, esta vez sólo se utilizan 100 muestras para un obtener un resultado rápido.

Al terminar las simulaciones de cada una de las cuatro configuraciones se extrajo la información competente y se redujo a tablas en las que aparecen los cambios de la función de mérito al modificar las tolerancias.

Como se menciona anteriormente el objetivo de estas simulaciones es proveer de información adicional al proceso de manufactura, de aquí se sabrá qué parámetros son más sensibles en cada elemento, qué tolerancias se pueden dejar más holgadas y en qué tolerancias se debería tener más cuidado. También se expresan detalles de cada uno de los elementos del sistema óptico del espectrógrafo.

### **5.3. RESULTADOS**

A continuación se expone un ejemplo de como se obtienen los datos en ZEMAX y después se presentan tablas organizadas para parámetro del sistema. Se usa un límite de cambio de la función de mérito de un orden menor al valor total promedio del valor nominal en las cuatro configuraciones.

Se implementará una notación diferente a las de los capítulos anteriores para distinguir mejor cada una de las superficies de los elementos. Números de un dígito se

## Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

usarán para denotar el número de elemento del colimador o la cámara, un elemento se compone de dos superficies. Para denotar superficies se usará el punto decimal, por ejemplo, la superficie dos del primer elemento se expresaría así: 1.2. Los dobletes tienen 3 superficies ya que van cementados. Para las tolerancias de alineación se utilizan las notaciones de S para lentes simples y D para dobletes seguidos por el número de componente, en la fig. 5.1 se expresa de manera gráfica.

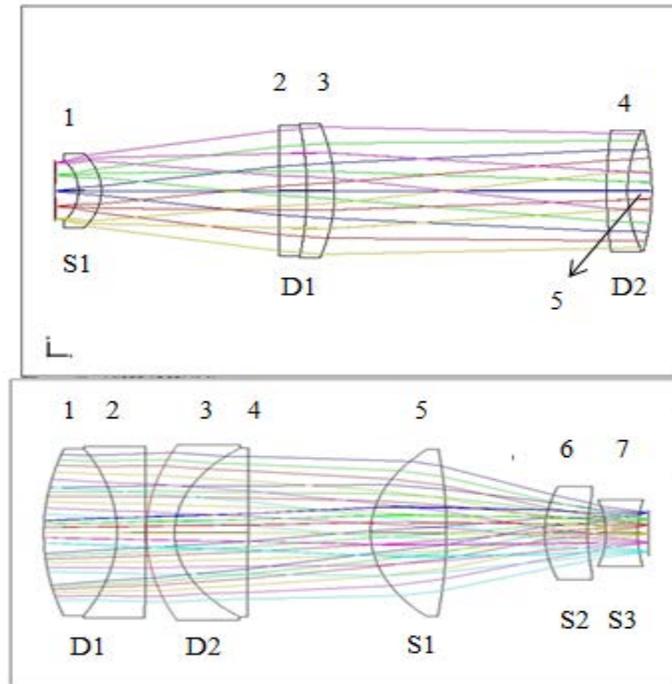


Figura 5.1: Notación utilizada en este capítulo, se enumeran los elementos de izquierda a derecha, para las tolerancias de alineación se usan las notaciones que están por debajo de los esquemas. Arriba: el colimador, debajo: la cámara.

### 5.3.1. Tolerancias de manufactura del colimador

Nemotécnica:

- TRAD: Tolerancia en radio de curvatura.
- TTHI: Tolerancia en espesor.
- TSTX: Tolerancia en inclinación de la superficie en x (grados).

- TSTY: Tolerancia en inclinación de la superficie en y (grados).
- TIRR: Tolerancia en irregularidad (franjas).
- TPAR: Tolerancia en algún parametro definido.
- TIND: Tolerancia en índice de refracción Nd.
- TETX: Tolerancia en inclinación del elemento en x (grados).
- TETY: Tolerancia en inclinación del elemento en y (grados).

**5.3.1.1. Baja Resolución (LR)**

Worst offenders:

Type		Value	Criterion	Change
TIND	8	-0.00033806	0.01135794	1.0000E-004
TRAD	9	-1.39002980	0.01135794	1.0000E-004
TSTX	9	0.08949915	0.01135794	1.0000E-004
TSTX	6	0.03857287	0.01135794	1.0000E-004
TETX	2 2	-0.03240927	0.01135794	1.0000E-004
TSTX	7	-0.02431352	0.01135794	9.9999E-005
TSTX	8	0.03656987	0.01135794	9.9999E-005
TSTX	3	0.02537775	0.01135794	9.9999E-005
TTHI	2 3	-0.15805615	0.01135794	9.9999E-005
TSTY	7	0.05594640	0.01135794	9.9998E-005
TSTY	7	-0.05594640	0.01135794	9.9998E-005
TSTY	8	-0.05528899	0.01135794	9.9998E-005
TSTY	8	0.05528899	0.01135794	9.9998E-005
TRAD	2	-0.53554547	0.01135794	9.9998E-005
TRAD	3	0.51185859	0.01135794	9.9998E-005
TRAD	2	0.21819031	0.01135794	9.9997E-005
TRAD	6	-5.67301544	0.01135794	9.9997E-005
TSTY	6	-0.05158883	0.01135794	9.9997E-005
TSTY	6	0.05158883	0.01135794	9.9997E-005
TRAD	6	2.40703291	0.01135794	9.9997E-005
TSTX	9	-0.07814631	0.01135794	9.9997E-005
TSTY	4	0.03022001	0.01135793	9.9996E-005
TSTY	4	-0.03022001	0.01135793	9.9996E-005
TSTX	4	-0.02703833	0.01135793	9.9996E-005
TSTY	3	0.07813178	0.01135793	9.9996E-005
TSTY	3	-0.07813178	0.01135793	9.9996E-005
TRAD	3	-0.16733607	0.01135793	9.9995E-005
TSTY	9	-0.03879511	0.01135793	9.9995E-005
TSTY	9	0.03879511	0.01135793	9.9995E-005
TRAD	7	5.12567775	0.01135793	9.9995E-005
TRAD	5	8.00000000	0.01135163	9.3688E-005

**Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias**

TPAR	2	1	-1.1120E-005	0.01132927	7.1335E-005
TRAD	8		-2.00000000	0.01132252	6.4583E-005
TRAD	8		2.00000000	0.01132202	6.4081E-005
TETY	2	2	0.09200000	0.01131358	5.5638E-005
TETY	2	2	-0.09200000	0.01131358	5.5638E-005
TSTX	8		-0.09200000	0.01130988	5.1939E-005
TIRR	7		-8.00000000	0.01130618	4.8238E-005
TTHI	5	6	-0.60000000	0.01130477	4.6831E-005
TTHI	4	6	-0.60000000	0.01129784	3.9903E-005
TIND	7		0.00040000	0.01129773	3.9793E-005
TIRR	9		8.00000000	0.01129221	3.4276E-005
TSTX	4		0.09200000	0.01128579	2.7848E-005
TPAR	2	2	-3.0800E-009	0.01128358	2.5645E-005
TTHI	8	9	-0.60000000	0.01128086	2.2918E-005
TTHI	7	9	-0.60000000	0.01127938	2.1438E-005
TPAR	2	3	8.5600E-013	0.01127383	1.5893E-005
TIRR	6		-8.00000000	0.01127024	1.2305E-005
TIRR	4		8.00000000	0.01126973	1.1793E-005
TSTX	5		0.09200000	0.01126669	8.7500E-006
TIND	2		-0.00040000	0.01126183	3.8882E-006
TPAR	2	2	3.0800E-009	0.01125931	1.3711E-006
TIND	4		0.00040000	0.01125878	8.4438E-007
TIND	5		-0.00040000	0.01125874	7.9952E-007
TIRR	3		8.00000000	0.01125855	6.1104E-007
TSTY	5		0.09200000	0.01125806	1.2409E-007
TSTY	5		-0.09200000	0.01125806	1.2409E-007
TRAD	4		-20.00000000	0.01125794	-3.5562E-015
TRAD	4		20.00000000	0.01125794	-3.5562E-015
TIND	4		-0.00040000	0.01125738	-5.5708E-007
TIRR	3		-8.00000000	0.01125736	-5.7540E-007
TIND	5		0.00040000	0.01125716	-7.8106E-007
TIND	2		0.00040000	0.01125413	-3.8057E-006
TIRR	6		8.00000000	0.01125304	-4.9002E-006
TIRR	7		8.00000000	0.01125291	-5.0289E-006
TPAR	2	3	-8.5600E-013	0.01125148	-6.4599E-006
TIRR	4		-8.00000000	0.01125090	-7.0390E-006
TSTX	5		-0.09200000	0.01124933	-8.6047E-006
TIRR	9		-8.00000000	0.01124825	-9.6920E-006
TTHI	2	3	0.60000000	0.01124108	-1.6855E-005

Elemento	Tolerancia de espesor (mm)	Cambio en la MF
1	±0.16	1e-4
2	±0.6	4.0e-5
3	±0.6	4.7e-5
4	±0.6	2.1e-5
5	±0.6	2.3e-5

Tabla 5.1: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de espesor por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de índice de refracción	Cambio en la MF
1	$\pm 4e-4$	$3.9e-6$
2	$\pm 4e-4$	$8.4e-7$
3	$\pm 4e-4$	$8e-7$
4	$\pm 4e-4$	$4e-5$
5	$\pm 3.4e-4$	$1e-4$

Tabla 5.2: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de índice de refracción por elemento del colimador.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje X (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	$\pm 1.9$	$1e-4$
1.2	$\pm 1.5$	$1e-4$
2.1	$\pm 1.6$	$1e-4$
2.2	$\pm 5.5$	$8.8e-6$
2.3	$\pm 2.3$	$1e-4$
3.1	$\pm 1.5$	$1e-4$
3.2	$\pm 4.7$	$1e-4$
3.3	$\pm 2.2$	$1e-4$

Tabla 5.3: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de cuña en el eje X por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje Y (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	$\pm 5.5$	$5.6e-5$
1.2	$\pm 4.7$	$1e-4$
2.1	$\pm 1.8$	$1e-4$
2.2	$\pm 5.5$	$1.2e-7$
2.3	$\pm 3.1$	$1e-4$
3.1	$\pm 3.4$	$1e-4$
3.2	$\pm 3.3$	$1e-4$
3.3	$\pm 2.3$	$1e-4$

Tablas 5.4: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de cuña en el eje Y por superficie del colimador.

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Superficie	Tolerancia de radio de curvatura (mm)	Cambio en la MF
1.1	$\pm 0.22$	1e-4
1.2	$\pm 0.17$	1e-4
2.1	Plano	
2.2	$\pm 8$	9.4e-6
2.3	$\pm 2.4$	1e-4
3.1	$\pm 5.1$	1e-4
3.2	$\pm 2.0$	6.4e-5
3.3	$\pm 1.4$	3.5e-5

Tabla 5.5: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de radio de curvatura por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de irregularidad (franjas)	Cambio en la MF
1.1		1e-4
1.2	8	6.1e-7
2.1	8	1.2e-5
2.2		9.3e-6
2.3	8	1.2e-5
3.1	8	4.8e-5
3.2		1e-4
3.3	8	3.4e-5

Tabla 5.6: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de irregularidad por superficie del colimador.

Coefficiente de asfericidad	Tolerancia del coeficiente	Cambio en la MF
$R^2$	$\pm 1.12e-5$	7.1e-5
$R^4$	$\pm 3.08e-9$	2.6e-5
$R^6$	$\pm 8.56e-13$	1.5e-5

Tabla 5.7: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador.

5.3.1.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)

Elemento	Tolerancia de espesor (mm)	Cambio en la MF
1	±0.16	1e-4
2	±0.6	7.2e-6
3	±0.6	4.4e-6
4	±0.6	2.9e-6
5	±0.6	1.5e-5

Tabla 5.8: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de espesor por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de índice de refracción	Cambio en la MF
1	±4e-4	4e-6
2	±4e-4	6.7e-6
3	±4e-4	2.4e-6
4	±4e-4	6e-5
5	±3.7e-4	1e-4

Tabla 5.9: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de índice de refracción por elemento del colimador.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje X (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±4.3	1e-4
1.2	±3.4	1e-4
2.1	±1.7	1e-4
2.2	±5.5	6.1e-6
2.3	±2.5	1e-4
3.1	±1.9	1e-4
3.2	±2.4	1e-4
3.3	±2.6	1e-4

Tabla 5.10: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de cuña en el eje X por superficie del colimador.

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Superficie	Tolerancia de cuña en eje Y (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±5.5	8.6e-5
1.2	±3.8	1e-4
2.1	±1.5	1e-4
2.2	±5.5	3.3e-7
2.3	±2.5	1e-4
3.1	±2.8	1e-4
3.2	±2.7	1e-4
3.3	±2	1e-4

Tabla 5.11: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de cuña en el eje Y por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de radio de curvatura (mm)	Cambio en la MF
1.1	±0.22	1e-4
1.2	±0.35	1e-4
2.1	Plano	
2.2	±8	4.2e-5
2.3	±2.8	1e-4
3.1	±4.5	1e-4
3.2	±0.68	1e-4
3.3	±2.4	9e-5

Tabla 5.12: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de radio de curvatura por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de irregularidad (franjas)	Cambio en la MF
1.1		
1.2	8	8.3e-7
2.1	8	1.2e-5
2.2		
2.3	8	1.4e-5
3.1	8	6e-5
3.2		
3.3	8	4e-5

Tabla 5.13: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de irregularidad por superficie del colimador.

Coefficiente de asfericidad	Tolerancia del coeficiente	Cambio en la MF
R <sup>2</sup>	±1.12e-5	5.5e-5
R <sup>4</sup>	±3.08e-9	3.6e-5
R <sup>6</sup>	±8.56e-13	7.7e-6

Tabla 5.14: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador.

### 5.3.1.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)

Elemento	Tolerancia de espesor (mm)	Cambio en la MF
1	±0.2	1e-4
2	±0.6	2.3e-5
3	±0.6	2.3e-5
4	±0.6	2.2e-5
5	±0.6	6.4e-6

Tabla 5.15: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de espesor por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de índice de refracción	Cambio en la MF
1	±4e-4	3e-6
2	±4e-4	1.8e-6
3	±4e-4	6.2e-7
4	±4e-4	2.6e-5
5	±3.7e-4	1.9e-5

Tabla 5.16: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de índice de refracción por elemento del colimador.

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Superficie	Tolerancia de cuña en eje x (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±1.6	1e-4
1.2	±1.2	1e-4
2.1	±2.3	1e-4
2.2	±5.5	8.4e-8
2.3	±2.2	1e-4
3.1	±1.8	1e-4
3.2	±3.4	1e-4
3.3	±3	1e-4

Tabla 5.17: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de cuña en el eje X por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje y (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±5.5	5.1e-5
1.2	±4.8	1e-4
2.1	±1.7	1e-4
2.2	±5.5	8.4e-8
2.3	±3	1e-4
3.1	±3.2	1e-4
3.2	±3.2	1e-4
3.3	±2.2	1e-4

Tabla 5.18: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de cuña en el eje Y por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de radio de curvatura (mm)	Cambio en la MF
1.1	±0.27	1e-4
1.2	±0.20	1e-4
2.1	Plano	
2.2	±8	5.4e-6
2.3	±2.1	1e-4
3.1	±11.1	1e-4
3.2	±0.85	1e-4
3.3	±2.4	5.7e-5

Tabla 5.19: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de radio de curvatura por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de irregularidad (franjas)	Cambio en la MF
1.1		
1.2	8	3e-7
2.1	8	1.6e-5
2.2		
2.3	8	1.9e-5
3.1	8	8e-5
3.2		
3.3	8	6e-5

Tabla 5.20: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de irregularidad por superficie del colimador.

Coefficiente de asfericidad	Tolerancia del coeficiente	Cambio en la MF
R <sup>2</sup>	±1.12e-5	5.7e-5
R <sup>4</sup>	±3.08e-9	2.9e-5
R <sup>6</sup>	±8.56e-13	3.3e-5

Tabla 5.21: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador.

#### 5.3.1.4. Alta Resolución (HR)

Elemento	Tolerancia de Espesor (mm)	Cambio en la MF
1	±0.3	1e-4
2	±0.6	2.8e-5
3	±0.6	2.7e-5
4	±0.6	2.2e-5
5	±0.6	5.2e-6

Tabla 5.22: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de espesor por elemento del colimador.

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Elemento	Tolerancia de índice de refracción	Cambio en la MF
1	$\pm 4e-4$	$7.5e-7$
2	$\pm 4e-4$	$9.5e-7$
3	$\pm 4e-4$	$9.4e-7$
4	$\pm 4e-4$	$5.2e-5$
5	$\pm 4e-4$	$6.2e-5$

Tabla 5.23: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de índice de refracción por elemento del colimador.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje X (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	$\pm 2.7$	$1e-4$
1.2	$\pm 2$	$1e-4$
2.1	$\pm 3.2$	$1e-4$
2.2	$\pm 5.5$	$1.9e-6$
2.3	$\pm 5.5$	$3.6e-5$
3.1	$\pm 3.5$	$1e-4$
3.2	$\pm 4.7$	$1e-4$
3.3	$\pm 2.2$	$1e-4$

Tabla 5.24: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de cuña en el eje X por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje Y (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	$\pm 5.5$	$3.5e-5$
1.2	$\pm 5.5$	$1e-4$
2.1	$\pm 1.9$	$1e-4$
2.2	$\pm 5.5$	$5.2e-8$
2.3	$\pm 3.4$	$1e-4$
3.1	$\pm 3.5$	$1e-4$
3.2	$\pm 3.5$	$1e-4$
3.3	$\pm 2.4$	$1e-4$

Tabla 5.25: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de cuña en el eje Y por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de radio de curvatura (mm)	Cambio en la MF
1.1	±0.30	1e-4
1.2	±0.26	1e-4
2.1	Plano	
2.2	±8	9.3e-6
2.3	±4	1e-4
3.1	±6.7	1e-4
3.2	±0.62	1e-4
3.3	±2.4	3.5e-5

Tabla 5.26: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de radio de curvatura por superficie del colimador.

Superficie	Tolerancia de irregularidad (franjas)	Cambio en la MF
1.1		
1.2	8	6.2e-7
2.1	8	2.2e-5
2.2		
2.3	8	2.6e-5
3.1	7.5	1e-4
3.2		
3.3	8	8.5e-5

Tabla 5.27: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de irregularidad por superficie del colimador.

Coefficiente de asfericidad	Tolerancia del coeficiente	Cambio en la MF
$R^2$	±1.12e-5	4.1e-5
$R^4$	±3.08e-9	1.4e-5
$R^6$	±8.56e-13	7.9e-6

Tabla 5.28: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR de los coeficientes de asfericidad de la primera superficie del colimador.

### 5.3.2. Tolerancias de alineación del colimador

Nemotécnica:

- TEDX: Tolerancia en descentrado del elemento en x.
- TEDY: Tolerancia en descentrado del elemento en y.

**Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias**

- TETX: Tolerancia en inclinación del elemento en x (grados).
- TETY: Tolerancia en inclinación del elemento en y (grados).

**5.3.2.1. Baja Resolución (LR)**

Worst offenders:

Type			Value	Criterion	Change
TEDY	2	3	-0.30000000	0.22812309	0.21686515
TETX	2	3	-0.03300000	0.22656749	0.21530955
TEDX	2	3	0.20000000	0.22449176	0.21323382
TEDX	2	3	-0.20000000	0.22449176	0.21323382
TETY	2	3	0.03300000	0.22415965	0.21290171
TETY	2	3	-0.03300000	0.22415965	0.21290171
TETX	2	3	0.03300000	0.22170050	0.21044257
TEDY	2	3	0.30000000	0.22017219	0.20891425
TEDY	7	9	-0.45976854	0.01135794	9.9999E-005
TETY	7	9	-0.03965914	0.01135794	9.9998E-005
TETY	7	9	0.03965914	0.01135794	9.9998E-005
TEDY	4	6	0.25504248	0.01135794	9.9998E-005
TEDX	4	6	-0.34548843	0.01135794	9.9998E-005
TEDX	4	6	0.34548843	0.01135794	9.9998E-005
TEDX	7	9	0.57318192	0.01135794	9.9998E-005
TEDX	7	9	-0.57318192	0.01135794	9.9998E-005
TETY	4	6	0.05565452	0.01135794	9.9997E-005
TETY	4	6	-0.05565452	0.01135794	9.9997E-005
TETX	4	6	-0.05889950	0.01135793	9.9996E-005
TETX	7	9	-0.04168550	0.01135793	9.9995E-005
TETX	4	6	0.10000000	0.01129675	3.8808E-005
TETX	7	9	0.10000000	0.01127741	1.9469E-005
TEDY	7	9	1.00000000	0.01126209	4.1474E-006
TEDY	4	6	-1.00000000	0.01110020	-0.00015773

Elemento	Tolerancia de inclinación en X (arcmin)	Cambio en la MF
S1	±2	0.22
D1	±3.5	1e-4
D2	±2.5	1e-4

Tabla 5.29: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de inclinación en X por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de inclinación en Y (arcmin)	Cambio en la MF
S1	±2	0.21
D1	±3.3	1e-4
D2	±2.5	1e-4

Tabla 5.30: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de inclinación en Y por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de descentrado en X (mm)	Cambio en la MF
S1	±0.2	0.21
D1	±0.34	1e-4
D2	±0.57	1e-4

Tabla 5.31: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de descentrado en X por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de descentrado en Y (mm)	Cambio en la MF
S1	±0.3	0.22
D1	±0.26	1e-4
D2	±0.46	1e-4

Tabla 5.32: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de descentrado en Y por elemento del colimador.

### 5.3.2.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)

Elemento	Tolerancia de inclinación en X (arcmin)	Cambio en la MF
S1	±2	0.12
D1	±3.4	1e-4
D2	±3.3	1e-4

Tabla 5.33: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de inclinación en X por elemento del colimador.

**Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias**

Elemento	Tolerancia de inclinación en Y (arcmin)	Cambio en la MF
S1	±2	0.12
D1	±2.7	1e-4
D2	±2	1e-4

Tabla 5.34: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de inclinación en Y por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de descentrado en X (mm)	Cambio en la MF
S1	±0.2	0.12
D1	±0.28	1e-4
D2	±0.46	1e-4

Tabla 5.35: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de descentrado en X por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de descentrado en Y (mm)	Cambio en la MF
S1	±0.3	0.12
D1	±0.28	1e-4
D2	±0.5	1e-4

Tabla 5.36: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de descentrado en Y por elemento del colimador.

