



CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

**ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES  
EN EL DISEÑO DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACION  
PARA EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS (GTC)**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO

ACADEMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y  
TECNOLOGIA**

**EN LA ESPECIALIDAD DE  
DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS MECANICOS**

PRESENTA

**ING. VICENTE BRINGAS RICO**

QUERETARO, QRO. JUNIO 2004.



CIENCIA Y TECNOLOGIA

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis asesores, el Dr. Salvador Cuevas, Dr. Manuel Delgado, y MC. David Ortega por el apoyo y soporte durante el desarrollo de este trabajo.*

*También un agradecimiento muy especial, al equipo de trabajo del IAUNAM, Beatriz Sánchez, Carlos Espejo, Rubén Flores, Gerardo Lara y Oscar Chapa con los cuales compartimos todos los éxitos y las preocupaciones durante el desarrollo del proyecto.*

*Al Ing. Ángel Ramírez por su apoyo para la realización de los estudios, y al equipo de trabajo de Mecatrónica Líneas de Proceso: Rosa Espíndola, Gustavo Anguiano, Juan Manuel Montoya, Carlos Rangel, J. Luis González, Sadot Arciniega, Luis Eduardo Medina, Hugo Hernández, Rafael Toral, Armando Chavoya, Ariel Dorantes, Luis Orlando García, Agustín Ramírez y Salvador Vera, sin los cuales, no hubiese podido realizarse este proyecto.*

*A mis Padres por darme la vida.*

*Mi más profundo amor y gratitud, a mi esposa Fernanda y mi hijo Roberto, por el apoyo y comprensión, durante las largas jornadas de trabajo y estudio, a ellos, dedico en especial este trabajo, ya que sin ellos, no hubiera salido adelante, para ver concretada una gran ilusión, la de contribuir con un pequeño grano de arena, con esta herramienta, para la continua búsqueda del hombre por el conocimiento del universo.*

## INDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	I
Antecedentes.....	I
Los Grandes Telescopios.....	I
Objetivo del trabajo de Tesis.....	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	V
<b>PARTE I REQUERIMIENTOS DE DISEÑO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	1
1.1. Requerimientos particulares de diseño.....	1
1.2. Hipótesis.....	3
1.3. Normatividad.....	4
1.4. Definiciones.....	6
1.4.1. Exactitud.....	6
1.4.2. Aparato.....	6
1.4.3. Posición axial.....	6
1.4.4. Sistema de Coordenadas del Instrumento de Verificación.....	6
1.4.5. Daño Crítico.....	7
1.4.6. Estación Focal.....	7
1.4.7. Posición lateral.....	7
1.4.8. Tiempo Medio de Mantenimiento Preventivo Nocturno (MPMNT).....	7
1.4.9. Tiempo Medio entre Fallas (MTBF).....	7
1.4.10. Tiempo Medio de Reparación (MTTR).....	7
1.4.11. Exactitud Total.....	7
1.4.12. Repetibilidad Total.....	7
1.4.13. Repetibilidad.....	7
1.4.14. Resolución.....	8
1.4.15. Visión.....	8
1.4.16. Falla del sistema.....	8
<b>CAPÍTULO 2: REQUERIMIENTOS DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN</b> .....	9
2.1. Requerimientos generales.....	10
2.1.1. Requerimientos funcionales.....	10
2.1.2. Requerimientos de Rendimiento.....	10
2.1.3. Requerimientos del posicionador del Instrumento de Verificación.....	15
2.1.4. Caja del Instrumento.....	18
<b>PARTE II SOLUCIÓN PROPUESTA</b> .....	24
<b>CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO</b> .....	24
3.1. El Telescopio.....	24
3.2. El Instrumento de Verificación.....	25