**5.3.2.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)**

Elemento	Tolerancia de inclinación en X (arcmin)	Cambio en la MF
S1	±2	0.21
D1	±3.8	1e-4
D2	±1.4	1e-4

Tabla 5.37: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de inclinación en X por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de inclinación en Y (arcmin)	Cambio en la MF
S1	±2	0.21
D1	±3.2	1e-4
D2	±2.2	1e-4

Tabla 5.38: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de inclinación en Y por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de descentrado en X (mm)	Cambio en la MF
S1	±0.2	0.21
D1	±0.33	1e-4
D2	±0.54	1e-4

Tabla 5.39: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de descentrado en X por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de descentrado en Y (mm)	Cambio en la MF
S1	±0.3	0.21
D1	±0.25	1e-4
D2	±0.63	1e-4

Tabla 5.40: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de descentrado en Y por elemento del colimador.

#### 5.3.2.4. Alta Resolución (HR)

Elemento	Tolerancia de inclinación en X (arcmin)	Cambio en la MF
S1	±2	0.12
D1	±4.1	1e-4
D2	±1.8	1e-4

Tabla 5.41: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de inclinación en X por elemento del colimador.

### Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

Elemento	Tolerancia de inclinación en Y (arcmin)	Cambio en la MF
S1	$\pm 2$	0.12
D1	$\pm 3.5$	1e-4
D2	$\pm 2.5$	1e-4

Tabla 5.42: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de inclinación en Y por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de descentrado en X (mm)	Cambio en la MF
S1	$\pm 0.2$	0.12
D1	$\pm 0.38$	1e-4
D2	$\pm 0.6$	1e-4

Tabla 5.43: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de descentrado en X por elemento del colimador.

Elemento	Tolerancia de descentrado en Y (mm)	Cambio en la MF
S1	$\pm 0.3$	0.12
D1	$\pm 1.0$	9.3e-5
D2	$\pm 0.52$	1e-4

Tabla 5.44: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de descentrado en Y por elemento del colimador.

#### 5.3.3. Tolerancias de manufactura de la cámara

Nemotécnica:

- TRAD: Tolerancia en radio de curvatura.
- TTHI: Tolerancia en espesor.
- TSTX: Tolerancia en inclinación de la superficie en x (grados).
- TSTY: Tolerancia en inclinación de la superficie en y (grados).
- TIRR: Tolerancia en irregularidad (franjas).
- TIND: Tolerancia en índice de refracción Nd.

Compensador: Espesor 27, Min = -2.0, Max = 2.0

Compensador: Espesor 37, Min = -10.0, Max = 10.0

Compensador: Parámetro 1 en la superficie 28, Min = -1.0, Max = 1.0

Compensador: Parámetro 1 en la superficie 28, Min = -1.0, Max = 1.0

Los parámetros 1 y 2 utilizados en esta simulación como compensadores son el descentrado en x y en y del elemento 28 del editor de ZEMAX que es el primer lente simple de la cámara.

### 5.3.3.1. Baja Resolución (LR)

Type		Value	Criterion	Change
TRAD	33	0.14927229	0.01093171	1.0000E-004
TSTX	29	0.04811984	0.01093171	1.0000E-004
TSTX	23	-0.00707614	0.01093171	1.0000E-004
TSTX	27	0.02254471	0.01093171	1.0000E-004
TSTX	35	0.00901304	0.01093171	1.0000E-004
TSTX	24	0.01807623	0.01093171	1.0000E-004
TSTX	26	0.01404816	0.01093171	1.0000E-004
TTHI	25 27	-0.22763997	0.01093171	1.0000E-004
TRAD	29	-0.06373886	0.01093171	9.9999E-005
TTHI	29 32	0.08908837	0.01093171	9.9999E-005
TTHI	33 34	0.07212002	0.01093171	9.9999E-005
TSTY	34	-0.04420551	0.01093171	9.9999E-005
TSTY	34	0.04420550	0.01093171	9.9999E-005
TSTY	36	-0.08812255	0.01093171	9.9998E-005
TSTY	36	0.08812254	0.01093171	9.9998E-005
TSTX	25	0.05090331	0.01093171	9.9998E-005
TRAD	26	0.11279086	0.01093171	9.9998E-005
TRAD	35	-0.18660968	0.01093171	9.9998E-005
TRAD	25	0.11867465	0.01093171	9.9998E-005
TSTX	33	-0.03609273	0.01093171	9.9998E-005
TRAD	22	0.52449897	0.01093171	9.9998E-005
TSTY	25	0.05883591	0.01093171	9.9998E-005
TSTY	25	-0.05883591	0.01093171	9.9998E-005
TRAD	25	-0.25537900	0.01093171	9.9998E-005
TSTY	27	-0.05704693	0.01093171	9.9997E-005
TSTY	27	0.05704693	0.01093171	9.9997E-005
TTHI	29 32	-0.17311478	0.01093171	9.9997E-005
TRAD	26	-0.03654620	0.01093171	9.9997E-005
TRAD	29	0.04227589	0.01093171	9.9997E-005
TSTX	22	0.03707144	0.01093171	9.9997E-005
TSTX	25	-0.06139220	0.01093171	9.9996E-005
TSTY	35	-0.07586348	0.01093171	9.9996E-005

**Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias**

TSTX	34		-0.01867616	0.01093171	9.9996E-005
TSTY	35		0.07586347	0.01093171	9.9996E-005
TSTY	22		0.09372203	0.01093171	9.9996E-005
TSTY	22		-0.09372203	0.01093171	9.9996E-005
TRAD	23		0.17765761	0.01093171	9.9996E-005
TSTX	36		-0.01255298	0.01093171	9.9996E-005
TTHI	33	34	-0.13997863	0.01093171	9.9995E-005
TTHI	35	36	-0.10287022	0.01093171	9.9995E-005
TSTX	33		0.02898102	0.01093171	9.9995E-005
TSTY	23		-0.03710281	0.01093171	9.9995E-005
TSTY	23		0.03710281	0.01093171	9.9995E-005
TSTY	33		0.03179882	0.01093171	9.9995E-005
TSTY	24		0.07419297	0.01093171	9.9995E-005
TSTY	24		-0.07419297	0.01093171	9.9995E-005
TSTY	33		-0.03179882	0.01093171	9.9995E-005
TIND	26		-0.00010000	0.01091722	8.5511E-005
TSTY	26		-0.10000000	0.01089886	6.7151E-005
TSTY	26		0.10000000	0.01089886	6.7151E-005
TIND	29		-0.00010000	0.01089459	6.2874E-005
TIND	22		-0.00010000	0.01088394	5.2227E-005
TIND	25		0.00010000	0.01088184	5.0124E-005
TRAD	34		-0.60000000	0.01088044	4.8724E-005
TSTX	34		0.10000000	0.01087042	3.8710E-005
TRAD	30		-0.60000000	0.01086999	3.8282E-005
TIND	23		0.00010000	0.01086787	3.6160E-005
TRAD	36		0.60000000	0.01086275	3.1038E-005
TRAD	23		-0.60000000	0.01086245	3.0740E-005
TTHI	23	24	0.50000000	0.01085922	2.7506E-005
TTHI	22	24	0.50000000	0.01085520	2.3491E-005
TSTY	29		-0.10000000	0.01084951	1.7794E-005
TSTY	29		0.10000000	0.01084951	1.7794E-005
TIRR	24		2.00000000	0.01084561	1.3902E-005
TIRR	25		-2.00000000	0.01084310	1.1386E-005
TIRR	22		-2.00000000	0.01084139	9.6804E-006
TTHI	26	27	-0.50000000	0.01084020	8.4891E-006
TIRR	27		2.00000000	0.01083992	8.2039E-006
TIRR	35		2.00000000	0.01083875	7.0421E-006
TIND	33		-0.00010000	0.01083688	5.1719E-006

Elemento	Tolerancia de Espesor (mm)	Cambio en la MF
1	±0.5	2.3e-5
2	±0.5	2.8e-5
3	±0.2	1e-4
4	±0.5	8.5e-6
5	±0.09	1e-4
6	±0.07	1e-4
7	±0.1	1e-4

Tabla 5.45: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de espesor por elemento de la cámara.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje x (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±2.2	1e-4
1.2	±0.4	1e-4
1.3	±1	1e-4
2.1	±3	1e-4
2.2	±0.8	1e-4
2.3	±1.4	1e-4
3.1	±2.9	1e-4
3.2		
4.1	±1.7	1e-4
4.2	±1.1	1e-4
5.1	±0.5	1e-4
5.2	±0.8	1e-4

Tabla 5.46: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de cuña en el eje X por superficie de la cámara.

**Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias**

Superficie	Tolerancia de cuña en eje y (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±5.6	1e-4
1.2	±2.2	1e-4
1.3	±4.5	1e-4
2.1	±3.5	1e-4
2.2	±6	6.7e-5
2.3	±3.4	1e-4
3.1	±6	1.8e-5
3.2		
4.1	±1.9	1e-4
4.2	±2.6	1e-4
5.1	±4.6	1e-4
5.2	±5.3	1e-4

Tabla 5.47: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de cuña en el eje Y por superficie de la cámara.

Superficie	Tolerancia de radio de curvatura (mm)	Cambio en la MF
1.1	±0.52	1e-4
1.2	±0.18	1e-4
1.3	Plano	1e-4
2.1	±0.12	1e-4
2.2	±0.04	1e-4
2.3	Plano	1e-4
3.1	±0.04	1e-4
3.2	±6	3.8e-5
4.1	±0.15	1e-4
4.2	±0.6	4.8e-5
5.1	±0.19	1e-4
5.2	±0.6	3.1e-5

Tabla 5.48: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de radio de curvatura por superficie de la cámara.

**5.3.3.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)**

En esta configuración se obtuvieron cambios grandes en la función de mérito en los MC debido a que el valor nominal es muy pequeño, por tal razón el incremento máximo permisible fue reducido a 5e-5.

Elemento	Tolerancia de Espesor (mm)	Cambio en la MF
1	±0.77	5e-5
2	±0.57	5e-5
3	±0.08	5e-5
4	±1	2.1e-5
5	±0.04	5e-5
6	±0.03	5e-5
7	±0.04	5e-5

Tabla 5.49: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de espesor por elemento de la cámara.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje x (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±3.4	5e-5
1.2	±0.3	5e-5
1.3	±0.6	5e-5
2.1	±0.9	5e-5
2.2	±1	5e-5
2.3	±0.6	5e-5
3.1	±1.9	5e-5
3.2		
4.1	±0.6	5e-5
4.2	±1	5e-5
5.1	±0.7	5e-5
5.2	±1.1	5e-5

Tabla 5.50: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de cuña en el eje X por superficie de la cámara.

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Superficie	Tolerancia de cuña en eje y (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±3.7	5e-5
1.2	±1.2	5e-5
1.3	±2.6	5e-5
2.1	±2.5	5e-5
2.2	±4.1	5e-5
2.3	±2	5e-5
3.1	±6	2.8e-5
3.2		
4.1	±1	5e-5
4.2	±1.4	5e-5
5.1	±2.6	5e-5
5.2	±3	5e-5

Tabla 5.51: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de cuña en el eje Y por superficie de la cámara.

Superficie	Tolerancia de radio de curvatura (mm)	Cambio en la MF
1.1	±0.15	5e-5
1.2	±0.05	5e-5
1.3	Plano	
2.1	±0.04	5e-5
2.2	±0.02	5e-5
2.3	Plano	
3.1	±0.03	5e-5
3.2	±0.64	5e-5
4.1	±0.47	5e-5
4.2	±0.30	5e-5
5.1	±0.11	5e-5
5.2	±1	3.1e-5

Tabla 5.52: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de radio de curvatura por superficie de la cámara.

**5.3.3.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)**

La configuración es muy sensible a variaciones en los radios de curvatura de los elementos de la cámara por lo cual las tolerancias de los mismos no pueden entrar en el análisis inverso.

Después de varias simulaciones se aisló la superficie más sensible, entre todos los radios de curvatura, la #29 del editor de ZEMAX. Dejamos las tolerancias de diseño en los radios de curvatura de la cámara sin cambio para realizar el análisis en esta configuración.

Elemento	Tolerancia de Espesor (mm)	Cambio en la MF
1	±0.58	1e-4
2	±0.83	1e-4
3	±0.09	1e-4
4	±1	2.1e-5
5	±0.02	1e-4
6	±0.03	1e-4
7	±0.15	1e-4

Tabla 5.53: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de espesor por elemento de la cámara.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje x (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±0.85	1e-4
1.2	±1.46	1e-4
1.3	±3.1	1e-4
2.1	±0.6	1e-4
2.2	±3.4	1e-4
2.3	±2.2	1e-4
3.1	±6	5.5e-5
3.2		
4.1	±0.5	1e-4
4.2	±1	1e-4
5.1	±2	1e-4
5.2	±4.4	1e-4

Tabla 5.54: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de cuña en el eje X por superficie de la cámara.

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Superficie	Tolerancia de cuña en eje y (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±5.6	1e-4
1.2	±2	1e-4
1.3	±4	1e-4
2.1	±3.2	1e-4
2.2	±6	5.5e-5
2.3	±3	1e-4
3.1	±6	2.4e-5
3.2		
4.1	±1.7	1e-4
4.2	±2.4	1e-4
5.1	±4.2	1e-4
5.2	±4.8	1e-4

Tabla 5.55: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de cuña en el eje Y por superficie de la cámara.

**5.3.3.4. Alta Resolución (HR)**

Como en el caso anterior, los radios de curvatura no se pueden introducir al análisis debido a la volatilidad reflejada en la función de mérito, es esta configuración se debe tener en cuenta que los elementos son también sensibles al índice de refracción en esta configuración en especial, aunque las tolerancias de este parámetro no sean parte del análisis:

Elemento	Tolerancia de espesor (mm)	Cambio en la MF
1	±0.22	5e-5
2	±0.31	5e-5
3	±0.03	5e-5
4	±1	1.6e-5
5	±0.007	5e-5
6	±0.006	5e-5
7	±0.05	5e-5

Tabla 5.56: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de espesor por elemento de la cámara.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje x (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±0.65	5e-5
1.2	±0.25	5e-5
1.3	±0.64	5e-5
2.1	±0.64	5e-5
2.2	±0.95	5e-5
2.3	±0.51	5e-5
3.1	±1.6	5e-5
3.2		
4.1	±0.33	5e-5
4.2	±0.9	5e-5
5.1	±0.43	5e-5
5.2	±0.76	5e-5

Tabla 5.57: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de cuña en el eje X por superficie de la cámara.

Superficie	Tolerancia de cuña en eje y (arcmin)	Cambio en la MF
1.1	±4.3	5e-5
1.2	±1.5	5e-5
1.3	±3.1	5e-5
2.1	±2.8	5e-5
2.2	±5	5e-5
2.3	±2.3	5e-5
3.1	±6	2.1e-5
3.2		
4.1	±1.3	5e-5
4.2	±1.8	5e-5
5.1	±3.2	5e-5
5.2	±3.6	5e-5

Tabla 5.58: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de cuña en el eje Y por superficie de la cámara.

### 5.3.4. Tolerancias de alineación de la cámara

Nemotécnica:

- TEDX: Tolerancia en descentrado del elemento en x.
- TEDY: Tolerancia en descentrado del elemento en y.

**Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias**

- TETX: Tolerancia en inclinación del elemento en x (grados).
- TETY: Tolerancia en inclinación del elemento en y (grados).

**5.3.4.1. Baja Resolución (LR)**

Worst offenders:

Type			Value	Criterion	Change
TETY	33	34	-0.09819710	0.01092052	1.0000E-004
TETY	33	34	0.09819710	0.01092052	1.0000E-004
TEDY	35	36	0.01665276	0.01092052	1.0000E-004
TETX	29	30	0.00755316	0.01092052	1.0000E-004
TEDX	25	27	0.22526410	0.01092052	9.9999E-005
TEDX	25	27	-0.22526410	0.01092052	9.9999E-005
TETX	35	36	0.03779601	0.01092052	9.9999E-005
TEDY	25	27	-0.03325264	0.01092052	9.9999E-005
TETX	33	34	-0.02205259	0.01092051	9.9999E-005
TEDY	22	24	-0.02545598	0.01092051	9.9998E-005
TEDY	33	34	-0.23181569	0.01092051	9.9998E-005
TEDX	33	34	-0.15113915	0.01092051	9.9998E-005
TEDX	33	34	0.15113915	0.01092051	9.9998E-005
TEDY	33	34	0.09497029	0.01092051	9.9998E-005
TEDX	35	36	-0.13742757	0.01092051	9.9997E-005
TEDX	35	36	0.13742757	0.01092051	9.9997E-005
TEDX	22	24	-0.13739488	0.01092051	9.9997E-005
TEDX	22	24	0.13739488	0.01092051	9.9997E-005
TETX	22	24	-0.03477328	0.01092051	9.9997E-005
TETY	29	30	-0.03754148	0.01092051	9.9996E-005
TETY	29	30	0.03754148	0.01092051	9.9996E-005
TETX	25	27	0.00759852	0.01092051	9.9996E-005
TEDY	22	24	0.74548722	0.01092051	9.9995E-005
TETY	25	27	-0.04196360	0.01092051	9.9995E-005
TETY	25	27	0.04196360	0.01092051	9.9995E-005
TETY	22	24	0.10000000	0.01091836	9.7841E-005
TETY	22	24	-0.10000000	0.01091836	9.7841E-005
TETY	35	36	0.10000000	0.01089114	7.0623E-005
TETY	35	36	-0.10000000	0.01089114	7.0623E-005
TEDY	29	30	1.00000000	0.01082052	2.1902E-011
TEDY	29	30	-1.00000000	0.01082052	2.1784E-011
TEDX	29	30	1.00000000	0.01082052	4.3058E-012
TEDX	29	30	-1.00000000	0.01082052	1.0825E-013
TETX	22	24	0.10000000	0.01067768	-0.00014283
TETX	35	36	-0.10000000	0.01066115	-0.00015937
TETX	33	34	0.10000000	0.01047922	-0.00034130
TETX	29	30	-0.10000000	0.01025445	-0.00056607
TETX	25	27	-0.10000000	0.01002967	-0.00079084
TEDY	25	27	1.00000000	0.00963322	-0.00118730

Elemento	Tolerancia de inclinación en X (arcmin)	Cambio en la MF
D1	±2.1	1e-4
D2	±0.5	1e-4
S1	±0.5	1e-4
S2	±1.3	1e-4
S3	±2.3	1e-4

Tabla 5.59: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de inclinación en X por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de inclinación en Y (arcmin)	Cambio en la MF
D1	±6	9.8e-5
D2	±2.5	1e-4
S1	±2.2	1e-4
S2	±5.9	1e-4
S3	±6	7e-5

Tabla 5.60: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de inclinación en Y por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de descentrado en X (mm)	Cambio en la MF
D1	±0.14	1e-4
D2	±0.22	1e-4
S1	Compensador	
S2	±0.15	1e-4
S3	±0.14	1e-4

Tabla 5.61: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de descentrado en X por elemento de la cámara.

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Elemento	Tolerancia de descentrado en Y (mm)	Cambio en la MF
D1	$\pm 0.025$	1e-4
D2	$\pm 0.033$	1e-4
S1	Compensador	
S2	$\pm 0.1$	1e-4
S3	$\pm 0.017$	1e-4

Tabla 5.62: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en LR del parámetro de descentrado en Y por elemento de la cámara.

**5.3.4.2. Resolución Media en Azul (MR\_B)**

Elemento	Tolerancia de inclinación en X (arcmin)	Cambio en la MF
D1	$\pm 2.2$	1e-4
D2	$\pm 1.0$	1e-4
S1	$\pm 0.7$	1e-4
S2	$\pm 3.0$	1e-4
S3	$\pm 3.4$	1e-4

Tabla 5.63: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de inclinación en X por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de inclinación en Y (arcmin)	Cambio en la MF
D1	$\pm 5.6$	1e-4
D2	$\pm 2.1$	1e-4
S1	$\pm 1.8$	1e-4
S2	$\pm 4.9$	1e-4
S3	$\pm 5.7$	1e-4

Tabla 5.64: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de inclinación en Y por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de descentrado en X (mm)	Cambio en la MF
D1	±0.10	1e-4
D2	±0.22	1e-4
S1	Compensador	
S2	±0.12	1e-4
S3	±0.11	1e-4

Tabla 5.65: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de descentrado en X por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de descentrado en Y (mm)	Cambio en la MF
D1	±0.043	1e-4
D2	±0.033	1e-4
S1	Compensador	
S2	±0.084	1e-4
S3	±0.046	1e-4

Tabla 5.66: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_B del parámetro de descentrado en Y por elemento de la cámara.

#### 5.3.4.3. Resolución Media en Rojo (MR\_R)

Elemento	Tolerancia de inclinación en X (arcmin)	Cambio en la MF
D1	±1.2	1e-4
D2	±0.6	1e-4
S1	±1.6	1e-4
S2	±1.3	1e-4
S3	±2.0	1e-4

Tabla 5.67: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de inclinación en X por elemento de la cámara.

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Elemento	Tolerancia de inclinación en Y (arcmin)	Cambio en la MF
D1	±5.5	1e-4
D2	±2.3	1e-4
S1	±2.0	1e-4
S2	±5.3	1e-4
S3	±6	8.7e-5

Tabla 5.68: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de inclinación en Y por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de descentrado en X (mm)	Cambio en la MF
D1	±0.12	1e-4
D2	±0.24	1e-4
S1	Compensador	
S2	±0.13	1e-4
S3	±0.13	1e-4

Tabla 5.69: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de descentrado en X por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de descentrado en Y (mm)	Cambio en la MF
D1	±0.063	1e-4
D2	±0.060	1e-4
S1	Compensador	
S2	±0.041	1e-4
S3	±0.083	1e-4

Tabla 5.70: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en MR\_R del parámetro de descentrado en Y por elemento de la cámara.

**5.3.4.4. Alta Resolución (LR)**

Elemento	Tolerancia de inclinación en X (arcmin)	Cambio en la MF
D1	±4.5	1e-4
D2	±0.5	1e-4
S1	±0.6	1e-4
S2	±1.2	1e-4
S3	±2.2	1e-4

Tabla 5.71: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de inclinación en X por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de inclinación en Y (arcmin)	Cambio en la MF
D1	±6	8.7e-5
D2	±2.5	1e-4
S1	±2.1	1e-4
S2	±5.8	1e-4
S3	±6	7.9e-5

Tabla 5.72: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de inclinación en Y por elemento de la cámara.

Elemento	Tolerancia de descentrado en X (mm)	Cambio en la MF
D1	±0.13	1e-4
D2	±0.28	1e-4
S1	Compensador	
S2	±0.14	1e-4
S3	±0.14	1e-4

Tabla 5.73: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de descentrado en X por elemento de la cámara.

## Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

Elemento	Tolerancia de descentrado en Y (mm)	Cambio en la MF
D1	$\pm 0.031$	1e-4
D2	$\pm 0.050$	1e-4
S1	Compensador	
S2	$\pm 0.046$	1e-4
S3	$\pm 0.030$	1e-4

Tabla 5.74: Resultados de las simulaciones de análisis inverso en HR del parámetro de descentrado en Y por elemento de la cámara.

### 5.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 5.4.1. Colimador

El análisis de tolerancias inverso de esta parte del sistema se realizó sin problemas ya que no se forma imagen y las tolerancias en los parámetros son más flexibles. Agrupando los datos y después generando gráficas de área se muestran los resultados en las figuras 5.1 a 5.32 para las tolerancias del colimador. Las gráficas presentadas son una comparativa entre las tolerancias que el diseñador propone y las que arroja el análisis inverso. Se utilizan los datos de las tablas presentadas en la sección 5.3. Cabe señalar que se eligieron este tipo de gráficas para identificar de una manera más sencilla las tolerancias que son problemáticas, esto no significa que en el eje X se tenga alguna variable independiente, tampoco significa que exista alguna función continua que describa cierto comportamiento. Originalmente los valores del eje Y son discretos, pero con un fin ilustrativo se eligió sombrear toda el área debajo de los valores de tolerancia.

En azul se encuentra la banda de tolerancias permisible calculado por el software óptico a través de iteraciones con un límite de incremento de la función de mérito de 1e-4 en todos los parámetros del colimador. En rojo con transparencia se observa la banda de tolerancia de cada parámetro proporcionada por Sánchez-Blanco (2011), diseñador de la óptica de MEGARA.

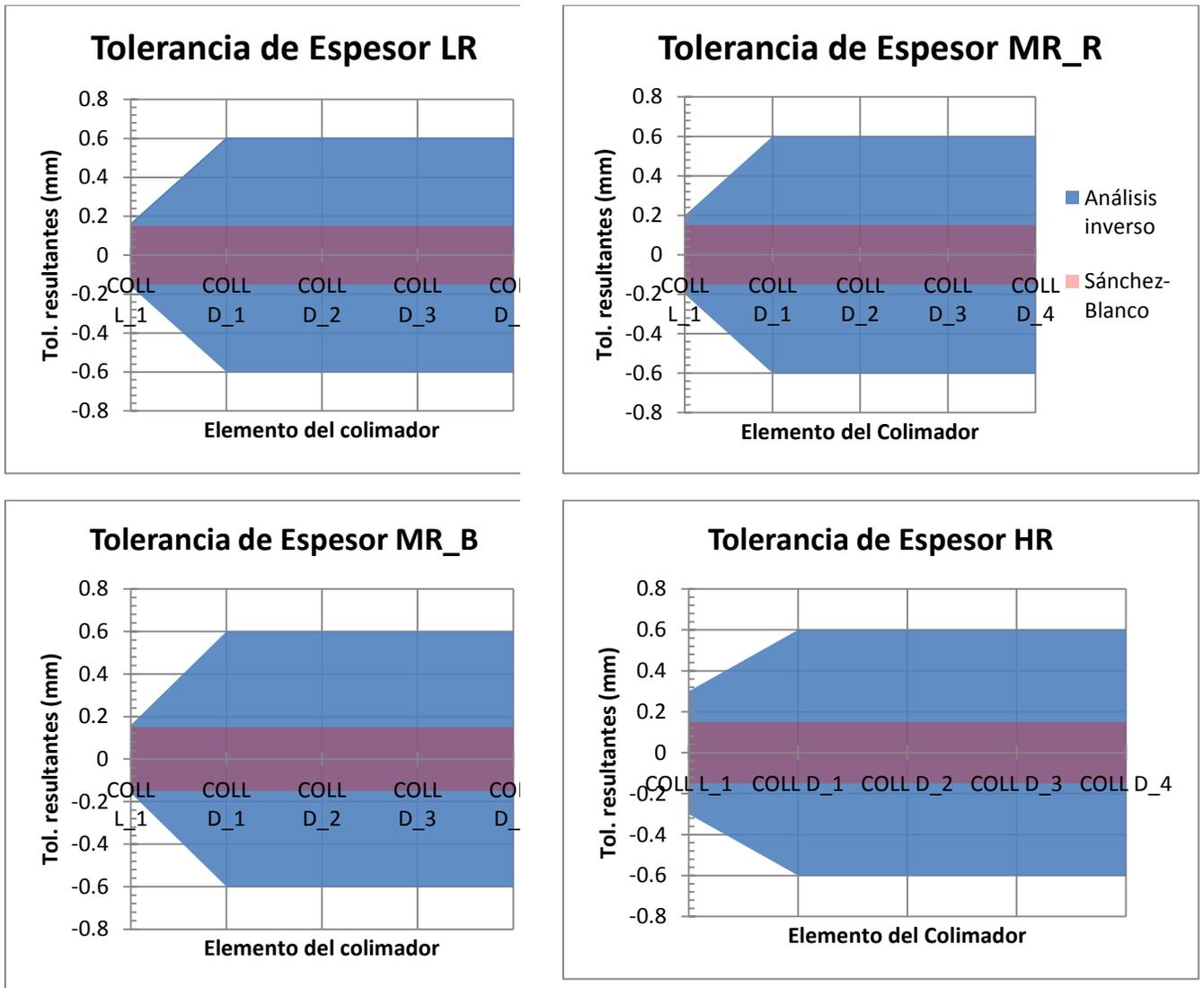


Figura 5.2: Comparativa de las tolerancias de espesor de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones. En azul se muestra el intervalo de tolerancias permisibles obtenidas en el análisis inverso y en rosado transparente el intervalo de tolerancias de diseño propuesto por Sánchez-Blanco (2011).

En la figura 5.2 se puede observar que las tolerancias de espesor para el colimador son demasiado ajustadas si se utilizan las de Sánchez-Blanco (2011), no hay necesidad de cerrar a  $\pm 0.15\text{mm}$ , los dos dobles no muestran problemas al relajar las tolerancias hasta un margen de  $\pm 0.6\text{mm}$ . El lente simple es el más sensible en este caso, tiene un margen de  $\pm 0.16$  en su peor desempeño (LR y MR\_B) el cual es el mismo que de diseño.

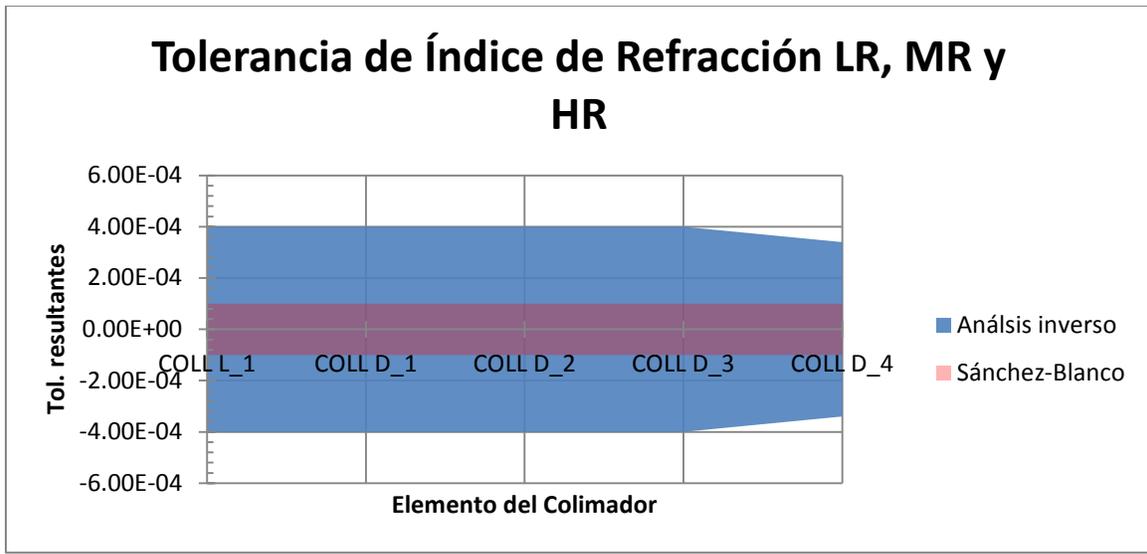


Figura 5.3: Comparativa de las tolerancias de índice de refracción de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones. Las graficas resultantes son similares así que se pueden resumir en esta.

Con respecto a las tolerancias de índice de refracción no hay mucho que hacer ya que no depende los fabricantes del lente sino de los proveedores del material, simplemente se corrobora que con la tolerancia que ellos proporcionan, los elementos del colimador responden de manera óptima. El más sensible resulta ser el último elemento, pero en general se mantiene el desempeño a niveles de  $\pm 4e-4$  lo cual es bastante bueno y se concluye que esta tolerancia no tiene efectos adversos sobre el desempeño del sistema.

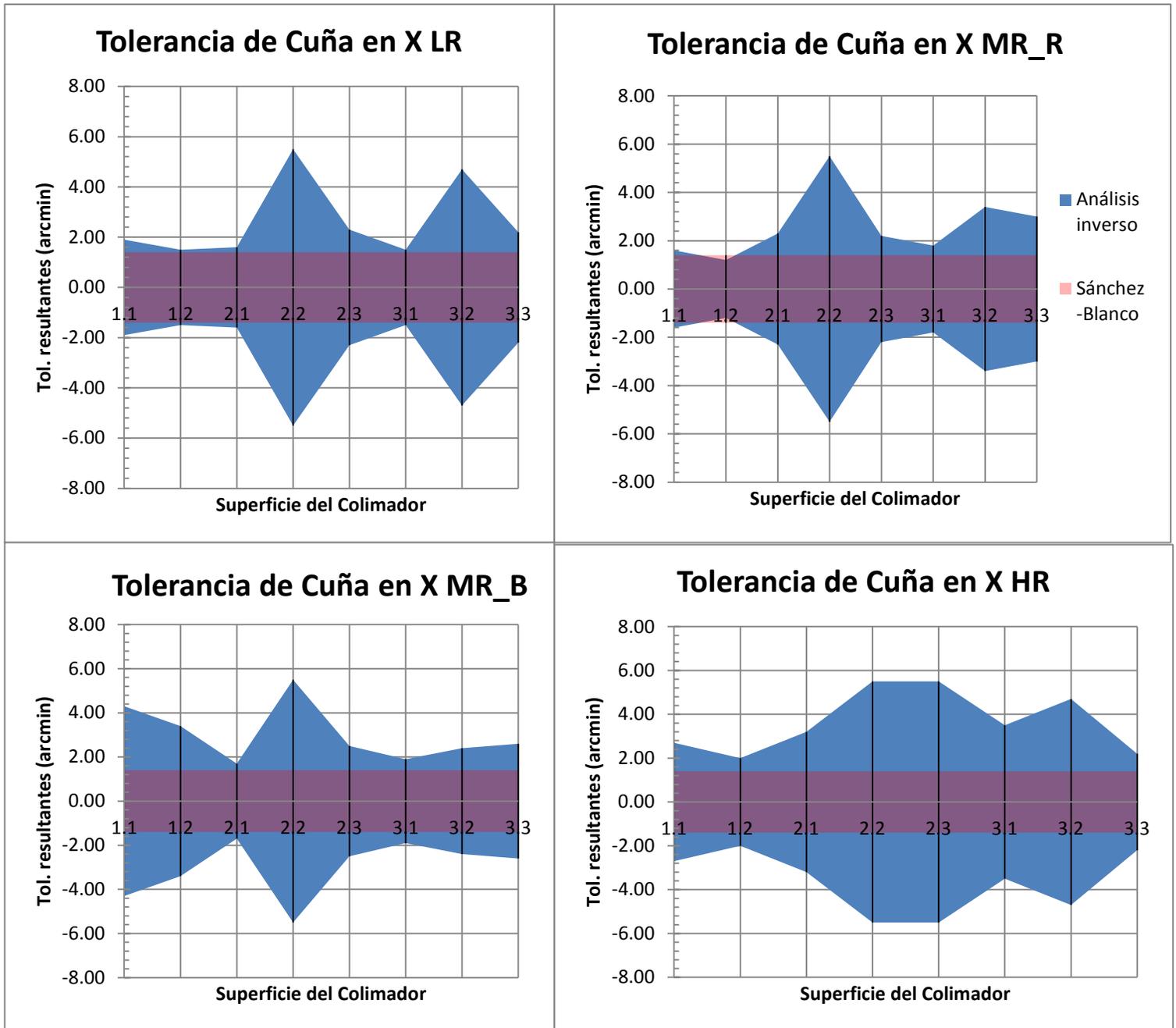


Figura 5.4: Comparativa de las tolerancias de cuña en el eje x de cada superficie del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.

### *Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

La tolerancia de cuña original es de 2 minutos de arco en total, en este trabajo se utilizan 1.4 minutos de arco debido a que este parámetro se separa en el eje X y en el eje Y. Se emplea la expresión  $C^2 = A^2 + B^2$  en el que A y B es la cuña en X y en Y respectivamente. En un elemento de apertura circular  $A=B$  y por tanto tenemos  $A=1.4$  minutos de arco para las tolerancias utilizadas.

La superficie del colimador más sensible en el eje X es la segunda superficie del primer lente simple, la primera superficie también está por debajo de las tolerancias nominales propuestas. La recomendación es utilizar los márgenes de error propuestos por Sánchez-Blanco (2011) en este el primer elemento del colimador. La superficie con más margen de error es la segunda del primer doblete en la que fácilmente se puede ir a  $\pm 5$  minutos de arco. La cuña en X es menos relevante en la configuración HR. Aunque todos los dobletes parecen estables hay que tener cuidado con la superficie 3.1.

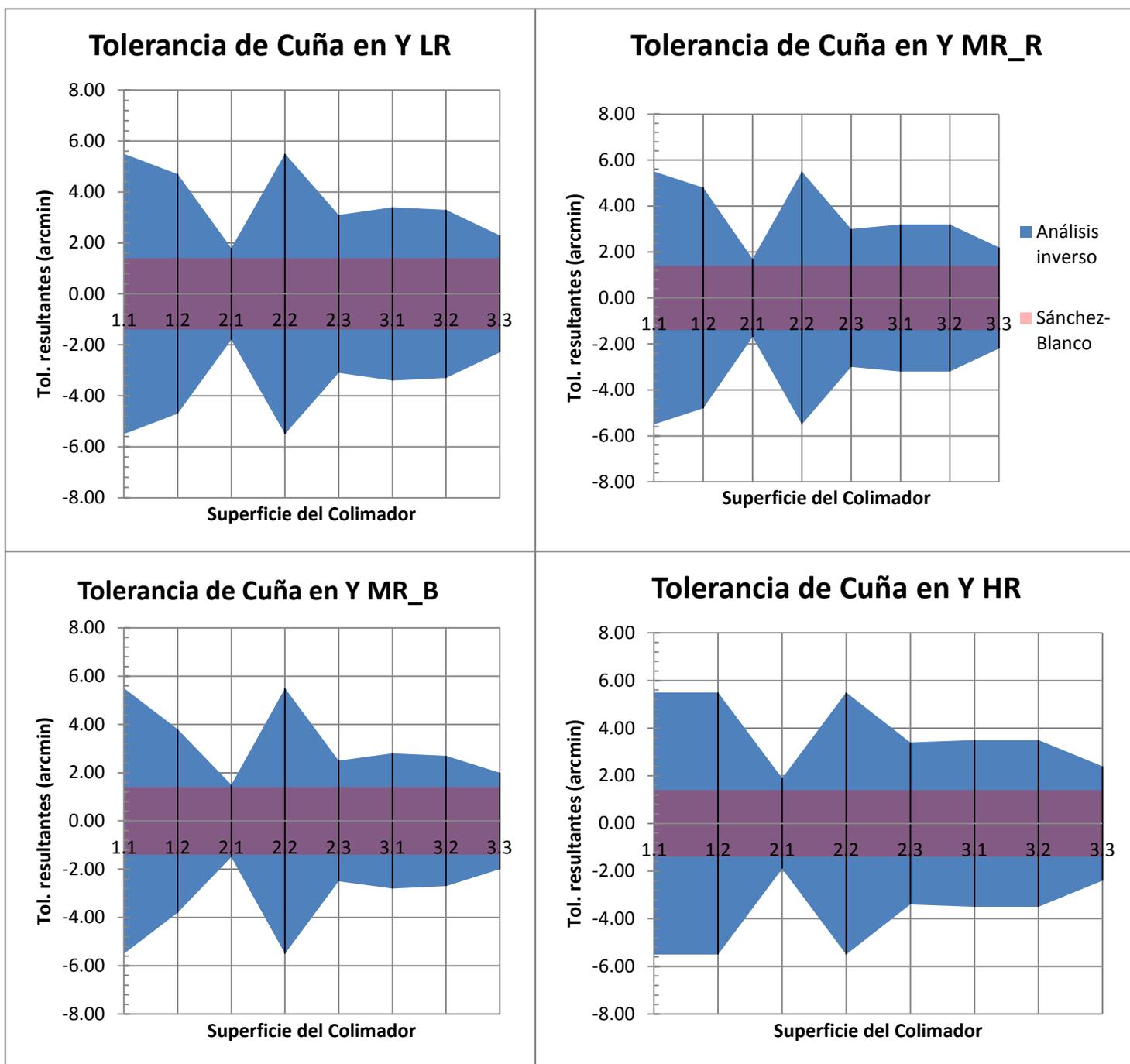


Figura 5.5: Comparativa de las tolerancias de cuña en el eje y de cada superficie del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.

### *Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

La cuña en el eje Y se comporta de forma casi uniforme en todas las configuraciones como se puede observar en la figura 5.5 y todas las tolerancias son flexibles hasta cierto punto en este parámetro pero, se debe tener cuidado con la primera superficie del segundo elemento pero no hay muchas restricciones.

La cuña se estudia aquí sobre dos ejes, pero en la práctica no se tienen restringidos por lo que si en un elemento óptico la cuña es demasiada se puede rotar para compensarla, esto es, si tuviésemos un ángulo de cuña de 2 minutos de arco en la superficie 1.2, por ejemplo, en X tendríamos problemas ya que se encontraría fuera de los intervalos previstos por el análisis, pero en el eje Y no tenemos este problema por lo que el elemento se puede rotar de manera que el ángulo mayor de 2 minutos de arco quede sobre el este eje y así minimizar la degradación.

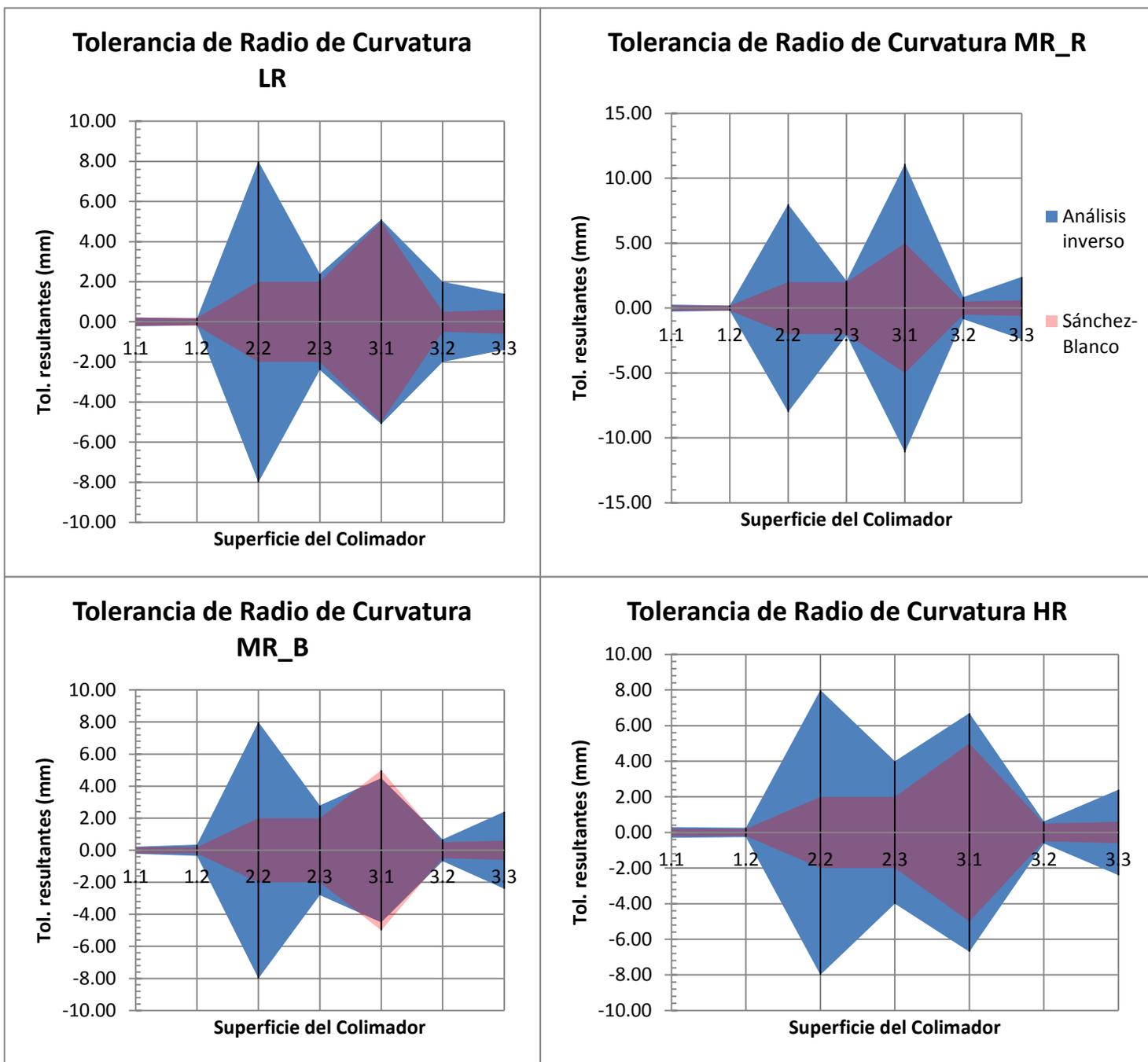


Figura 5.6: Comparativa de las tolerancias de radio de curvatura de cada superficie del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.