3.3. La caja del instrumento.....	27
3.4. Ruedas de filtros.....	28
3.5. Rueda de cámara.....	29
3.6. Rueda de microlentes y aperturas de pupila.....	30
3.7. Obturador.....	31
3.8. Rueda de fibra de calibración.....	31
3.9. Posicionador de pupila.....	32
3.10. Platina de traslación del detector de CCD.....	33
3.11. Detector de CCD.....	34
3.12. Posicionador del instrumento.....	34
3.13. Mesa giratoria.....	35
3.14. Estructura principal.....	36
3.15. Estructura de soporte.....	36
3.16. Platina de enfoque.....	37
3.17. Gabinete de la electrónica y ducto de cableado.....	38
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES Y SU VERIFICACIÓN.....</b>	<b>39</b>
4.1. Diseño mecánico y metodología de verificación.....	39
4.2. Diseño óptico.....	40
4.3. Análisis RAMS.....	40
4.4. Herramientas de soporte y pruebas.....	40
4.5. Sistema de control y aceptación.....	40
4.6. Suministros, fabricación y ensamble.....	41
4.7. Integración en sitio y pruebas.....	41
4.8. Administración y sistemas de ingeniería.....	41
<b>PARTE III DISEÑO.....</b>	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO 5: DISEÑO MECÁNICO, PRESUPUESTOS DE ERROR Y PRUEBAS EN EL SISTEMA MECÁNICO.....</b>	<b>42</b>
5.1. Definición del sistema local de coordenadas.....	42
5.2. Masa de los componentes de la caja del instrumento.....	43
5.3. Masa total de los componentes del instrumento.....	43
5.4. Análisis de la estructura utilizando el Método de Elementos Finitos.....	44
5.4.1. Modelo Global.....	44
5.4.2. Condiciones de frontera.....	45
5.2.3. Elementos auxiliares.....	45
5.4.4. Desplazamientos gravitacionales.....	46
5.4.5. Análisis térmico.....	48
5.4.6. Análisis de frecuencias.....	49
5.4.7. Verificación Análisis de elementos finitos.....	49
5.5. Sumario de presupuestos de error para verificación de especificaciones.....	54
5.5.1. Sensibilidad óptica.....	55
5.5.2. Desplazamientos.....	55
5.5.3. Deformación gravitatoria residual.....	56
5.5.4. Desplazamiento térmico no modelado.....	57

5.5.5. Incertidumbre de posición lateral.....	57
5.5.6. Repetibilidad de la posición lateral.....	58
5.5.7. Estabilidad de posición lateral.....	58
5.5.8. Repetibilidad de la posición axial.....	59
5.5.9. Certificados de rendimiento de los componentes.....	59
5.6. Cálculos dinámicos.....	60
5.6.1. Mesa giratoria.....	60
5.6.2. Platina de enfoque.....	68
5.6.3. Cálculo de los retenedores y pivotes flexurales.....	73
5.6.4. Platina del detector.....	76
<b>CAPITULO 6: ÓPTICA ASTRONÓMICA.....</b>	<b>77</b>
6.1. Óptica adaptiva (Adaptive Optica).....	77
6.1.1. Efectos de la atmósfera en las imágenes de los telescopios.....	77
6.1.2. Aberraciones Ópticas.....	78
6.1.3. Principio de la Óptica Adaptiva.....	80
6.1.4. El telescopio ideal.....	82
6.1.5. Espejos segmentados deformables.....	83
6.1.6. Medición del frente de onda por Shack-Hartmann.....	84
6.1.7. Medición de frente de onda por el método de curvatura.....	86
<b>CAPÍTULO 7: ÓPTICA DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN.....</b>	<b>91</b>
7.1. Descripción de la óptica del instrumento.....	91
7.1.1. Unidad del colimador.....	95
7.1.2. Unidad de la cámara.....	94
7.1.3. Unidad del CCD.....	94
7.1.4. Arreglo de lentes.....	95
7.2. Modos de operación.....	95
7.2.1. Modo de imagen.....	95
7.2.2. Modos de Medición del Frente de Onda con el método de curvatura y medición de la intensidad de pupila.....	96
7.2.3. Medición del Frente de Onda con el método de Shack-Hartmann de alta resolución.....	97
7.2.4. Medición de la intensidad de pupila.....	97
<b>CAPÍTULO 8: DISEÑO DE LOS BARRILES DEL COLIMADOR Y LA CÁMARA.....</b>	<b>99</b>
8.1. Diseño de los barriles.....	99
8.1.1. Configuración de la óptica.....	99
8.1.2. Montaje de las lentes.....	99
<b>CAPÍTULO 9: ALINEACIÓN Y MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA CAJA DEL INSTRUMENTO.....</b>	<b>103</b>
9.1. Alineación y montaje de los componentes de la caja del instrumento.....	103
9.1.1. Alineación de la platina del CCD.....	103
9.1.2. Instalación de la fibra de calibración.....	104
9.1.3. Instalación de la ventana.....	104