## *Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

En la figura 5.6 se puede ver que los radios de curvatura son las tolerancias más variables de superficie a superficie, esto es porque todos los radios son diferentes y dependiendo de que tan grandes o pequeños son se aplican tolerancias diferentes. Entre más grande es el radio de curvatura la superficie tiende más al plano, por lo tanto las tolerancias se pueden holgar más, por otro lado entre más pequeño es el radio de curvatura mas ajustada es la tolerancia asociada. Las tolerancias reajustadas por el análisis inverso son más holgadas en general en las cuatro configuraciones, esto es conveniente ya que en este parámetro es donde más tiempo y costos se pueden ahorrar.

La superficie 2.1 es un plano por lo que no tiene tolerancias de radio de curvatura, la superficie 3.1 es la más interesante en el estudio de este parámetro ya que en LR y en MR\_B se puede notar que el análisis realizado aquí y en las tolerancias propuestas por el diseñador son parecidas y cerradas, mientras que en las otras dos configuraciones (MR\_R y HR) se ve que se podría relajar la tolerancia en ese elemento. Se recomienda ajustar a la tolerancia del diseñador para que el desempeño quede garantizado en todas las configuraciones del espectrógrafo.

Los radios de curvatura de las dos superficies del primer elemento del colimador son críticos y tienen un margen de error muy cerrado, en este caso se tienen que seguir las tolerancias de diseño tal cual están expresadas en la tabla 4.1 de la sección anterior.

Para la superficie 2.2 en la cual el radio de curvatura es bastante grande, se pueden holgar las tolerancias hasta unos  $\pm 8\text{mm}$ . La tolerancia en esta superficie no afecta de manera sustancial el desempeño del sistema.

Para las tolerancias de alineación se tiene lo siguiente:

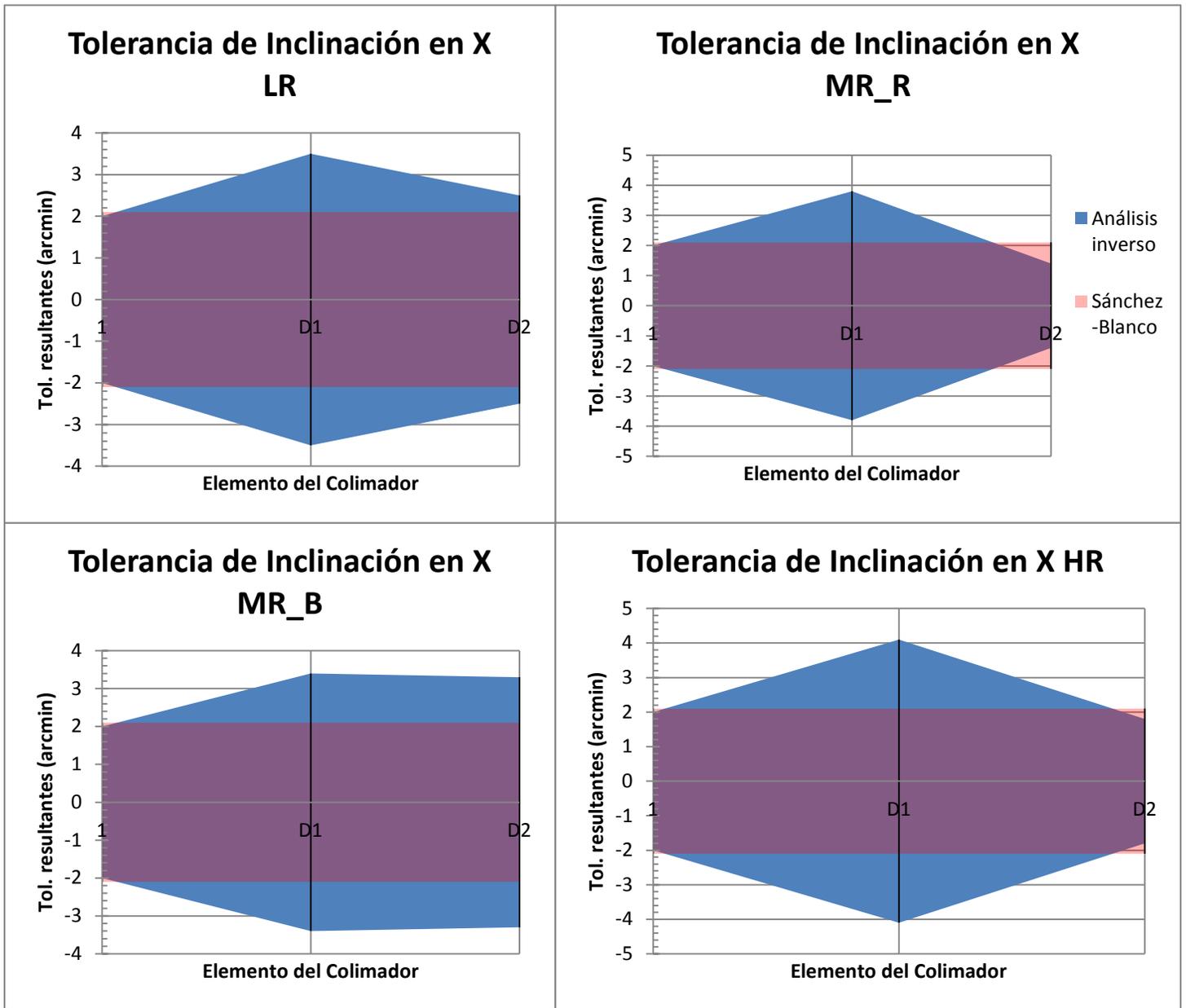


Figura 5.7: Comparativa de las tolerancias de inclinación en el eje X de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.

En tolerancias de alineación lo que se mide es la precisión de las monturas en las que se colocarán los diferentes elementos del colimador y de la cámara, teniendo esto en

Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

cuenta, estas tolerancias no dependen de la fabricación sino de la capacidad que se tenga para alinear los elementos.

La inclinación en el eje X sobre el colimador afecta más a los elementos en los extremos que son S1 y D2, como se observa en la figura 5.7, esto es lógico porque al entrar la luz en el instrumento es crítico el ángulo de incidencia que tiene, y al salir es exactamente lo mismo, en cambio lo que pasa en el intermedio tiene mas posibilidad de holgura en la precisión de alineación.

Como se puede observar en la figura 5.7 se recomienda llevar las tolerancias a los márgenes dados por Sánchez-Blanco (2011) en S1 y en D2. Mientras que para el elemento D1 se podría extender este margen de  $\pm 2$  a  $\pm 3$  minutos de arco.

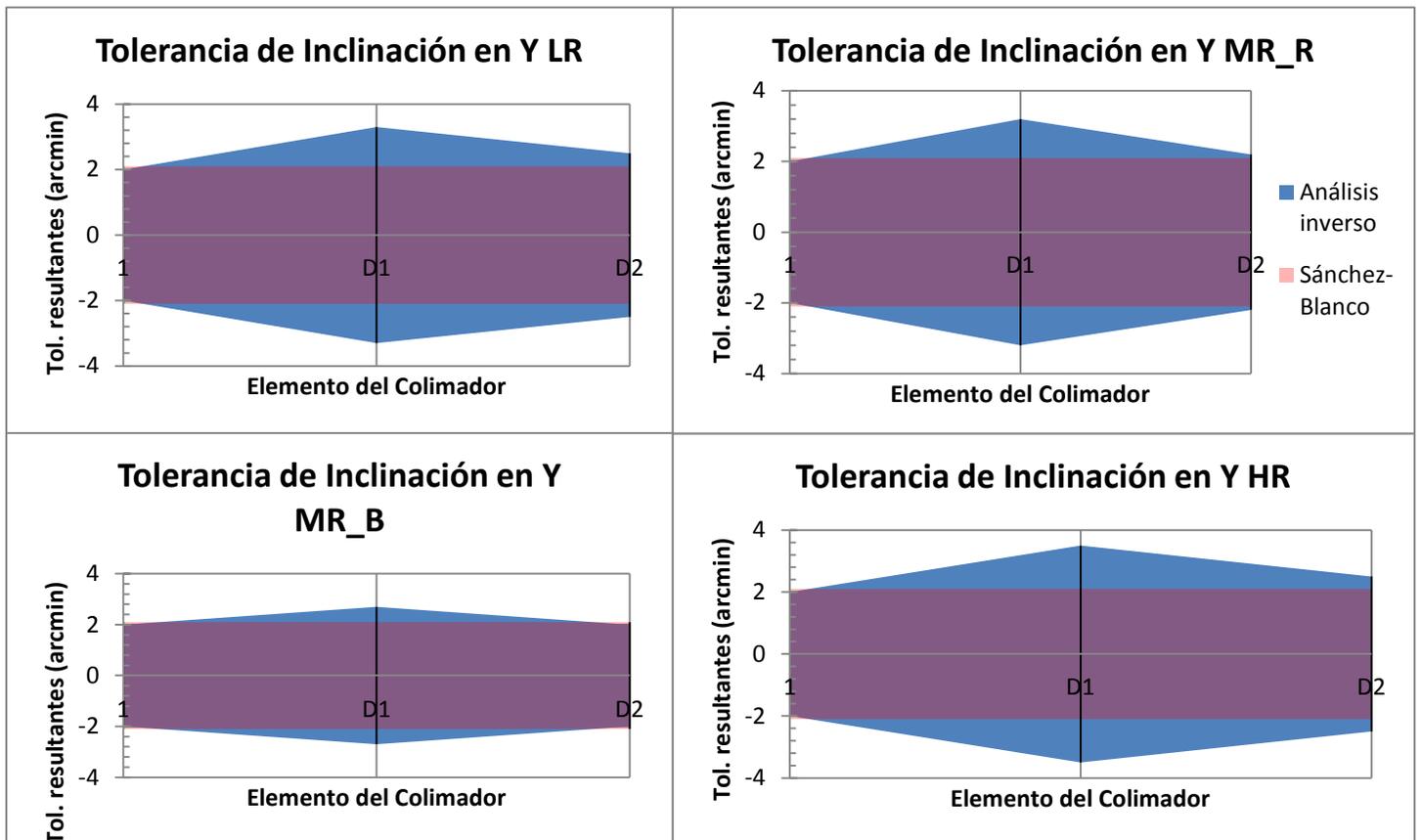


Figura 5.8: Comparativa de las tolerancias de inclinación en el eje Y de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.

En el eje Y básicamente se repite la misma configuración de resultados que en X; en los dos extremos se cierran los márgenes y que el centro se tiene un poco más de flexibilidad. A pesar de esto, en el elemento D1 no se recomienda pasar de los  $\pm 3$  minutos de arco. Además en este tipo de tolerancias los ahorros en costo y tiempo no son demasiados por lo que lo mejor sería mantener los 2 minutos de arco de margen en todos los elementos.

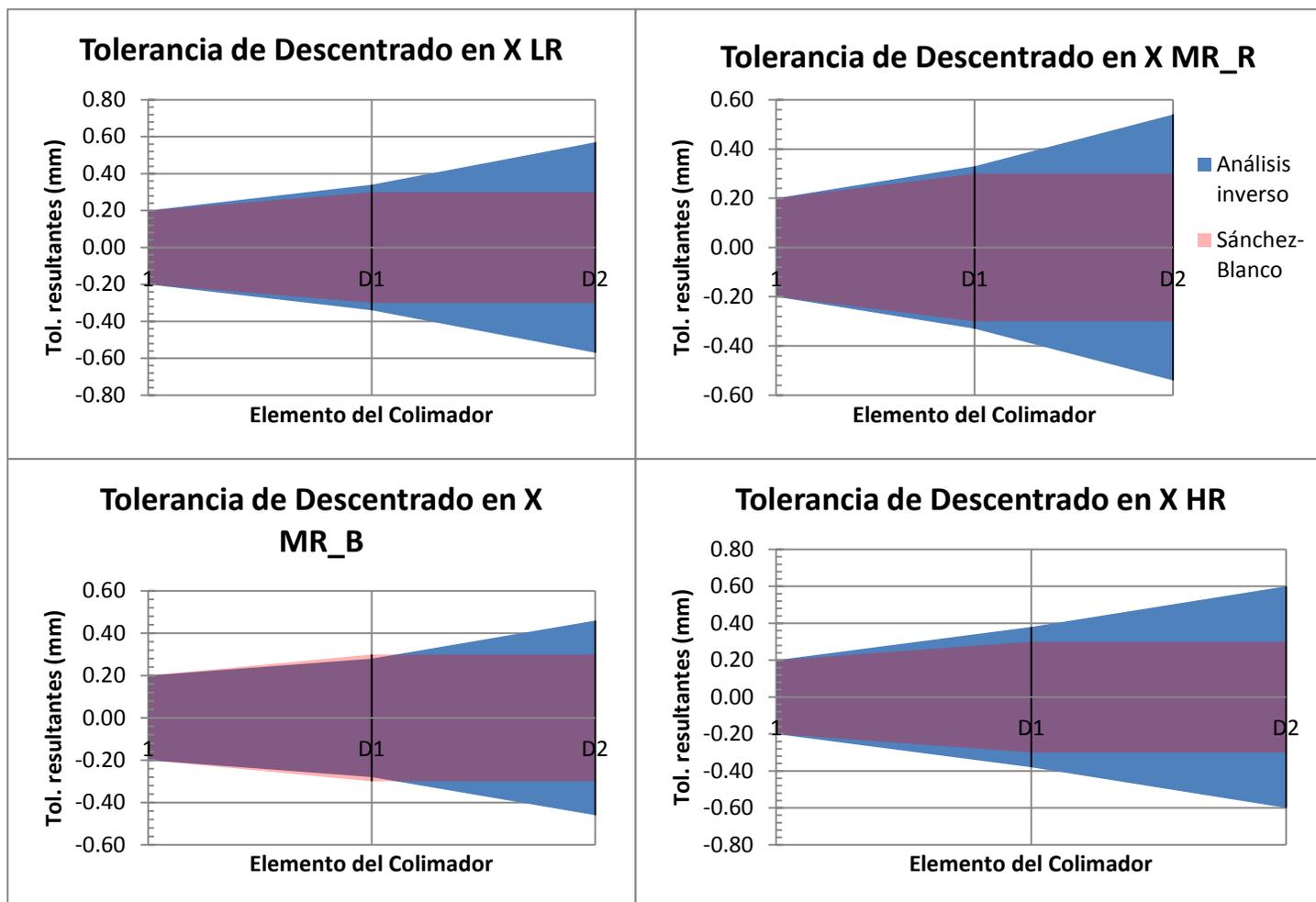


Figura 5.9: Comparativa de las tolerancias de descentrado en el eje X de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.

En la tolerancia de descentrado en el eje x de los elementos del colimador se puede apreciar en la figura 5.9 que el último elemento es el que puede relajar la tolerancia

Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

un poco, al igual que las tolerancias de inclinación la de descentrado no depende del fabricante sino del ensamble final y se pueden corregir malos centrados cuantas veces sean necesarias.

El diseñador propone utilizar una tolerancia de  $\pm 0.02\text{mm}$  con respecto al eje óptico, aunque no es muy difícil de alcanzar usando instrumentos de medición actuales, en el segundo doblete se tiene una flexibilidad en el margen de error de hasta  $\pm 0.5\text{mm}$ .

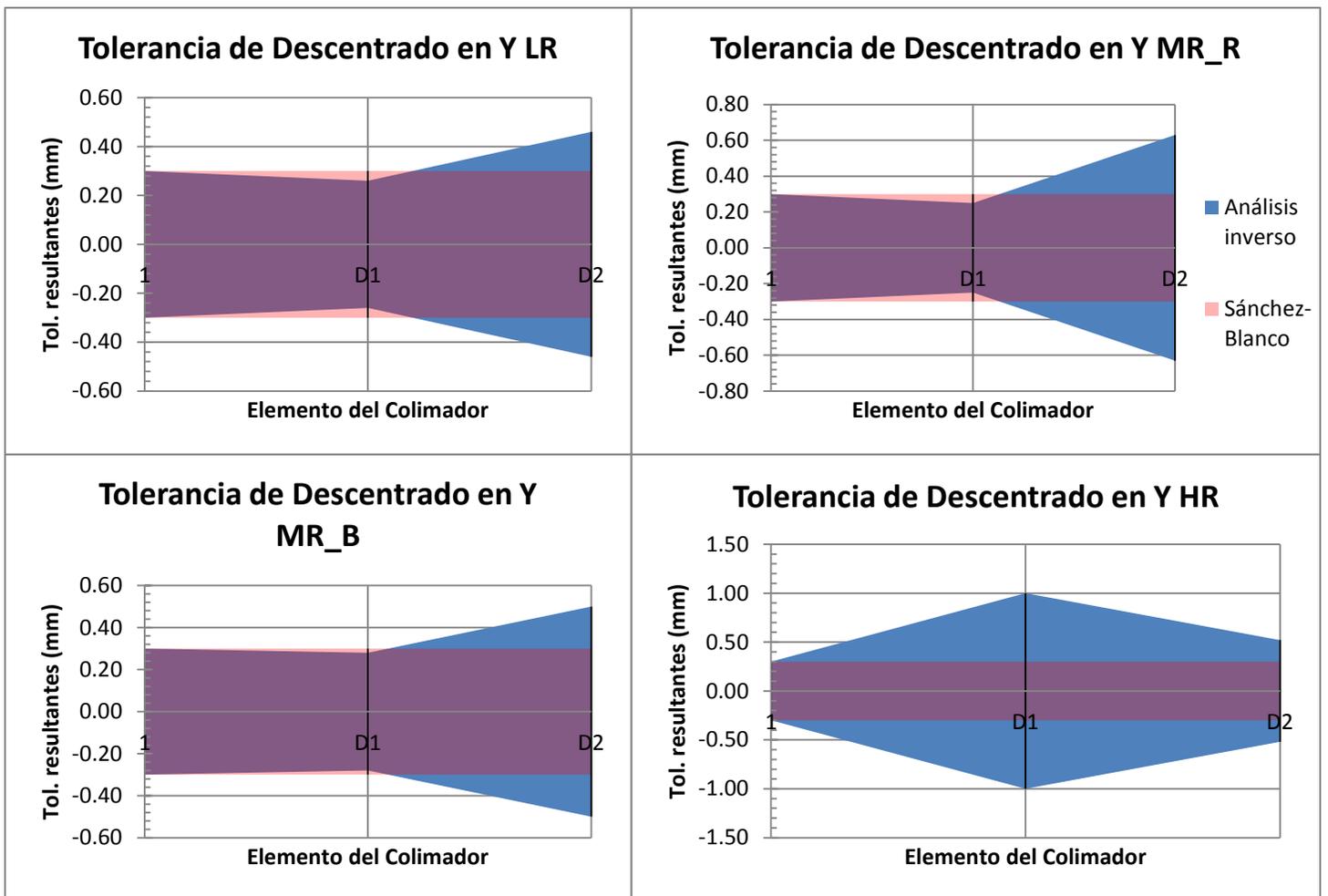


Figura 5.10: Comparativa de las tolerancias de descentrado en el eje Y de cada elemento del colimador obtenidas en las cuatro configuraciones.

En las tres primeras configuraciones observamos el mismo comportamiento que el descentrado del eje x. En la configuración de HR tenemos un comportamiento peculiar en donde el primer doblete se puede descentrar hasta 1mm, los demás resultados nos arrojan conclusiones diferentes a esta pero similares entre sí, se revisará este caso en el futuro.

Se hace un análisis extensivo en el siguiente capítulo con los sistemas que presentaron este tipo de peculiaridades para confirmar los resultados del análisis inverso. Entonces para garantizar el desempeño, tal cual en el eje x, se tienen que mantener los márgenes de  $\pm 0.2\text{mm}$  para los dos primeros elementos, mientras que en D2 se puede holgar el margen hasta  $\pm 0.5\text{mm}$ .

Las tolerancias de los coeficientes de asfericidad no son un factor de preocupación ya que de la tabla 5.7 se observa que se pueden holgar aún más sin tener repercusiones en el sistema. Las tolerancias propuestas en Sánchez-Blanco (2011) se pueden relajar cuando menos dos veces mas sin problemas.

#### **5.4.2. Cámara**

La cámara en todo instrumento es la parte más sensible y propensa a disminuir el desempeño a causa de los errores de medición, ya que ésta es la parte del sistema en la que se forma imagen. Teniendo esto en cuenta se deben tomar más medidas de precaución al fabricarla y alinearla y siguiendo con esta lógica, las tolerancias resultantes de este análisis serán más exigentes que las del colimador.

El elemento CAM L\_5 (5 ó S1, en la notación de este capítulo) resulta ser el más sensible de todo el sistema, y para evitar más degradación de la función de mérito y a su vez mejorar la calidad de la imagen al reducir aberraciones, se utiliza como compensador además de la distancia focal dada por el espesor 3 del colimador, este elemento se podrá descentrar y mover en el eje para reducir las aberraciones después de que todo esté fabricado y ensamblado.

La función de mérito utilizada es, como en todos los casos manejados en esta tesis, el rms del tamaño de la mancha. Se realizaron las siguientes gráficas de tolerancias con los datos en las tablas de las de las secciones 5.3.3 y 5.3.4.

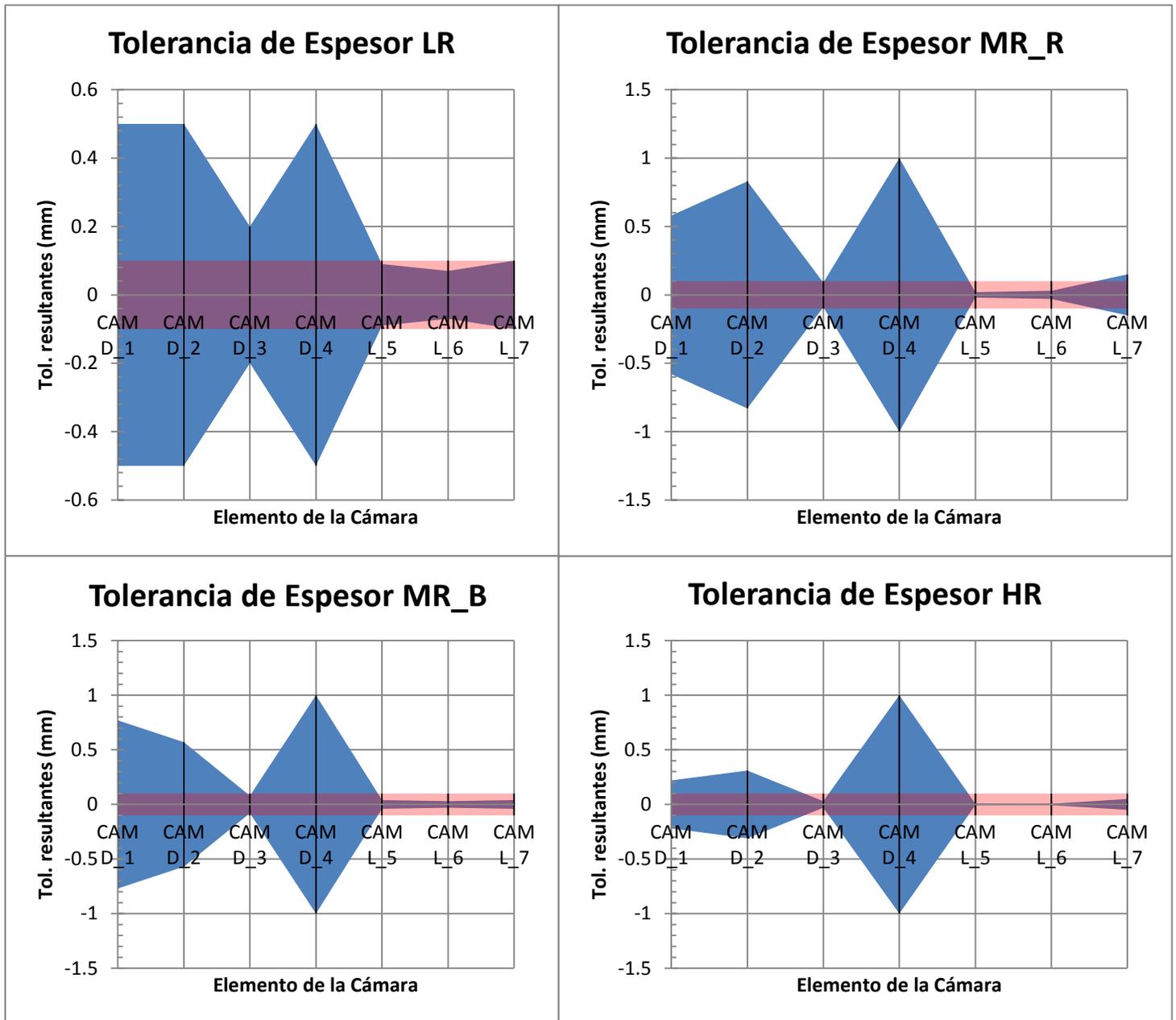


Figura 5.11: Comparativa de las tolerancias de espesor de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones. En azul se muestra el intervalo de tolerancias permisibles obtenidas en el análisis inverso y en rosado transparente el intervalo de tolerancias de diseño propuesto por Sánchez-Blanco (2011).

Los espesores de la cámara se comportan de forma similar en las cuatro configuraciones utilizadas. Los elementos simples de la cámara se mantienen por debajo o muy cerca de los valores propuestos en Sánchez-Blanco (2011), esto se analiza más a fondo en el siguiente capítulo. Los espesores entre los dos elementos de ambos dobletes se mantienen muy holgados en cuanto al espesor, esto es de esperarse ya que el cambio en índices de refracción de un lente a otro es menos brusco que un espacio de aire-lente.

En la configuración de HR podemos ver que para garantizar el buen desempeño fue necesario acortar los márgenes de error en el elemento CAM D\_2, pero aun así se logra mantener sobre las especificaciones de diseño.

En los espesores de CAM D\_3 y de todos los lentes simples de la cámara se deben mantener las tolerancias de diseño, mientras que en D\_4, D\_2 y D\_1 las tolerancias se pueden holgar hasta  $\pm 0.5\text{mm}$ ,  $\pm 0.3\text{mm}$  y  $\pm 0.2\text{mm}$  respectivamente.

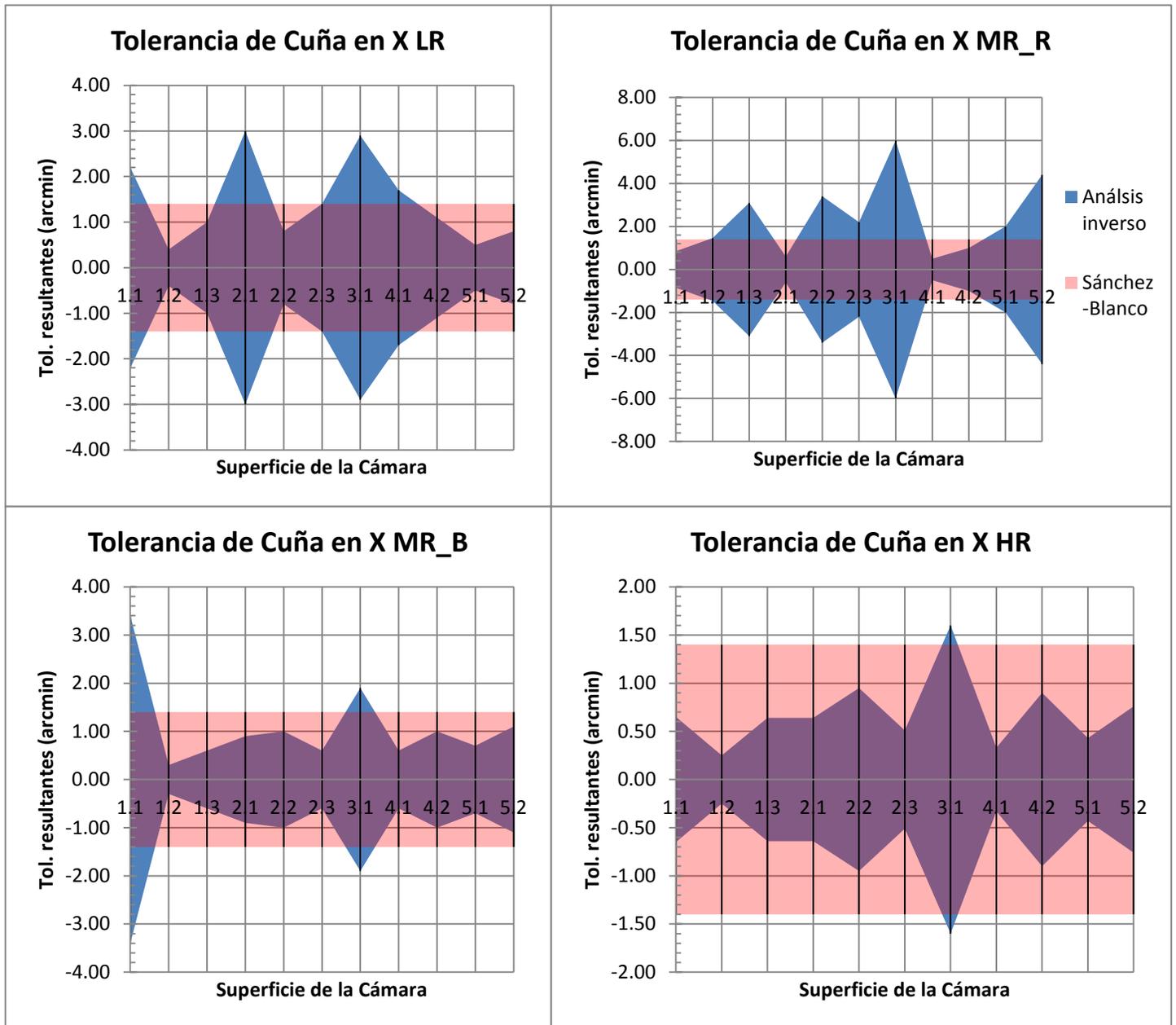


Figura 5.12: Comparativa de las tolerancias de cuña en el eje X de cada superficie de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.

La cuña en X es una de las tolerancias que más problemas arrojó al realizar las simulaciones de este estudio, como se observa en la figura 5.12. En la configuración HR los márgenes se tuvieron que cerrar demasiado para que el desempeño final no estuviera muy por debajo de los requerimientos.

Las tolerancias se comportan bien cuando se ajustan a las de diseño pero al reajustar éstas para generar unos márgenes de error más holgados cuando sea posible sucede que hay muchos intervalos que no son simétricos, es decir, que no tienen el mismo valor en positivo y en el negativo. Las tolerancias que se presentan aquí tienen cierto pesimismo, esto se refiere a que se extrajo el margen que más degradación produjo en el análisis y con ese valor se propuso el simétrico.

Especialmente en el parámetro de cuña resulta ser que generalmente cuando la tolerancia se tiende a ir al positivo o al negativo del intervalo propuesto, según corresponda, mejora la función de mérito, mientras que hacia el otro extremo empeora. Esto quiere decir que las tolerancias del parámetro en estudio se compensan estadísticamente, existe la misma probabilidad de mejorar el desempeño que empeorarlo. En los MC entonces la cuña en X o en Y no resulta ser de los parámetros críticos.

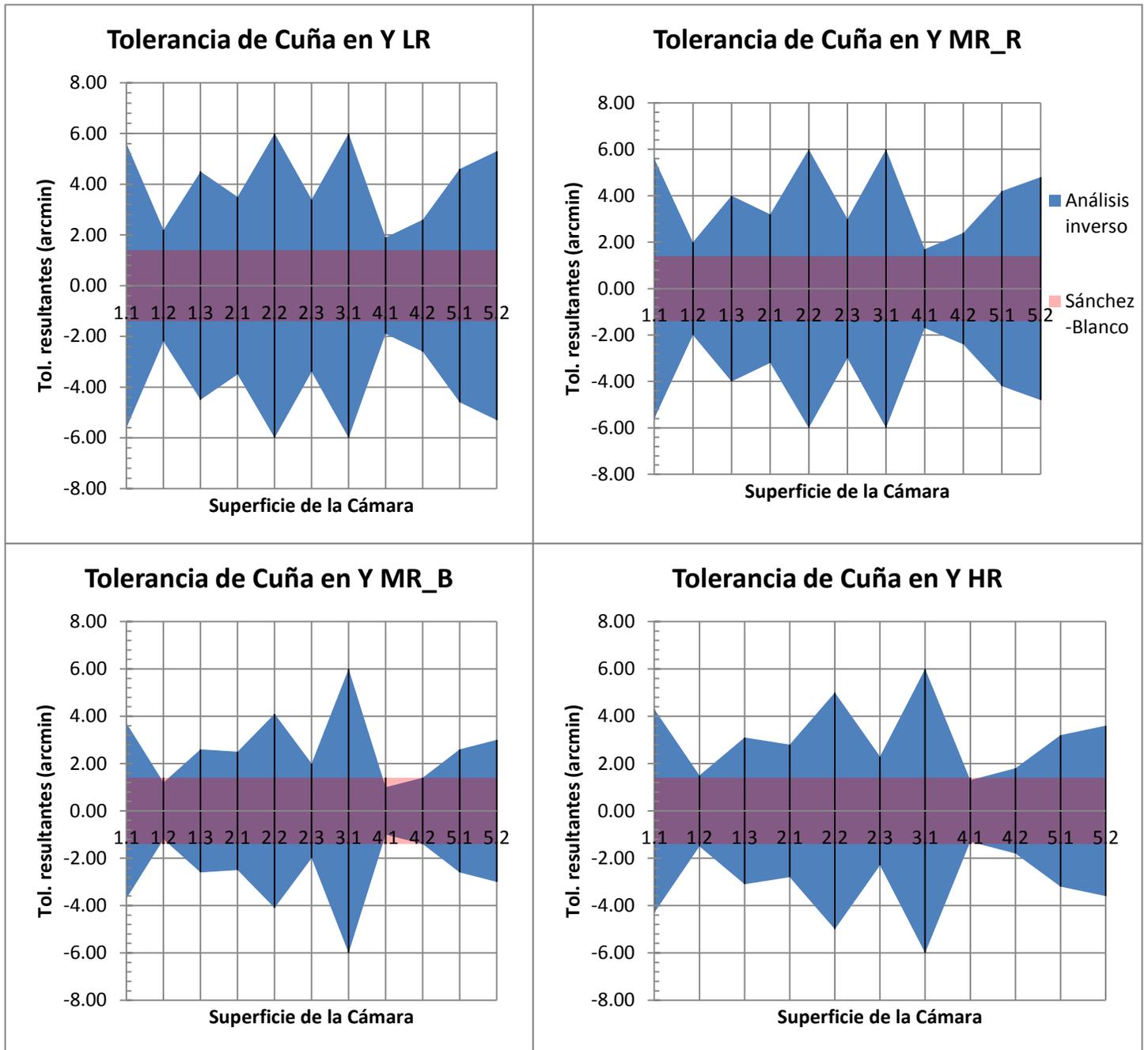


Figura 5.13: Comparativa de las tolerancias de cuña en el eje Y de cada superficie de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.

Al igual que en el colimador, las cuñas se pueden adecuar al eje que más convenga, ya que no se tienen restricciones y el elemento se puede rotar hasta encontrar

la mejor posición. Se puede ver en la figura 5.13 que la cuña en el eje Y es mucho más aceptable que en el eje X, esto se debe a que en X es donde se está formando la imagen del sistema. Los elementos más críticos de este parámetro son la superficie 1.2 y la 4.1 que tienen limitación de cuña en los dos ejes. Se debe tener cuidado en estas dos superficies ya que son claves para el buen desempeño, mantener las tolerancias de diseño e incluso restringir más el error en éstas es lo recomendable.

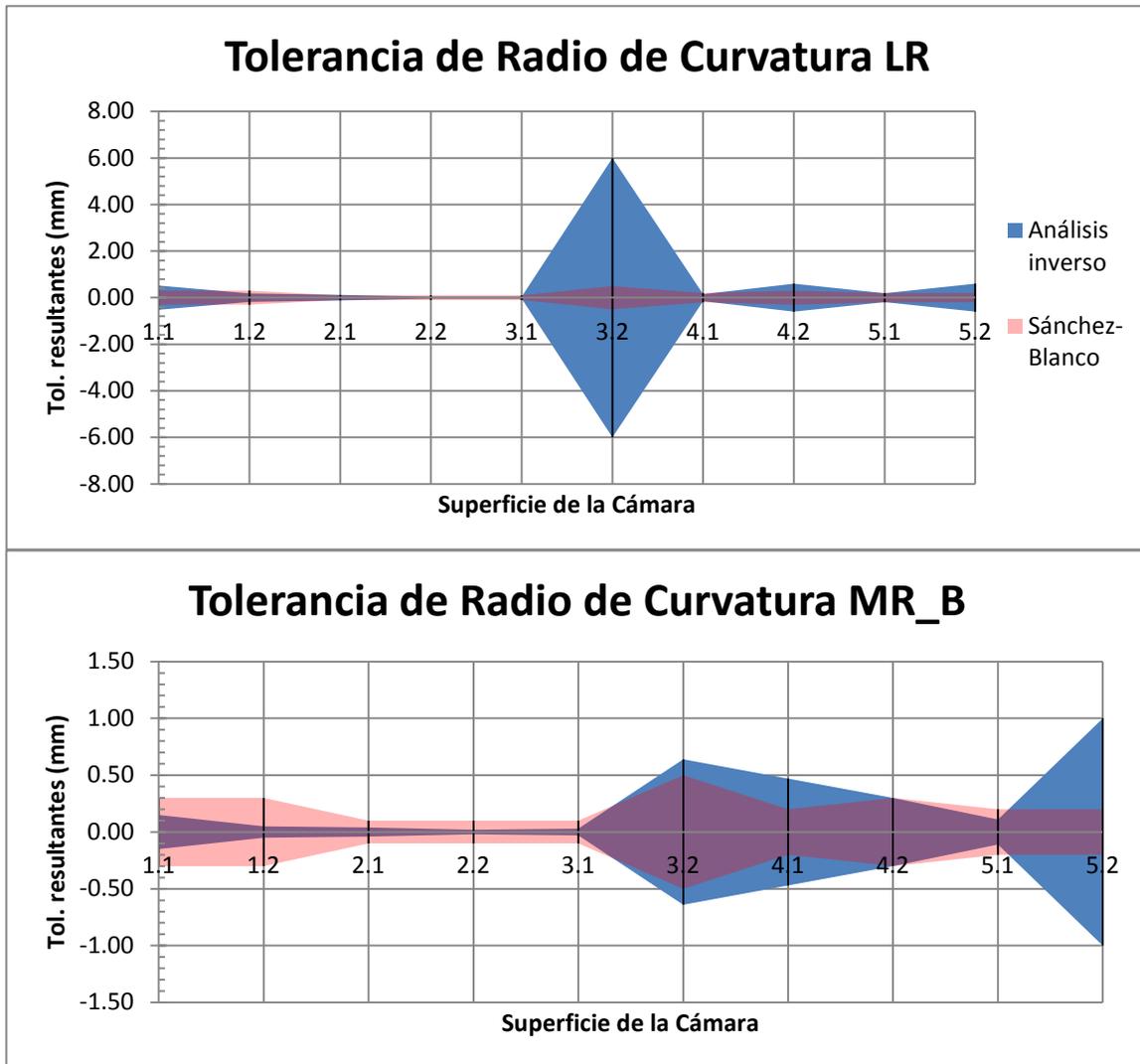


Figura 5.14: Comparativa de las tolerancias de radio de curvatura de cada superficie de la cámara obtenidas en LR y MR\_B.

## *Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

Estudiando los radios de curvatura se tuvo un problema al hacer el análisis inverso, que implicaba holgar los márgenes de tolerancia para después reajustarlos dado un incremento fijo de la función de mérito. En las configuraciones de MR\_R y HR la degradación en los MC se dispara hasta tres veces su valor nominal.

Esto se puede deber a muchas razones, una de las más probables es el estudio en un mismo análisis de diferentes parámetros de fabricación, para descartar éste se hicieron grupos de tolerancias más pequeños para determinar cuales son los parámetros que producen esos saltos en la función de mérito.

Se realizó todo lo posible por incluir estos parámetros en las simulaciones inversas pero simplemente no se consiguió obtener un desempeño aceptable. Por lo que se recomienda mantener las tolerancias de diseño para los radios de curvatura en todos los elementos de la cámara.

Ahora se desglosan las tolerancias de alineación:

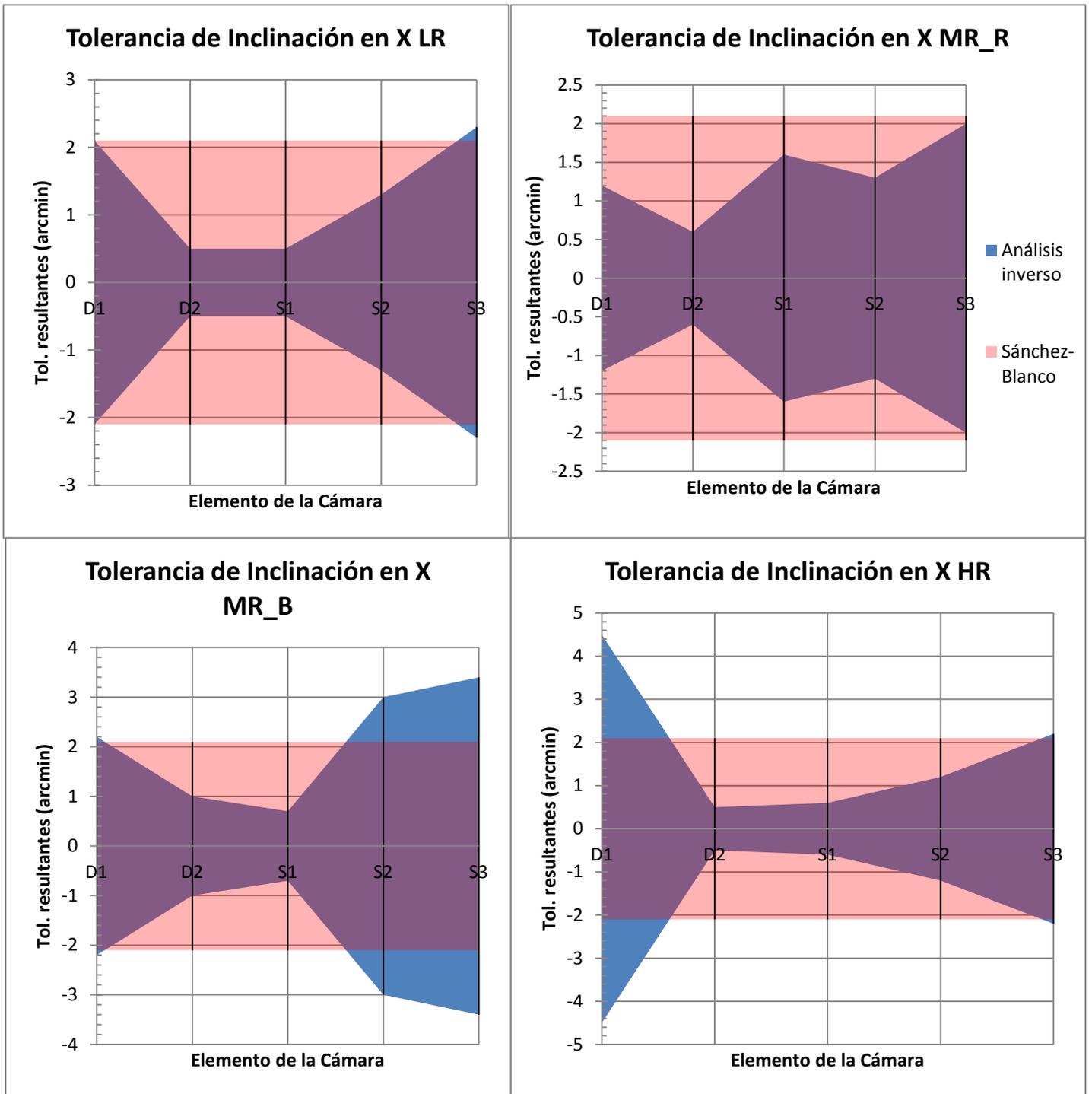


Figura 5.15: Comparativa de las tolerancias de inclinación en el eje X de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.

Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

Se puede ver que la tolerancia de inclinación en el eje X es bastante crítica ya que en este eje es donde se forma imagen, como se menciona anteriormente. Esto se analiza más a fondo en el siguiente capítulo de esta tesis. Se recomienda mantener las tolerancias de diseño inclusive tener márgenes de error lo más cerrados posible.

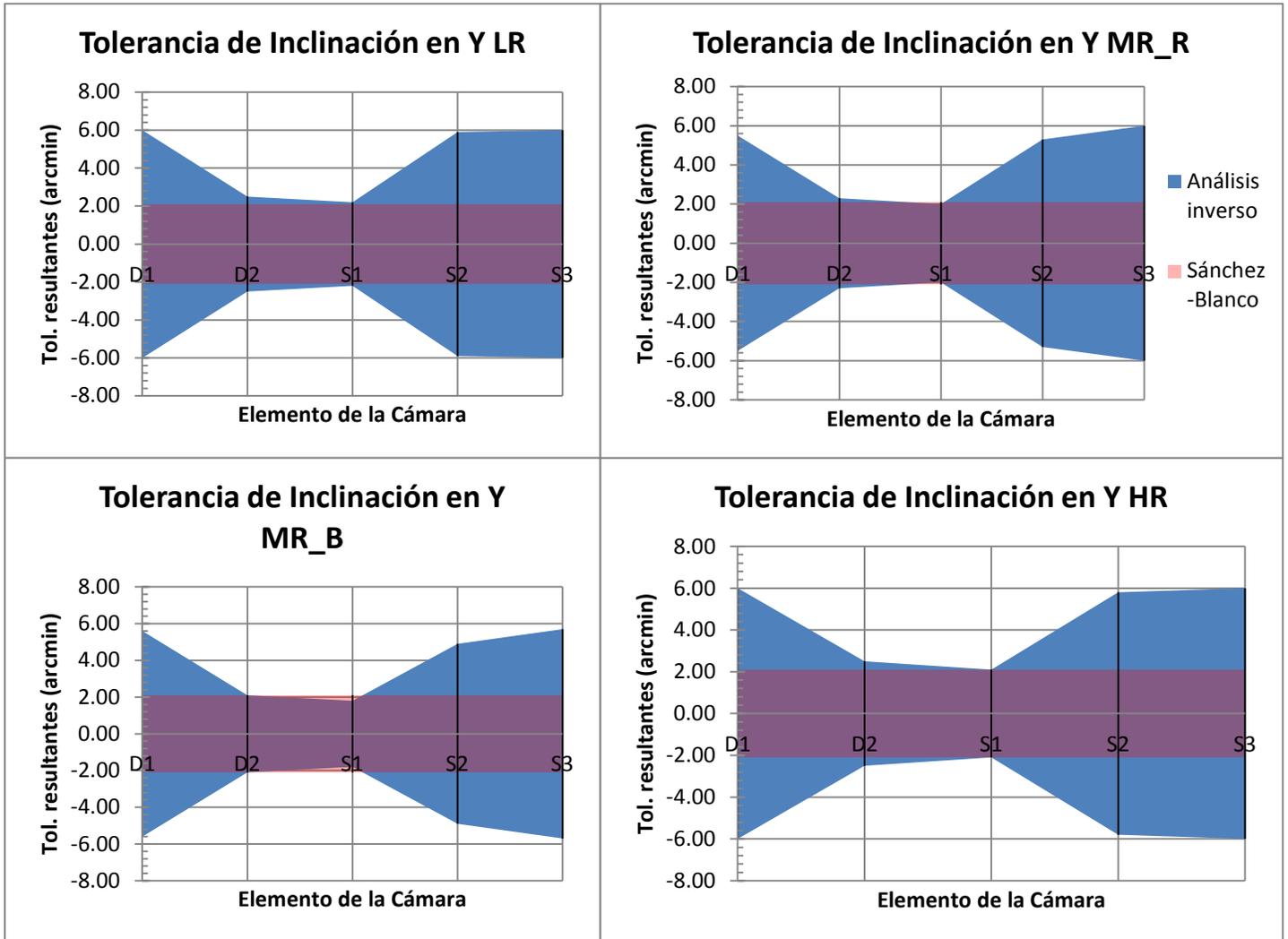


Figura 5.16: Comparativa de las tolerancias de inclinación en el eje Y de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.

La inclinación en el eje Y no es un parámetro crítico en ninguno de los elementos de la cámara, el elemento que se usará como compensador que es el S1 en esta notación, es el más sensible en a esta tolerancia pero se mantiene dentro de los  $\pm 2$  minutos de arco.

Las tolerancias en los elementos S2 y S3 se pueden extender hasta los  $\pm 5$  minutos de arco fácilmente, al igual que el primer doblete que tiene un margen de error holgado.

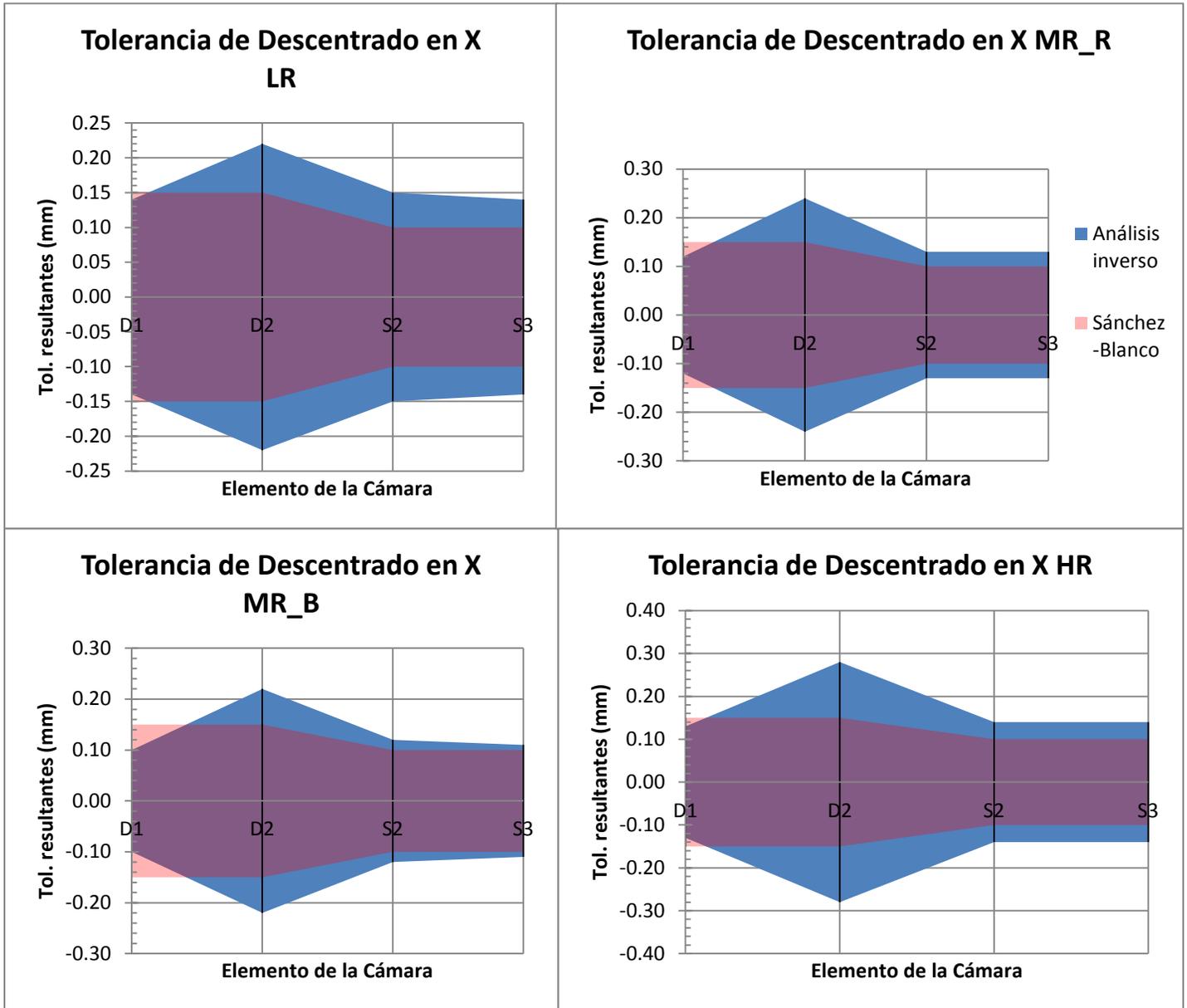


Figura 5.17: Comparativa de las tolerancias de descentrado en el eje X de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.

## Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

En el parámetro del descentrado en X, los datos siguen la misma tendencia que las tolerancias propuestas por el diseñador, como se observa en la figura 5.17, el único elemento con el que se debe tener cuidado es el primer doblete, todos los demás elementos se encuentran por lo menos 0.05mm por arriba de la tolerancia de diseño. Aquí no aparece el primer lente simple de la configuración ya que, como se menciona anteriormente, se usará como compensador de aberraciones.

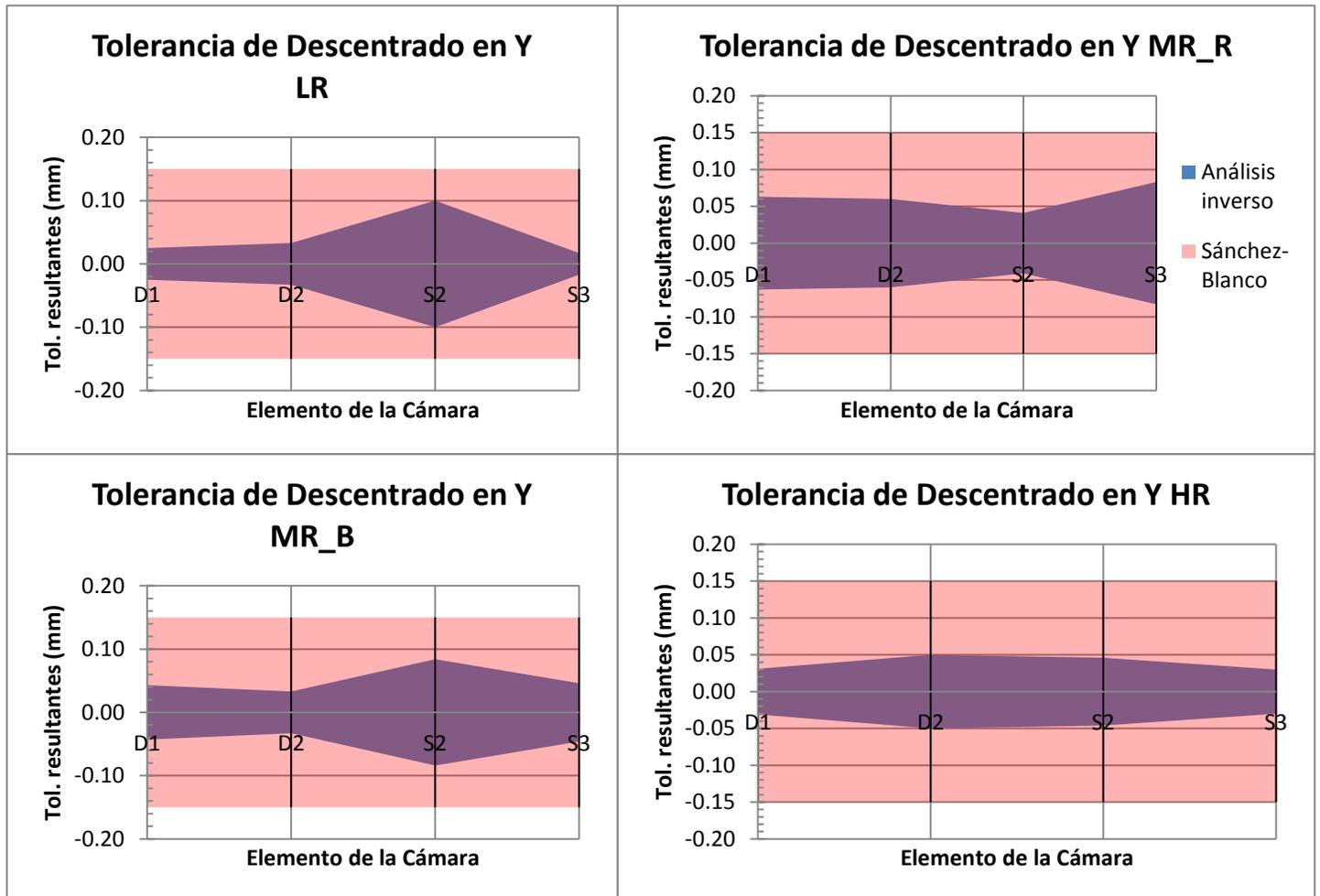


Figura 5.18: Comparativa de las tolerancias de descentrado en el eje y de cada elemento de la cámara obtenidas en las cuatro configuraciones.

El descentrado en el eje Y probó ser uno de los parámetros más sensibles de la cámara, en todas las configuraciones las tolerancias obtenidas por el análisis inverso son

menores a las establecidas en Sánchez-Blanco (2011). El peor caso se analiza en el siguiente capítulo a fondo.

Los resultados obtenidos en este parámetro nos parecen indicar que habría que acortar los márgenes de error hasta un 66% quedando en un parámetro que admite  $\pm 0.05\text{mm}$ , lo cual es muy difícil de alcanzar. Pero también en el capítulo 4 se demostró que las tolerancias provistas por el diseñador eran suficientes para alcanzar un desempeño satisfactorio. Entonces, ajustar o mantener las tolerancias depende únicamente de los instrumentos con los que se cuente para alinear los elementos de la cámara, si estos lo permiten, habría que reducir esas tolerancias en lo posible, sino las tolerancias de diseño bastarán para garantizar un desempeño óptimo con un 90% de seguridad.

Al igual que en la tolerancia de cuña, los descentramientos se compensan estadísticamente al realizar los MC así que estas medidas no deben preocupar a los involucrados en el ensamble final del sistema, al final, cuando todo este fabricado, se pueden compensar errores que antes eran desconocidos, haciendo distintas pruebas para aislar parámetros en conflicto.

Cabe resaltar que para el análisis inverso en la cámara sólo se usaron parámetros que pudiesen ser factor de degradación, no se incluyeron ni tolerancias de índice de refracción ni de la regularidad de la superficie ya que estos parámetros no fueron fuente sustancial de degradación en las pruebas realizadas en los capítulos anteriores. Además de que entre más variables se utilizan más complicado se hace distinguir los parámetros más críticos del subsistema.

### **5.4.3. Resumen**

Tratando de sintetizar un poco más los resultados obtenidos en el análisis inverso realizado en este capítulo, se pueden generar gráficas más compactas de resultados en las diversas configuraciones para los dos subsistemas, el colimador y la cámara. Así se pueden ver de una sola vez los parámetros más sensibles en cada configuración y al mismo tiempo cuales son los elementos o superficies que generan conflicto en el desempeño. A continuación se presentan los resultados para el colimador:

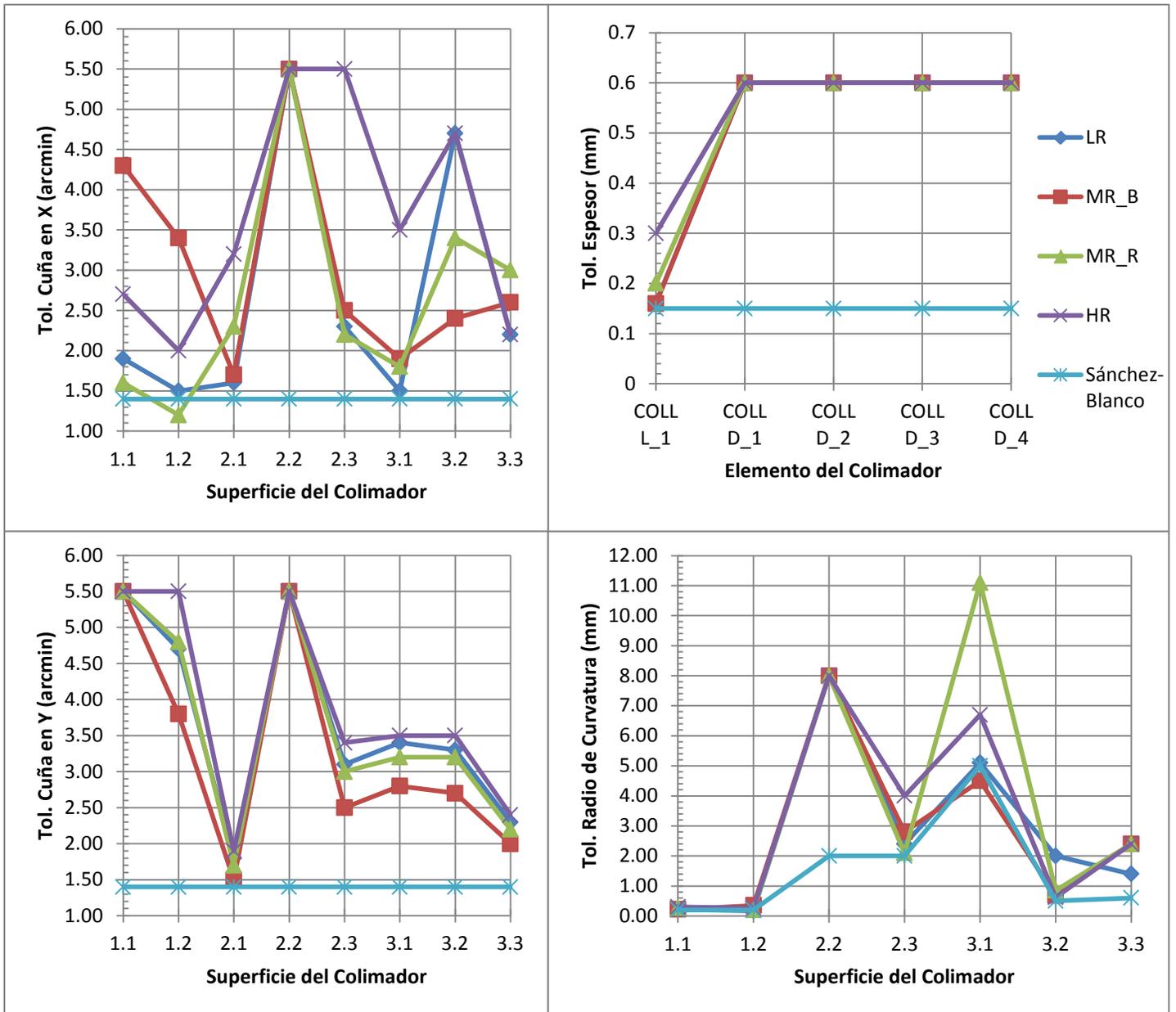


Figura 5.19: Comparativa de resultados del análisis inverso de tolerancias de fabricación del colimador en las cuatro distintas resoluciones utilizadas y las tolerancias de diseño propuestas en Sánchez-Blanco (2011).

Como se puede observar, en la figura. 5.19, en este caso sólo se utilizó el margen positivo de las tolerancias, como son simétricas este margen las representa adecuadamente, aquí se pueden notar cosas que no se ven a simple vista en las gráficas anteriores.

En espesor se tiene que todas las configuraciones mantienen la misma forma y que el elemento más sensible es el primer lente simple. En este parámetro no se tiene problema al extender el margen de error hasta  $\pm 0.6\text{mm}$  en todos los demás componentes del colimador.

Para la cuña en X debemos mantener los valores de diseño en casi todas las superficies ya que algunas son menos sensibles en diferentes configuraciones, pero el espectrógrafo debe estar garantizado para funcionar en todas, por lo tanto el peor resultado es el que se considera, por ejemplo, si tenemos un elemento poco sensible en HR pero en LR el valor del margen tiene que ser más ajustado, entonces el resultado que se toma en cuenta es el de LR.

En el eje Y se tiene más tolerancia a la cuña, los motivos se explicaron anteriormente, en este parámetro la única superficie en la que se deben mantener los estrictos  $\pm 1.4$  minutos de arco es en la 2.1.

Las tolerancias en el parámetro de radio de curvatura se deben mantener con las tolerancias en diseño, la superficie que podría tener una tolerancia mas relajada es la 2.2 ya que tiene un radio de curvatura grande.