9.1.4. Instalación del obturador.....	105
9.1.5. Alineación de la fibra óptica.....	105
9.1.6. Montaje de posicionador de pupila.....	106
9.1.7. Alineación del colimador.....	106
9.1.8. Alineación de la cámara.....	107
9.1.9. Montaje de las ruedas de filtros.....	107
9.1.10. Alineación del CCD.....	110
9.1.11. Alineación del arreglo de lentes.....	110
9.1.12. Alineación de la caja del instrumento y la platina de enfoque.....	110
<b>CAPÍTULO 10: DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD DEL INSTRUMENTO.....</b>	<b>113</b>
10.1. Introducción.....	113
10.2. Definiciones.....	113
10.3. Consideraciones matemáticas del RAMS.....	116
10.4. Análisis FMCEA.....	118
10.5. Análisis de seguridad.....	120
10.6. Prueba de verificación del RAMS.....	121
10.6.1. Descripción de la prueba.....	121
10.6.2. Resultados obtenidos.....	123
10.7. Resultados del análisis RAMS.....	123
10.7.1. Resumen RAMS para los componentes del Instrumento de Verificación.....	124
10.7.2. Resumen RAMS total del Instrumento de Verificación.....	127
<b>CAPÍTULO 11: SISTEMA DE CONTROL DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN.....</b>	<b>128</b>
11.1. El sistema de control.....	128
11.2. Definiciones.....	130
11.2.1. Backplane.....	130
11.2.2. CAN.....	131
11.2.3. CANopen.....	131
11.2.4. Perfiles de dispositivos CANopen.....	131
11.2.5. Módulos de bloques terminales.....	132
11.3. Configuración de la unidad de control de mecanismos (CI IMS LCU).....	133
11.4. Dispositivos CANopen.....	134
11.5. Configuración de control de los elementos del Instrumento.....	134
<b>CAPÍTULO 12: CONSTRUCCIÓN DEL INSTRUMENTO.....</b>	<b>136</b>
12.1. Construcción, ensamble e integración de la mecánica del Instrumento de Verificación.....	136
12.1.1. Construcción de los barriles de cámara y colimador.....	136
12.1.2. Ensamble del Posicionador del Instrumento.....	137
12.2. Validación del proceso del diseño en la construcción.....	140
12.3. El proceso de diseño en el Instrumento de Verificación.....	141
12.3.1. Enfoque tradicional del diseño.....	141
12.3.2. Gestión del diseño.....	141
12.3.3. Entendiendo el diseño.....	141

12.3.4. Preparación de la propuesta de ejecución del proyecto.....	143
12.3.5. Planeación del proyecto.....	145
12.3.6. Diseño conceptual.....	147
<b>CAPÍTULO 13: CONCLUSIONES.....</b>	<b>148</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>150</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>159</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>165</b>
<b>ANEXO 4.....</b>	<b>172</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS ADICIONALES.....</b>	<b>173</b>

### INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Condiciones ambientales.....	12
Tabla 2.2. Lineamientos de dimensiones de empaque.....	14
Tabla 2.3. Requerimientos de manejo y almacenaje.....	14
Tabla 2.4. Deformación de acuerdo a sistema de coordenadas 1.4.4.....	16
Tabla 2.5. Longitudes de onda centrales de los filtros.....	22
Tabla 5.1. Sistema de coordenadas.....	42
Tabla 5.2. Masa de la caja del instrumento.....	43
Tabla 5.3. Masa del Instrumento de Verificación.....	43
Tabla 5.4. Nodos de control.....	45
Tabla 5.5. Propiedades de los materiales para el análisis.....	45
Tabla 5.6. Desplazamientos en el eje x en el nodo del CCD.....	46
Tabla 5.7. Desplazamientos en el eje y en el nodo del CCD.....	47
Tabla 5.8. Desplazamientos en el eje z en el nodo de control del CCD.....	47
Tabla 5.9. Desplazamientos gravitacionales incluyendo la flexibilidad del rodamiento.....	48
Tabla 5.10. Desplazamientos por gradiente térmico.....	48
Tabla 5.11. Primeros 4 modos de vibración del instrumento.....	49
Tabla 5.12. Primeras dos frecuencias naturales del instrumento.....	51
Tabla 5.13. Resultados de deformación a incremento de la carga.....	53
Tabla 5.14. Deformación a diferentes ángulos en sentido CCW.....	54
Tabla 5.15. Desplazamientos de la imagen del CCD debido a desplazamientos laterales de la caja del instrumento.....	55
Tabla 5.16. Desplazamientos en la imagen del CCD debido al desplazamiento axial de la caja del instrumento.....	55
Tabla 5.17. Desplazamientos en la imagen del CCD debidos a la deflexión del rodamiento.....	55
Tabla 5.18. Cambios en el tamaño de imagen (rms) debidos al desplazamiento lateral de la caja del instrumento.....	56
Tabla 5.19. Incertidumbre de posición lateral.....	57
Tabla 5.20. Repetibilidad de posición lateral.....	58
Tabla 5.21. Estabilidad de posición lateral.....	58
Tabla 5.22. Incertidumbre de posición axial.....	59