Los resultados del análisis inverso para tolerancias de alineación se pueden resumir en la figura 5.20:

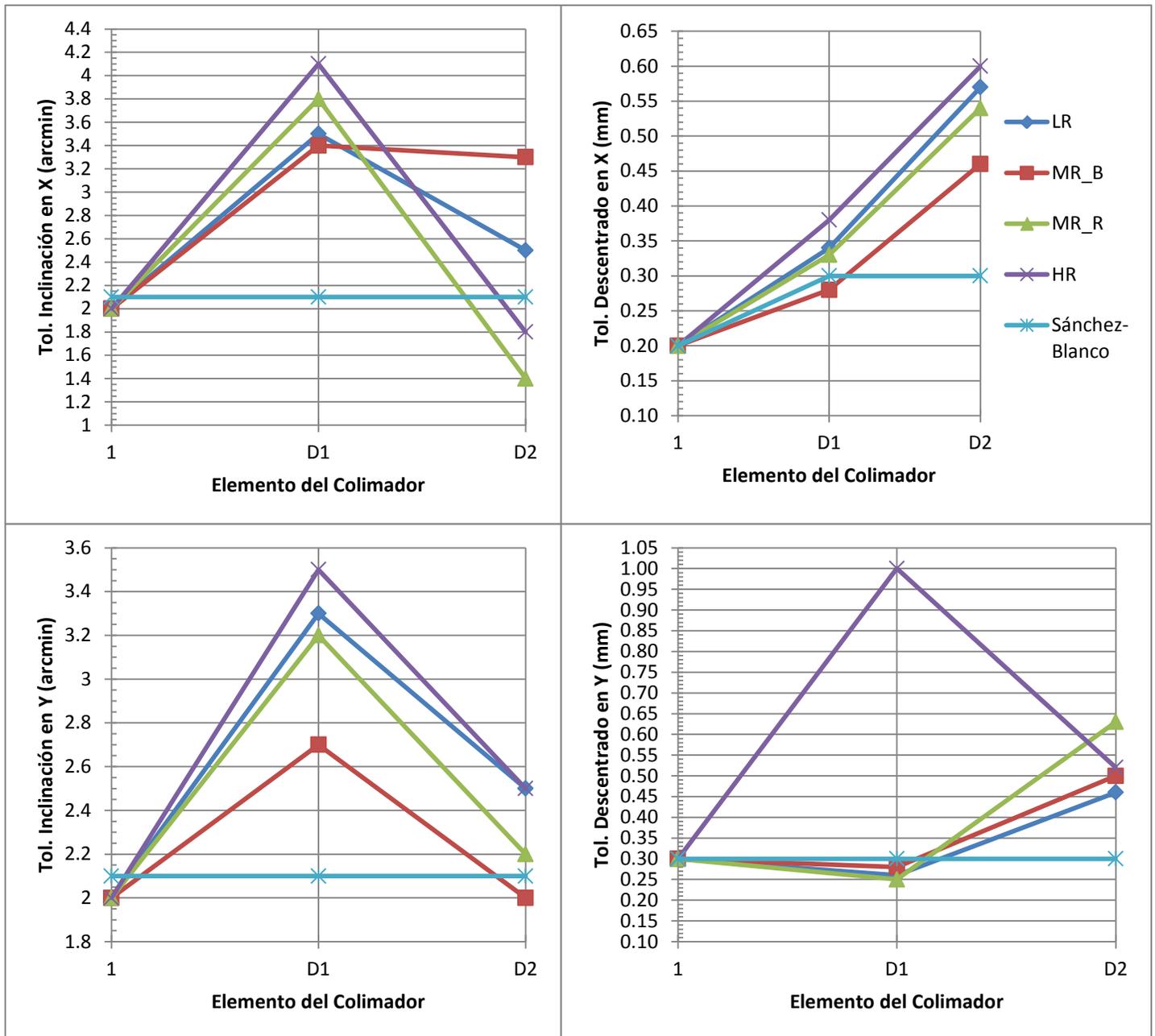


Figura 5.20: Comparativa de resultados del análisis inverso de tolerancias de alineación del colimador en las cuatro distintas resoluciones utilizadas y las tolerancias de diseño propuestas en Sánchez-Blanco (2011).

En alineación, la configuración más sensible es la de MR\_B, en la figura 5.20 se puede observar que la mayoría de los parámetros se encuentran en los límites de diseño y no se puede efectuar una ampliación del margen de error, nada más que en el primer doblete en inclinación y en el segundo doblete en descentrado. El primer lente simple debe ser alineado según las especificaciones en Sánchez-Blanco (2011).

Para la cámara, como se menciona anteriormente, se tuvieron cuidados especiales, ya que es el subsistema más crítico para el espectrógrafo. La generación de imagen requiere de tolerancias más ajustadas y no hay mucho margen para el error.

En la figura 5.21 se muestra que en el parámetro de espesor las tolerancias deben mantenerse y ajustarse más donde sea posible, sobre todo en los lentes simples ya que son los que más afectan el desempeño de la función de mérito. Las tolerancias en los dobletes pueden relajarse ligeramente a excepción del D3 que demostró ser tan sensible como los lentes sencillos.

La cuña en Y resulta no ser un parámetro que genere conflicto en el desempeño, se puede observar, también en la figura 5.21, que todas las superficies analizadas están por arriba del requerimiento del diseñador.

Los dos parámetros más críticos en la cámara son los radios de curvatura y la cuña en X, el problema se ilustra en la figura 5.21, ambas son tolerancias que deben ser medidas en cada una de las superficies por lo que las hace más importantes, en el eje x es donde se forma imagen, por eso hay que tener bastante cuidado. Se deben mantener todas las especificaciones del diseñador. La cuña en X, como ya se habló en la sección 5.4.2, puede ser compensada a la hora del ensamble final pero eso no le quita importancia y se deben tomar las medidas adecuadas para limitar los errores en este parámetro, que idealmente en este sistema no debería tener cabida.

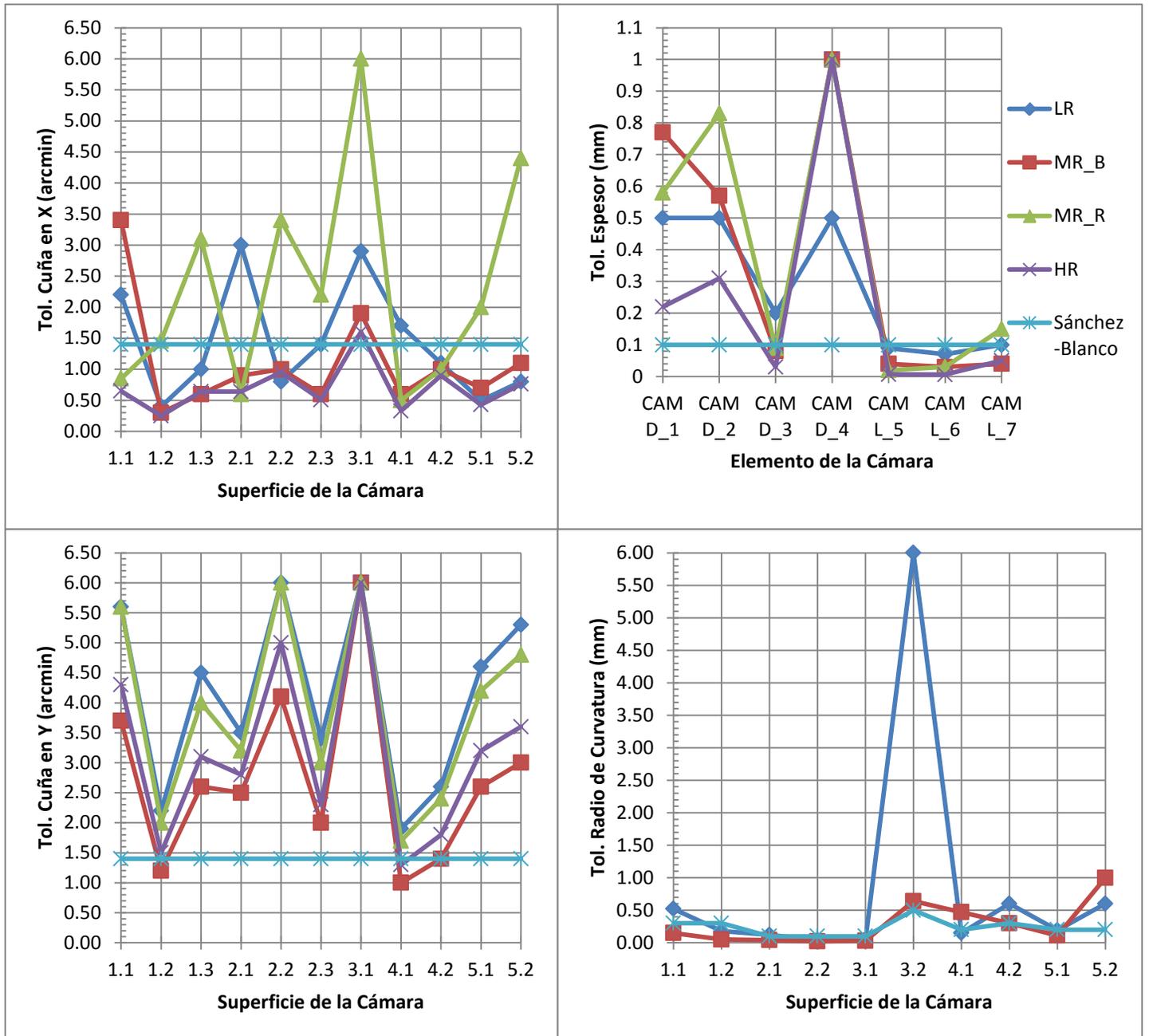


Figura 5.21: Comparativa de resultados del análisis inverso de tolerancias de fabricación de la cámara en las cuatro distintas resoluciones utilizadas y las tolerancias de diseño propuestas en Sánchez-Blanco (2011).

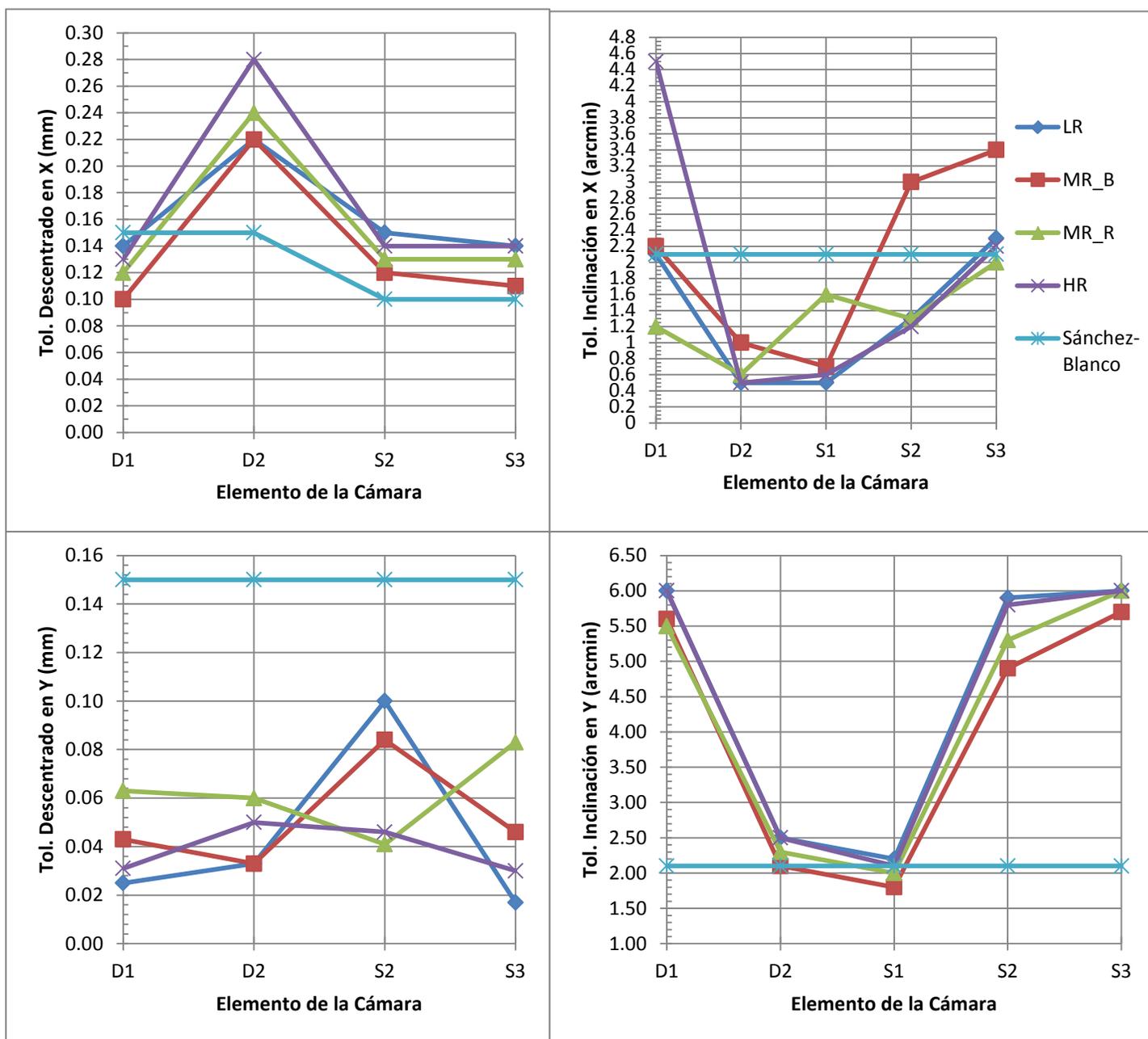


Figura 5.22: Comparativa de resultados del análisis inverso de tolerancias de alineación de la cámara en las cuatro distintas resoluciones utilizadas y las tolerancias de diseño propuestas en Sánchez-Blanco (2011).

En las tolerancias de ensamblado o alineación está claro que el parámetro más crítico es el descentrado en Y como se muestra en la figura 5.22. Contrario a lo que se

*Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias*

podría pensar sobre que las tolerancias de diseño son muy holgadas en este parámetro, de hecho son bastante ajustadas y conseguir las tolerancias arrojadas por el análisis inverso es muy complicado, lo que se tiene que hacer es ajustar lo más posible los márgenes de error de acuerdo a los instrumentos actuales y después compensar con el elemento S1 y además con la distancia focal final del sistema que se encuentra en el colimador.

Los resultados del análisis inverso también se pueden resumir en tablas comparativas entre las tolerancias de diseño y estos. Así quedará expresada de una manera explícita la diferencia entre ambas.

ELEMENTO	R1 (mm)		R2 (mm)		Espesor (mm)	
	Sánchez-Blanco(2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco(2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco(2011)	A. inverso
COLL L_1	-91.37±0.2	±0.2	-108.80±0.2	±0.2	32.5±0.15	±0.16
COLL D_1	Plano	Plano	-529.72±2	±8	42±0.15	±0.6
COLL D_2	-529.72±2	±8	-389.11±2	±2	42±0.15	±0.6
COLL D_3	1197.8±5	±5	346.3±0.5	±0.6	35±0.15	±0.6
COLL D_4	346.3±0.5	±0.6	-563.6±0.6	±1.4	45±0.15	±0.6

Continúa.

Cuña (arcmin)			Calidad de la Superficie (franjas @ 0.632nm)		Índice de Refracción	
Sánchez-Blanco(2011)	A. inverso S1	A. inverso S2	Sánchez-Blanco(2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso
±2	±2.3	±1.6	-	-	±1e-4	±4e-4
±2	±2.3	±7.7	2	8	±1e-4	±4e-4
±2	±7.7	±3.1	2	8	±1e-4	±4e-4
±2	±2.1	±3.4	2	8	±1e-4	±4e-4
±2	±3.4	±2.8	2	8	±1e-4	±4e-4

Tabla 5.75: Comparativa final de tolerancias de fabricación del colimador. Tolerancias de diseño vs tolerancias obtenidas por análisis inverso.

Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

Coeficiente de Asfericidad	R <sup>2</sup>		R <sup>4</sup>		R <sup>6</sup>	
	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso
Tolerancia (mm)	$\pm 2.77e-6$	$\pm 1.12e-5$	$\pm 7.7e-10$	$\pm 3.08e-9$	$\pm 2.14e-13$	$\pm 8.56e-13$

Tabla 5.76: Comparativa final de tolerancias de los coeficientes de asfericidad.

ELEMENTO	Inclinación en X (arcmin)		Inclinación en Y (arcmin)		Descentrado en X (mm)		Descentrado en Y (mm)	
	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso
Lente Simple (asfera)	$\pm 2.1$	$\pm 2^*$	$\pm 2.1$	$\pm 2^*$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2^*$	$\pm 0.3$	$\pm 0.2^*$
Doblete 1	$\pm 2.1$	$\pm 3.4$	$\pm 2.1$	$\pm 2.7$	$\pm 0.3$	$\pm 0.3$	$\pm 0.3$	$\pm 0.3$
Doblete 2	$\pm 2.1$	$\pm 1.8$	$\pm 2.1$	$\pm 2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.5$	$\pm 0.3$	$\pm 0.5$

Tabla 5.77: Comparativa final de tolerancias de alineación del colimador. Tolerancias de diseño vs tolerancias obtenidas por análisis inverso. \*El elemento mostró un desempeño pobre al introducir variaciones de alineación, pero es estable.

Se observa de los resultados expuestos en las tablas 5.75 a 5.77 que el colimador es un subsistema estable, ya que ninguna tolerancia produjo conflicto, de hecho varias de éstas se pueden relajar, se observan en color verde. En las tolerancias de alineación se observó que el primer elemento ofrece un desempeño pobre a cualquier variación, sin embargo es estable, es decir, que en un intervalo amplio la MF no cambia en lo absoluto, ni para mejorar ni para empeorar, entonces se llegó a la conclusión de mantener la tolerancia de diseño.

Capítulo 5: Análisis inverso de tolerancias

ELEMENTO	Espesor (mm)		Cuña (arcmin)		
	Sánchez-Blanco(2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco(2011)	A. inverso S1	A. inverso S2
CAM D_1	60±0.1	±0.22	±2	±1	±0.4
CAM D_2	30±0.1	±0.31	±2	±0.4	±1
CAM D_3	30±0.1	±0.05	±2	±0.9	±1.2
CAM D_4	60±0.1	±0.5	±2	±1.2	±0.8
CAM L_5	62±0.1	±0.01	±2	±1.8	-
CAM L_6	35.1±0.1	±0.01	±2	±0.5	±1.4
CAM L_7	26±0.1	±0.05	±2	±0.6	±1

Tabla 5.78: Comparativa final de tolerancias de fabricación de la cámara. Tolerancias de diseño vs tolerancias obtenidas por análisis inverso.

En la tabla 5.78 se observan los pocos resultados del análisis inverso que se pudieron concluir en las tolerancias de fabricación de la cámara, el espesor y la cuña. Llama la atención que al querer definir una cuña que depende de los dos ejes esta debe ser simétrica, y por ende, se toman los valores más pesimistas del análisis ya fuera en el eje X o en el eje Y y se les aplica una suma cuadrática. Se debe buscar una mejora para calcular o representar las tolerancias de cuña ya que es un problema estadístico en el que los resultados de esta tabla no reflejan necesariamente la realidad.

ELEMENTO	Inclinación en X (arcmin)		Inclinación en Y (arcmin)	
	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso
Doblete 1	±2.1	±1.2	±2.1	±5.5
Doblete 2	±2.1	±0.5	±2.1	±2.1
Lente Simple 1	±2.1	±0.5	±2.1	±1.8
Lente Simple 2	±2.1	±1.2	±2.1	±4.9
Lente Simple 3	±2.1	±2	±2.1	±5.7

Continúa.

Descentrado en X (mm)		Descentrado en Y (mm)	
Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso	Sánchez-Blanco (2011)	A. inverso
±0.15	±0.10	±0.15	±0.03
±0.15	±0.22	±0.15	±0.03
Compensador	-	Compensador	-
±0.1	±0.12	±0.15	±0.04
±0.1	±0.11	±0.15	±0.02

Tabla 5.79: Comparativa final de tolerancias de alineación de la cámara. Tolerancias de diseño vs tolerancias obtenidas por análisis inverso.

De la tabla 5.79 se tienen los valores de las tolerancias de alineación para la cámara donde los parámetros críticos se encuentran en el descentrado en Y y en la inclinación en X.

Se realiza un análisis más extenso de los parámetros críticos y de interés expuestos anteriormente en el capítulo 6.

## Capítulo 6: Conclusiones y trabajo a futuro

### 6.1. REVISIÓN Y CONCLUSIONES DE LAS TOLERANCIAS MÁS SENSIBLES DEL SISTEMA.

En el capítulo anterior se observó que algunas tolerancias son muy sensibles y según el análisis inverso habrá que ajustar un poco los márgenes de error. En esta sección se muestra un estudio de los parámetros más problemáticos. Se intenta descubrir si los resultados del análisis son confiables o si se deben a algún error de algoritmo. También se busca dar explicación a los resultados anteriores y mostrar alguna solución.

Lo primero es escoger los parámetros más problemáticos en el sistema, se pueden observar fácilmente en las figuras 5.20 y 5.21, se toman en cuenta aquellas que en el análisis inverso arrojaron un margen mucho más pequeño que el propuesto por el diseñador.

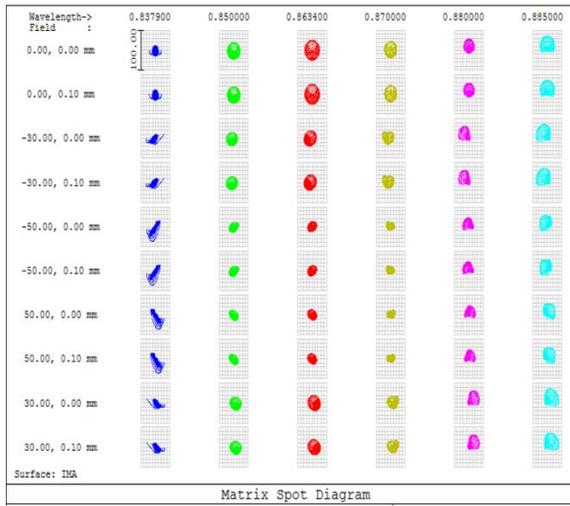
Los parámetros escogidos fueron todos relacionados con la cámara, que desde un principio se sabía que es el subsistema más sensible a errores. Los espesores de las lentes simples de la cámara, algunas cuñas y las tolerancias de alineación de estos mismos elementos en las configuraciones de HR y MR\_R.

Lo siguiente que se realizó fue comparar los diagramas de manchas de la configuración, con él mismo pero perturbando manualmente el parámetro de estudio para determinar como se comporta la MF. Se obtienen los datos de ésta en el eje y se observa como varía con pequeños cambios en el valor nominal del parámetro. Se elaboraron tablas recabando esta información y se analiza más adelante.

En la fig. 6.1 se muestra un ejemplo de comparación entre los diagramas de manchas en el elemento CAM\_L5 en la configuración de HR. En este caso se varía el espesor de dicho elemento y se obtiene información del cambio en la función de mérito. Se realizó esta misma comparación en todas las tolerancias mencionadas anteriormente.

Capítulo 6: Conclusiones y trabajo a futuro

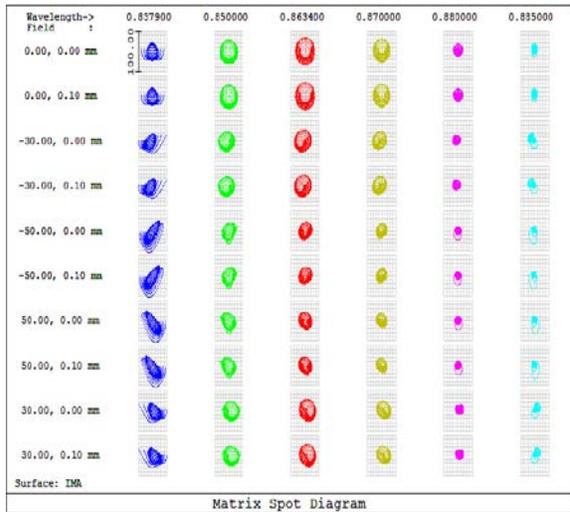
a)



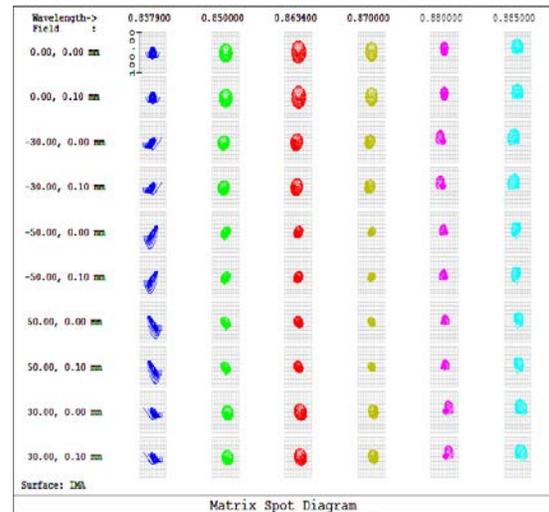
c)



b)



d)



e)

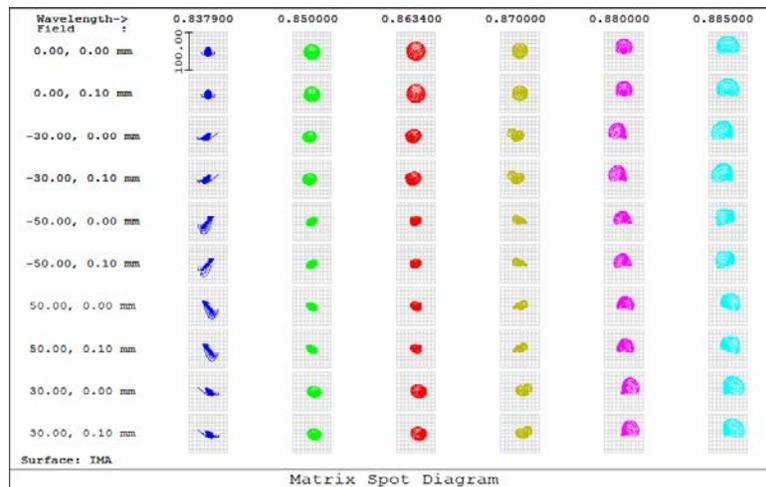


Figura 6.1: Ejemplo del estudio del diámetro de la mancha final en el sistema. Se perturbo el espesor del elemento CAM\_L5. a) Manchones de un desempeño nominal en los campos a lo largo de la rendija. b) Manchones en un sistema perturbado con el valor mínimo del margen de error. c) Manchones de un sistema perturbado con el valor máximo del margen de error. d) Manchones de un sistema perturbado con el valor mínimo del margen propuesto por análisis inverso. e) Manchones de un sistema perturbado con el máximo del margen propuesto por análisis inverso.

De los diagramas de manchas se puede ver que la primera longitud de onda de cada configuración es la más aberrada, los puntos se deforman bastante en el plano imagen.

La configuración MR\_R en su primera longitud de onda (674nm) no alcanza el detector en el eje, esto se puede deber al color transversal.

La mayoría de los manchones que se observan entre las tolerancias que propone el diseñador y las reajustadas expresadas en este trabajo son casi iguales, se debe comparar cada una para determinar cuales son las que están afectadas por el cambio de tolerancias. Significa que la solución es estable y que aunque se ajusten más algunos márgenes de error no se obtendrán beneficios sustanciales en el desempeño del sistema, por lo cual no hay que alarmarse si en el análisis inverso las tolerancias son más justas.

El comportamiento de la mancha fuera de eje es incluso mejor que en este en la gran mayoría sino es que en todas las configuraciones utilizadas en el análisis, por lo que utilizar cambios en la función de mérito en eje será suficiente para representar el desempeño en el sistema.

**6.1.1. Configuración HR Parámetro: Espesor**

Función de Mérito	CAM_L5	CAM_L6	CAM_L7
Nominal	1.21427E-02	1.21427E-02	1.21427E-02
Min	1.91716E-02	2.64015E-02	2.00402E-02
Max	1.64398E-02	2.33381E-02	1.71236E-02
Min Propuesto	1.20241E-02	1.22967E-02	1.20298E-02
Max Propuesto	1.28075E-02	1.34788E-02	1.28994E-02
Observaciones		+0.01mm MF de 1.20260E-02	

Tabla 6.1: Comparativa entre la MF nominal y la MF con espesores de los elementos de la cámara perturbados.

Se estudiaron los espesores de los tres lentes simples de la cámara. Se confirmó lo que arrojó el análisis inverso, se puede ver en la tabla 6.1 que los cambios en la MF son bastante bruscos en los tres elementos cuando se está en la configuración de HR. En el elemento CAM\_L6 la función de mérito mejora en el intervalo positivo de la tolerancia. Ajustar a  $\pm 0.01$ mm es conveniente en estos tres espesores, sobre todo en CAM\_L6, de no ser posible se requiere el mayor ajuste realizable.

**6.1.2. Configuración HR Parámetro: Cuña en X**

*Capítulo 6: Conclusiones y trabajo a futuro*

Función de Mérito	Sup. 1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
Nominal	1.214E-02	1.214E-02	1.214E-02	1.214E-02	1.214E-02	1.214E-02
Min	1.283E-02	1.244E-02	1.195E-02	1.380E-02	1.144E-02	1.199E-02
Max	1.156E-02	1.201E-02	1.239E-02	1.111E-02	1.318E-02	1.235E-02
Min Propuesto	1.243E-02	1.225E-02	1.210E-02	1.280E-02	1.162E-02	1.207E-02
Max Propuesto	1.188E-02	1.206E-02	1.225E-02	1.161E-02	1.283E-02	1.223E-02
Observaciones	+6arcmin MF de 1.070E-02	+2arcmin MF de 1.120E-02	-6arcmin MF de 1.175E-02	+2.4arcmin MF de 1.086E-02	-3arcmin MF de 1.113E-02	-3.6arcmin MF de 1.191E-02

Tabla 6.2: Comparativa entre la MF nominal y la MF con cuña en las superficies de la cámara.

Función de Mérito	Sup. 3.1	4.1	4.2	5.1	5.2
Nominal	1.21427E-02	1.21427E-02	1.21427E-02	1.21427E-02	1.21427E-02
Min	1.37274E-02	1.21075E-02	1.18249E-02	1.33525E-02	1.18967E-02
Max	1.11149E-02	1.22864E-02	1.25791E-02	1.12431E-02	1.24109E-02
Min Propuesto	N/A	1.21140E-02	1.19214E-02	1.26353E-02	1.20009E-02
Max Propuesto	N/A	1.21920E-02	1.24146E-02	1.17088E-02	1.22917E-02
Observaciones	+2.7arcmin MF de 1.09040E-02			+4arcmin MF de 1.06415E-02	-12arcmin MF de 1.08775E-02

Tabla 6.3: Continuación de la tabla 6.2. Comparativa entre la MF nominal y la MF con cuña en las superficies de la cámara.

En el caso de las cuñas en el eje X se puede observar en la tablas 6.2 y 6.3 que cada superficie de la cámara tiene un intervalo en el que se mejora la función de mérito dependiendo del radio de curvatura la cuña es tolerable hacia un lado o hacia otro. Estadísticamente en una distribución normal existen las mismas probabilidades en un

intervalo de tolerancias simétricas de obtener un valor positivo o uno negativo. Así pues al variar aleatoriamente la cuña (MC) los incrementos y decrementos en la función de mérito se compensan.

Sin embargo, si se quieren optimizar las tolerancias se podría dejar un margen más amplio del lado en el que la función de mérito mejora y ajustar más el margen restante, es decir, proponer tolerancias que no sean simétricas. Por ejemplo, en la superficie 1.1 se podría dejar el margen a  $+6 -0.8$ arcmin.

En la superficie 3.1 no se obtuvieron resultados con correspondencia en el análisis inverso, es decir, las tolerancias entregadas por el algoritmo no eran similares a las posibles manualmente, esto se puede deber a una cantidad de factores, uno de ellos es quizás que no se está usando nada más que la función de mérito en el eje, mientras que en los MC se calcula un promedio de las MF en todos los campos a lo largo de la rendija. Comparando diagramas de manchas se observa que la MF en el eje es representativa del promedio en la mayoría de los casos.

**6.1.3. Configuración MR\_R Parámetro: Inclinación en X**

Función de Mérito	D1	D2	S1	S2
Nominal	1.00728E-02	1.00728E-02	1.00728E-02	1.00728E-02
Min	1.06330E-02	1.03910E-02	1.01579E-02	1.07935E-02
Max	9.90012E-03	9.93832E-03	1.03226E-02	1.00285E-02
Min Propuesto	1.03692E-02	N/A	1.01174E-02	N/A
Max Propuesto	9.91947E-03	N/A	1.02530E-02	N/A

Tabla 6.4: Comparativa entre la MF nominal y la MF con inclinaciones de los elementos de la cámara perturbadas.

Con los parámetros de alineación se tiene un poco mas de libertad ya que el nivel de precisión que se puede alcanzar depende de los instrumentos para medir. Al igual que para la cuña los elementos mejoran o empeoran la función de mérito dependiendo si se inclina hacia los positivos o en ángulos negativos. En el elemento D2 y en el S2 se

## Capítulo 6: Conclusiones y trabajo a futuro

vuelven a tener inconsistencias con el análisis inverso por lo cual se deben respetar las tolerancias de diseño.

Para los valores propuestos por el análisis inverso no son más estrechos que  $\pm 1.2$  minutos de arco, lo cual es perfectamente alcanzable para inclinaciones. Las tolerancias de estos elementos se deben mantener entre 1.2 y 2 minutos de arco para reducir la degradación.

### 6.1.4. Configuración MR\_R Parámetro: Descentrado en Y

Función de Mérito	D1	D2	S2	S3
Nominal	1.00728E-02	1.00728E-02	1.00728E-02	1.00728E-02
Min	1.00987E-02	1.03528E-02	1.06540E-02	1.27011E-02
Max	1.03671E-02	1.03265E-02	9.80019E-03	1.12309E-02
Min Propuesto	1.00441E-02	1.01207E-02	1.01992E-02	1.10817E-02
Max Propuesto	1.01583E-02	1.01111E-02	1.00829E-02	1.02059E-02

Tabla 6.5: Comparativa entre la MF nominal y la MF con los elementos de la cámara descentrados.

El descentrado en y se puede decir que es el parámetro más problemático en la cámara, en especial en la configuración MR\_R que es muy sensible a las tolerancias de alineación. Las mediciones concuerdan con el análisis inverso lo que da luz a un problema de relajación estos márgenes de error deberían ser estrechados simétricamente en los elementos D1, D2 y S3 donde se deberían mantener entre  $\pm 0.06$  y  $0.08$  mm para evitar conflictos. El elemento S2 puede ayudar al desempeño final si se coloca con una inclinación positiva.

## 6.2. CONCLUSIONES GENERALES

- En la primera parte de esta tesis se presento un método de análisis de tolerancias directo, en el que se buscaba corroborar que las tolerancias de diseño en Sánchez-Blanco (2011) cumplieran con las expectativas de desempeño en la óptica del espectrógrafo MEGARA. Los objetivos particulares de la primera sección se

cumplieron al lograr reproducir los datos obtenidos por el diseñador y además se mejoró la precisión al muestrear diez veces más en las simulaciones MC, se compararon los resultados y fueron muy similares comprobando así que las tolerancias de diseño son factibles y responden a los requerimientos de imagen.

- La segunda parte se centró en aplicar el mismo método de análisis en un nuevo diseño (Noviembre 2011), pero esta vez se utilizaron cuatro configuraciones representativas en lugar de una sola, así se podría observar el comportamiento de las tolerancias en diferentes resoluciones y longitudes de onda. Los resultados fueron satisfactorios, ya que ninguna de las cuatro configuraciones utilizadas sobrepasó el requerimiento de  $19\mu\text{m}$  de radio rms aun considerando las demás fuentes de error ajenas a la fabricación o alineación.
- Para la parte final de este trabajo se buscó combinar los resultados óptimos de las simulaciones con un estudio extenso de cada una de las tolerancias problemáticas ubicadas por el análisis inverso que se realizó, en este se propone un cambio a la función de mérito y los márgenes de tolerancia son los que se varían. Esto sirvió para entender la importancia de algunos elementos en la óptica y a darse cuenta que parámetros son más críticos que otros mientras se daba un doble chequeo al desempeño del sistema.
- El análisis inverso como herramienta nos sirve para determinar que tolerancias se pueden aligerar y cuales deben ajustarse, pero no sólo eso, también ofrece una visión más amplia de lo que son los errores en la fabricación y ensamble. Se corroboró que el diseño no es una solución local, es decir, que la MF no se dispara en intervalos cortos de variación de algún parámetro. Se puede decir que este diseño pasó todas las pruebas a las que fue sometido y salvo algunas precauciones que tener con respecto a la cámara, el sistema es bastante robusto y sin duda cumplirá los requerimientos científicos una vez esté terminado.
- Este trabajo contribuye a optimizar el proceso de fabricación de la óptica y mecánica de MEGARA además de proveer soluciones a parámetros que por razones físicas como el índice de refracción, la longitud de onda, la geometría, etc. son más sensibles que otros en distintas configuraciones. Además de esto, se

## *Capítulo 6: Conclusiones y trabajo a futuro*

buscó ayudar al proyecto a dar más certeza a la afirmación de que el diseño es bueno y robusto. Teniendo contacto directo con el diseñador Sánchez-Blanco y estando al pendiente de cualquier problema para informárselo. Afortunadamente este estudio no encontró ninguna anomalía en el desempeño del espectrógrafo.

- Los análisis realizados en este trabajo surgen de la necesidad de optimizar los recursos de este paquete de trabajo (óptica) y de revisar el diseño de cara a la fabricación. El objetivo se cumple si se toman en cuenta las siguientes recomendaciones, que derivan de los análisis en los capítulos anteriores:
  - Mantener las tolerancias de espesor del colimador tan holgadas como sea permisible (ver tabla 5.75), ya que este elemento no es crítico y se pueden ahorrar cantidades importantes de tiempo.
  - Los radios de curvatura del colimador tienen variaciones muy pequeñas con respecto a las tolerancias de diseño, se recomienda mantener éstas a excepción de la de la segunda superficie de COLL D\_1 donde el radio es bastante grande y la tolerancia se puede holgar hasta cuatro veces.
  - La calidad de la superficie no parece ser un factor en el desempeño del sistema, mientras las franjas conserven su forma, no importaría ver hasta 8 franjas en el colimador o en la cámara. Lo mismo pasa con la tolerancia de índice de refracción y las tolerancias de los coeficientes de asfericidad, no causarán ninguna clase de problema, no habrá que utilizar recursos extra en ninguno de estos parámetros.
  - Aunque la cuña resulta ser más permisible en el colimador que en la cámara, se recomienda mantener las tolerancias de diseño para ambos subsistemas y todos los elementos que los comprenden dado que el análisis presentado tuvo problemas con este parámetro. Considerar tolerancias no simétricas.
  - En las tolerancias de alineación el primer doblete del colimador puede relajarse en inclinación, las demás tolerancias deben mantenerse.

- En los espesores de la cámara hay tres de los que se debe tomar ventaja, los dos elementos del primer doblete y el elemento CAM D\_4. Se debe tomar esa posibilidad de holgura y aprovecharla para ajustar este parámetro en otros elementos como lo son el CAM L\_5 y CAM L\_6 que resultan muy sensibles.
- Se deben mantener las tolerancias de diseño en inclinación de la cámara al igual que las de descentrado e incluso considerar márgenes de tolerancias no simétricos, para optimizar el desempeño.
- Los radios de curvatura de la cámara deben mantenerse a toda costa con las tolerancias de diseño, ya que mostraron mucha sensibilidad en los análisis de los capítulos 4 y 5.
- Utilizar el elemento CAM L\_5 como compensador, es una idea muy buena dada la sensibilidad que presenta en todos los parámetros.

### **6.3. TRABAJO A FUTURO**

El trabajo a seguir es realizar los análisis correspondientes al diseño final, que ya está listo, para mantener la confianza que se tiene en el diseño. Con las tolerancias problemáticas hay que buscar alternativas de estudio más a fondo utilizando todos los campos de visión y quizás otros algoritmos de análisis de tolerancias. Diseñar los recubrimientos de cada uno de los elementos. Incluir tolerancias de los prismas en el análisis. Al momento de fabricación supervisar los procesos para evitar problemas. Terminada la óptica, medir cada uno de los parámetros de cada uno de los elementos y compensar de ser necesario en el ensamble final.

Se deben estudiar a fondo, investigar o desarrollar métodos más eficientes para estudiar la tolerancia de cuña para optimizar sobre los dos ejes al mismo tiempo sin separar en X y Y, verificar que tan importante es este parámetro en la fabricación y como se controla.

Realizar simulaciones MC más robustas con las tolerancias obtenidas del análisis inverso para obtener un valor cuantitativo sobre las diferencias en el desempeño utilizando ambos conjuntos (diseño e inverso).

## *Capítulo 6: Conclusiones y trabajo a futuro*

La tesis se realizó con la ayuda de software óptico, ZEMAX, que es indispensable en la actualidad dada la cantidad de variables que se manejan en este tipo de análisis óptico. Los resultados se ponen a disposición del equipo de MEGARA para su estudio y consulta. Esta es una contribución al gran proyecto llevado por la UCM, el INAOE, el IAA, Fractal, y CIO que desean que el espectrógrafo vea su primera luz en 2015.

## Bibliografía

1. Adams, G. (1987). Tolerancing of optical systems. *Ph D. Thesis*. University of London, UK.
2. Carrasco, E., Páez, G., Martínez, C. J., Arredondo, L. M., Granados, F., & Percino, E. (2012). *MEGARA Optics: Manufacturing Plan at INAOE and CIO, TEC/MEG/083 I.C.*
3. Cassar, G., Vigier-Blanc, E., & Lépine, T. (2008). Improved tolerancing for production yield anticipation of optical micro-modules for cameraphones. *Proc. of SPIE Vol. 7100 71000F-1*.
4. Donnarumma, A., & Giorleo, G. (2002). A contribution to the study of tolerancing technology. *Int J Adv Manuf Technol 19*, 291-294.
5. Forse, D. (1996). Statistical tolerancing for optics. *Proc. SPIE 2775*, 18-27.
6. Grammatin, A. P., & Degen, A. B. (1973). Evaluating the ease of manufacturing of optical systems. *Sov J Opt Technol 40*, 464-465.
7. Grey, S. (1970). Tolerance sensitivity and optimization. *Appl Opt 9*, 523-526.
8. Grey, S. (1978). The inclusion of tolerance sensitivities in the figure of merit for lens optimization. *Proc. SPIE 147*, 63-65.
9. Hasenauer, D., & Zollers, M. (2011). *Optical Design Tolerancing. Synopsis*.
10. Hassani, A., Aifaoui, N., & Benamara, A. (2008). Computer aided tolerancing based on analysis and synthetizes of tolerances method. *4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics*. Sousse, Tunisia.
11. Heshmaty-Manesh, D., & Haig, G. Y. (1986). Lens tolerancing by desk-top computer. *Appl. Opt. 25*, 1268-1270.
12. Hopkins, H. H. (1957). The aberration permissible in optical systems. *Proceedings of the Physical Society B 70*, 449-470.
13. Juergens, R. C., & Wood, H. J. (2007). Random thoughts on Monte Carlo tolerancing. *Optical System Alignment and Tolerancing*. Proc. of SPIE Vol. 6676, 667605.
14. McLean, I. S. (1997). *Electronic Imaging in Astronomy, Detectors and Instrumentation*. England: Wiley.

15. Mouroulis, P., Sellar, R. G., & Wilson, D. W. (2007). Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy. *Optical Engineering* 063001.
16. Ngoi, B. K., & Ong, C. T. (1998). Product and process dimensioning and tolerancing techniques. A state-of-the-art review. *Int J Adv Manuf Technol* 14, 910-917.
17. Paz, A. G., Pérez, A., Sánchez-Blanco, E., Maldonado, M., Tulloch, S., Ferrusca, D., y otros. (2012). *MEGARA Preliminary Design: Instrument Overview*, TEC/MEG/059 2.B.
18. Pérez, A., & Sánchez-Blanco, E. (2012). *MEGARA Preliminary Design. Pseudo-slit discussion*, TEC/MEG/056 2.B.
19. Perrin, J.-C. (2007). Comparison of three methods for tolerancing opto-mechanical systems. *Proc. of SPIE Vol. 6676* 667602-2.
20. Radiant ZEMAX LLC. (2011). *ZEMAX optical design program user's manual*.
21. Rayleigh, L. (1879). Investigations in optics, with special reference to the spectroscope. *Philosophical Magazine* 8, 403-411.
22. Rimmer, M. (1970). Analysis of perturbed lens systems. *Appl. Opt.* 9, 533-537.
23. Sánchez-Blanco, E. (2011). *MEGARA Optical Error Budget*, TEC/MEG/026.
24. Sánchez-Blanco, E. (2012). *MEGARA Preliminary Design. Folded Cass Optics*, TEC/MEG/026 1.E.
25. Sánchez-Blanco, E. (2012). *MEGARA Spectrograph Optics: Thermal Analysis*, TEC/MEG/066 1.C.
26. Sánchez-Blanco, E., & Pérez, A. (2012). *MEGARA Preliminary Design. Spectrograph Optics*, TEC/MEG/058 2.B.
27. Shannon, R. R. (1997). *The Art and Science of Optical Design*. UK: Cambridge Univ. Press.
28. Smith, W. J. (2008). *Modern optical engineering*. Mc Graw Hill 4th Edition.
29. Strehl, K. (1902). Ueber Luftschlieren und Zonenfehler. *Z. Instrumentkd* 22, 213-217.
30. Turner, M. G., & Herlocker, J. A. (2009). From design to assembly: Getting the most from your optical software. *Optical System Allignment, Tolerancing and Verification III*. Proc. of SPIE Vol 7433 74330N-1.

31. Youngworth, R. N. (2006). 21st Century optical tolerancing: a look at the past and improvements for the future. *International Optical Design Conference*. SPIE-OSA.
32. Youngworth, R. N., & Stone, B. D. (2001). Elements of cost-based tolerancing. *Optical Review Vol. 8, No. 4*, 276-280.
33. Zhang, H.-C. (1997). *Advanced tolerancing techniques*. John Wiley.