Tabla 10.1. Clasificación de severidad S.....	119
Tabla 10.2. Clasificación de probabilidad P.....	119
Tabla 10.3. Resultados totales en ciclos de prueba.....	123
Tabla 11.1. Despliegue de bloques terminales para el Instrumento de Verificación..	133
Tabla 11.2. Elementos de la unidad de control de mecanismos (CI IMS LCU).....	133
Tabla 12.1. Requerimientos para el entendimiento del diseño.....	143
Tabla 12.2. Hoja de requerimientos para la planeación de proyecto.....	146

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Telescopios Keck.....	II
Figura 2. Uno de los cuatro telescopios VLT.....	II
Figura 3. Concepto de telescopio OWL.....	III
Figura 4. EURO 50.....	III
Figura 1.1. Layout del Instrumento de Verificación.....	1
Figura 1.2. Layout del Instrumento de Verificación en el foco Cassegrain Doblado.	2
Figura 1.3. Sistema de coordenadas del Instrumento de Verificación.....	6
Figura 2.1. Árbol de productos del Instrumento de Verificación.....	9
Figura 2.2. Haz de luz de entrada al telescopio.....	22
Figura 3.1. Vista general del GTC.....	24
Figura 3.2. Vista general del Instrumento de Verificación.....	25
Figura 3.3. Configuración del instrumento para los diferentes modos de observación.....	26
Figura 3.4. Vista general de la caja del instrumento.....	27
Figura 3.5. Conjunto de ruedas de filtros y soporte.....	28
Figura 3.6. Rueda de cámara en soporte con rueda de microlentes.....	29
Figura 3.7. Rueda de microlentes en soporte con rueda de cámara.....	30
Figura 3.8. Obturador.....	31
Figura 3.9. Rueda de fibra de calibración.....	32
Figura 3.10. Posicionador de pupila.....	33
Figura 3.11. Platina de traslación del CCD.....	33
Figura 3.12. Detector de CCD.....	34
Figura 3.13. Posicionador del Instrumento.....	35
Figura 3.14. Mesa giratoria.....	35
Figura 3.15. Estructura principal.....	36
Figura 3.16. Estructura de soporte.....	36
Figura 3.17. Platina de enfoque.....	37
Figura 3.18. Diagrama de ruta de cableado.....	38
Figura 5.1. Sistema local de coordenadas de la caja del instrumento.....	42
Figura 5.2. Pesado de la caja del instrumento.....	44
Figura 5.3. Modelo global de elementos finitos del instrumento.....	44
Figura 5.4. Elementos auxiliares.....	46
Figura 5.5. Desplazamientos totales en el eje x.....	46
Figura 5.6. Desplazamientos totales en el eje y.....	47
Figura 5.7. Desplazamientos totales en el eje z.....	47
Figura 5.8. Deformación térmica.....	48



Figura 5.9. Primer modo de vibración del instrumento.....	49
Figura 5.10. Instrumento con peso muerto en posición horizontal.....	50
Figura 5.11. Acelerómetro montado en el instrumento en posición vertical.....	50
Figura 5.12. Orientación de la estructura de soporte.....	51
Figura 5.13. Espectro para la primera frecuencia horizontal.....	51
Figura 5.14. Telescopio de alineación e indicador de carátula.....	52
Figura 5.15. Aplicación de la carga a estructura de soporte.....	52
Figura 5.16. Posiciones de medición.....	53
Figura 5.17. Medición de los desplazamientos.....	54
Figura 5.18. Posiciones del CCD al actuar el instrumento.....	56
Figura 5.19. Mesa giratoria y componentes montados en la estructura principal.....	60
Figura 5.20. Diagrama de movimiento de la mesa giratoria.....	61
Figura 5.21. Freno Sjogren SMB-120.....	63
Figura 5.22. Reductor STEALTH PS115 con motor VRDM3910.....	64
Figura 5.23. Sistema de motor-reductor y freno montados.....	65
Figura 5.24. Colocación del peso de prueba.....	65
Figura 5.25. Medición del par requerido.....	66
Figura 5.26. Peso de prueba en posición lateral.....	66
Figura 5.27. Medición del desplazamiento rotacional.....	67
Figura 5.28. Platina de enfoque con guías, husillo y motor.....	68
Figura 5.29. Caja del instrumento y platina montados en estructura.....	68
Figura 5.30. Sistema de retentor y pivote flexural montados en la rueda y engranaje de motor-rueda.....	73
Figura 5.31. Posición geométrica del retentor y la rueda.....	74
Figura 5.32. Platina del detector UTM 150.....	76
Figura 6.1. Frente de onda con aberración y el correspondiente desplazamiento en el plano focal.....	78
Figura 6.2. Coma como aberración de campo.....	79
Figura 6.3. Coma debida al desalineamiento.....	79
Figura 6.4. Imágenes tomadas con el Instrumento de verificación aberración esférica (izq) y coma (der).....	80
Figura 6.5. Sistema de Óptica Adaptativa.....	81
Figura 6.6. Imágenes del Keck con y sin corrección de turbulencia.....	81
Figura 6.7. Respuesta impulsional de un sistema óptico (imagen de estrella).....	82
Figura 6.8. Imagen sin (izquierda) y con (derecha) compensación de óptica Adaptativa.....	83
Figura 6.9. Espejo deformable.....	83
Figura 6.10. Espejos primario y secundario del GTC.....	84
Figura 6.11 Medición de frente de onda por Shack-Hartmann.....	84
Figura 6.12. Medición de la imagen.....	85
Figura 6.13. Frente de onda plano enfocado por una lente.....	86
Figura 6.14. Espejo segmentado.....	89
Figura 7.1. Alojamiento de la ventana de entrada.....	91
Figura 7.2. Colimador, soporte y separadores.....	92
Figura 7.3. Lentes del colimador.....	92
Figura 7.4. Conjunto de colimador y posicionador de pupila ensamblados.....	93
Figura 7.5. Conjunto de ruedas de filtros.....	93

Figura 7.6. Rueda de cámara.....	94
Figura 7.7. Platina de traslación del CCD con el VCCD montado.....	94
Figura 7.8. Rueda de lentes y aperturas.....	95
Figura 7.9. Modo de imagen con la cámara colocada ante el detector.....	95
Figura 7.10. Concentración de energía en el modo imagen para una longitud de onda de 626nm.....	96
Figura 7.11. Modos de medición de frente de onda en pupila y curvatura.....	96
Figura 7.12. Modo Shack-Hartmann.....	97
Figura 8.1. Configuración final de la óptica del instrumento.....	99
Figura 8.2. Lentes del colimador con sus líneas de apoyo de montaje.....	100
Figura 8.3. Lentes de la cámara con sus líneas de apoyo de montaje.....	100
Figura 8.4. Barril del colimador ensamblado con sus tolerancias de posición.....	101
Figura 8.5. Barril de la cámara ensamblado con sus tolerancias de posición.....	101
Figura 9.1. Montaje de telescopio de alineación.....	103
Figura 9.2. Platina del CCD montada en caja del instrumento.....	103
Figura 9.3. Rueda de fibra de calibración con fibra instalada.....	103
Figura 9.4. Instalación de la ventana.....	103
Figura 9.5. Obturador instalado en su posición.....	105
Figura 9.10. Alineación de la fibra con el telescopio de alineación.....	105
Figura 9.11. Montaje del posicionador de pupila.....	106
Figura 9.12. Colimador montado incluyendo posicionador de pupila.....	106
Figura 9.13. Conjunto de ruedas de cámara y arreglo de lentes montadas en posición.....	107
Figura 9.14. Ruedas de filtros montadas en la caja del instrumento.....	107
Figura 9.15. Pantalla de prueba de alineación y fibras de verificación del V-CCD montadas.....	108
Figura 9.16. Diagrama de manchas para las diferentes posiciones de campo (+/-20).....	109
Figura 9.17. Diagrama de manchas para las diferentes posiciones de campo (+/-10).....	109
Figura 9.18. Caja del instrumento montada en la estructura.....	110
Figura 9.19. Alineación de la caja del instrumento y la platina de enfoque.....	111
Figura 9.20. Simulador de secundario M2(FM2S).....	111
Figura 10.1. Sistema de pruebas de rueda de filtros.....	122
Figura 10.2. Sistema de pruebas en cámara climática.....	122
Figura 10.3. Condiciones del sistema después de la prueba.....	123
Figura 11.1. Ruta de señales desde la LCU a los dispositivos del instrumento.....	128
Figura 11.2. Layout de interfase entre las señales LCU del sistema de control (CICS).....	129
Figura 11.3. Instrumento de verificación con gabinete de la electrónica instalado....	130
Figura 11.4. Diagrama de conexión del VME con los demás elementos del sistema.....	130
Figura 11.5. Módulo y tarjetas de control CAN de CD Systems para el Instrumento.....	132
Figura 11.6. Conectores macho y hembra de 9 pines D-sub para el CAN.....	134
Figura 11.7. Conjunto de ruedas de filtros con motores y switchs instalados.....	135
Figura 11.8. Lay-out de interfase con la LCU y los mecanismos de las ruedas de filtros.....	135
Figura 12.1. Construcción de los barriles.....	136
Figura 12.2. Tapa de la cámara grabada y ensamble del colimador.....	137

Figura 12.3. Colocación de rodamiento sobre estructura principal (izq) y colocación de estructura de soporte (der).....	137
Figura 12.4. Preparación de la estructura de transporte y pruebas.....	137
Figura 12.5. Montaje del posicionador en la estructura de transporte y pruebas con el columpio.....	138
Figura 12.6. Caja del instrumento alineada y terminada lista para ser cubierta y montada.....	138
Figura 12.7. Montaje de la caja del instrumento.....	138
Figura 12.8. Alineación de la caja del instrumento.....	139
Figura 12.9. Pruebas de control de Instrumento de verificación.....	139
Figura 12.10. Imágenes tomadas durante las pruebas de aceptación del instrumento	140
Figura 12.11. Personal de GTC durante las pruebas de aceptación del instrumento..	140
Figura A.1.1. Certificado del rodamiento de la mesa giratoria.....	150
Figura A.1.2. Certificado de guías lineales de platina de enfoque .....	151
Figura A.1.3. Certificado de husillo de platina de enfoque.....	152
Figura A.1.4. Certificado del anillo de carga del columpio del instrumento.....	152
Figura A.1.5. Certificado de platina del CCD.....	153
Figura A.1.6. Certificado del reductor de la mesa giratoria.....	154
Figura A.1.7. Certificado del posicionador de pupila.....	155
Figura A.1.8. Certificado del obturador.....	156
Figura A.1.9. Certificado de construcción y tratamiento térmico de la estructura.....	157
Figura A.1.10. Certificado de medición de la base de la ventana de entrada.....	158

## GLOSARIO DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

rms	raíz cuadrada de la suma de cuadrados (promedio)
m	metros
s	segundos
°C	grados Celsius
mbar	milibar
Ton	toneladas
Hz	Hertz
g	aceleración de la gravedad
μm	micrómetros
mm	milímetros
μrad	microradianes
λ	longitud de onda de la luz
FoV	Campo de visión
CoG	Centro de masa
kg	kilogramos
N	Newton
U	desplazamiento
CW	medición en sentido horario
CCW	medición en sentido anti-horario
arc sec	segundos de arco
K	grados Kelvin
θ	desplazamiento angular
ω	velocidad angular
rad	radianes
t	tiempo
J	momento de inercia
m	masa
r	radio
T	par torsional
α	giro angular
η	eficiencia
Fs	factor de seguridad
l	Incertidumbre mínima de posición al radio dado
N-m	Newton metro
cm	centímetros
a	aceleración
Ncm	Newton centímetro

# *INTRODUCCIÓN*



### INTRODUCCIÓN

#### **Antecedentes.**

Debido a las capacidades y experiencia adquirida por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial CIDESI, en particular la Unidad de Negocio de Mecatrónica División Líneas de Proceso, en el diseño y construcción de maquinaria y equipo especial, para la industria de autopartes, la M. C. Beatriz Sánchez y el Dr. Salvador Cuevas, del Instituto de Astronomía de la Universidad Autónoma de México, IAUNAM se acercaron al CIDESI, para la participación conjunta en el proyecto; “Diseño y construcción de los Núcleos de Adquisición y Guiado para el Gran Telescopio Canarias (GTC)”, presentando una propuesta conjunta a la empresa española GRANTECAN S.A., la cual construye el GTC, que es un telescopio tipo Cassegrain con espejo primario de 10.4 m compuesto por 36 segmentos de espejo , el cual estará localizado en el Observatorio del Roque de los Muchachos en la Isla de la Palma en Canarias, dicha licitación fué ganada por la compañía AMOS de Bélgica no viéndose favorecido el equipo IAUNAM-CIDESI.

Del resultado de esta licitación y viendo posibilidades de obtener un contrato, el equipo del IAUNAM, propuso al CIDESI presentar nuevamente una propuesta para el “Diseño y Construcción del Instrumento de Verificación para el Gran Telescopio Canarias”..

La participación del equipo IAUNAM-CIDESI en este proyecto inició con los preparativos de la propuesta conjunta para licitación internacional, de Diseño y Construcción del Commissioning Instrument (Instrumento de Verificación) para el Gran Telescopio Canarias con fecha límite del 29 de septiembre de 2000 a las 17:00 horas.

Se compitió contra empresas europeas ganando dicha licitación, con un monto de \$ 547 133.63 euros, adjudicando al equipo IAUNAM-CIDESI el contrato la empresa GRANTECAN S.A. en día 8 de noviembre del 2000.

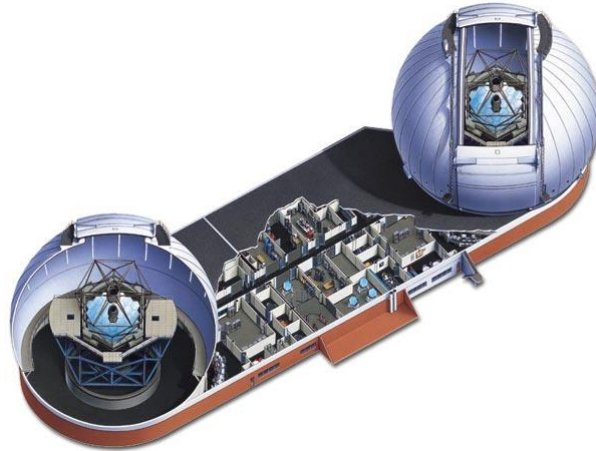
#### **Los Grandes Telescopios.**

La necesidad de observación a cada vez mayor distancia, con requerimientos de análisis más precisos, ha impulsado la tecnología a enfrentar grandes retos en la capacidad de construcción, de telescopios con mayor capacidad de colección de luz, y capaces de compensar las perturbaciones atmosféricas que limitan, la calidad de imagen de los mismos.

El costo tan elevado de diseño y construcción, de telescopios espaciales, así como sus altos costos de mantenimiento, han enfrentado a la comunidad científica y tecnológica dedicada a los instrumentos astronómicos a buscar soluciones en la construcción de telescopios terrestres de gran diámetro, o conjuntos de telescopios interconectados, esa búsqueda de esa mayor capacidad de colección de luz, con el consecuente poder de observación.

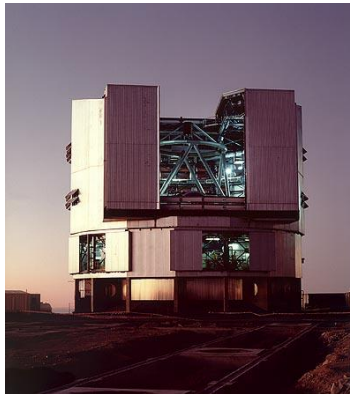
Entre los grandes proyectos de telescopios recientes se encuentran los siguientes:

Los telescopios americanos Keck<sup>1</sup>, los cuales son dos telescopios segmentados de 10 m de diámetro (Figura 1 ) localizados en Hawái.



*Figura 1: Telescopios Keck*

El observatorio europeo VLT (Very Large Telescope)<sup>2</sup> de la ESO (European Southern Observatory) localizado en el Observatorio del Paranal en el desierto de Atacama en Chile, el cual consiste en cuatro telescopios (Figura 2) de espejos monolíticos de 8 m de diámetro que pueden trabajar independientes o en combinación como un foco interferométrico.



*Figura 2: Uno de los cuatro telescopios VLT*

El proyecto de telescopio OWL<sup>2</sup> (Over Whelmingly Large) es un proyecto de ESO de un telescopio segmentado de 100 m de diámetro, el cual representa un gran reto tecnológico, y el salto a los telescopios gigantescos (Figura 3).

---

<sup>1</sup> [www.Keck.com](http://www.Keck.com)

<sup>2</sup> [www.eso.org](http://www.eso.org).

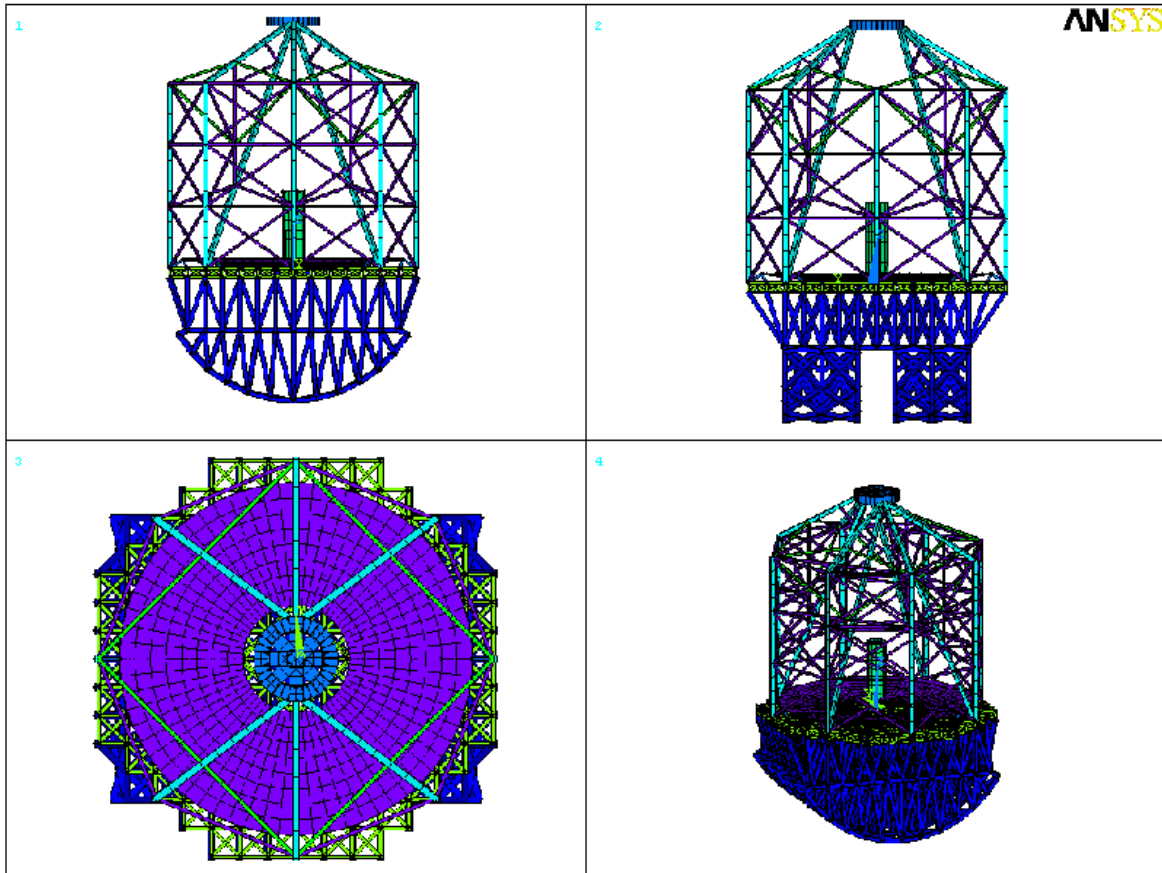


Figura 3: Concepto de Telescopio OWL

El proyecto del EURO 50<sup>3</sup>, propuesto por científicos de Irlanda, Finlandia, España y el Reino Unido, con espejo primario segmentado de 50 m con resolución de 2-3 milisegundos en el visible y 10 milisegundos en el infrarrojo (Figura 4)

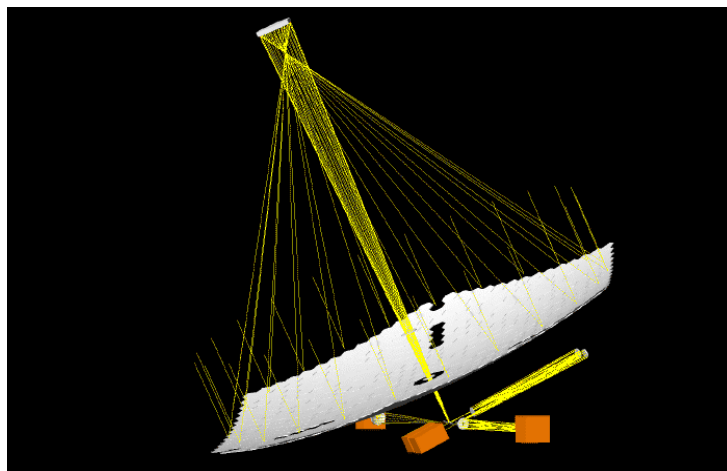


Figura 4: EURO 50

<sup>3</sup> [www.gtc.iac.es](http://www.gtc.iac.es)



Finalmente el GTC (Gran Telescopio Canarias), motivo de ésta tesis, el cual cuenta con un espejo primario segmentado de 10,4 m. Las novedades de éste telescopio es el ser el primer telescopio segmentado del mundo, que cuenta con un Commissioning Instrument (Instrumento de Verificación), que además de verificar la calidad de la óptica del telescopio, servirá como banco de pruebas para el fundamento del diseño de los ELT (Extremely Large Telescopes) como el OWL y el EURO 50, antes mencionados, ya que se verificarán los métodos de cofaseo mediante la medición de frente de onda por diferentes alternativas, entre ellas la medición del frente de onda por el método de curvatura, y medición de la pupila, el cual es la primera ocasión en usarse en un telescopio, dicho método propuesto por S. Cuevas<sup>4</sup> en Munich en el año 2000.

### **Objetivo del trabajo de TESIS.**

El presente trabajo de Tesis para la obtención del Grado de Maestro en Ciencia y Tecnología en la especialidad de Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos consiste en las siguientes contribuciones y objetivos dentro del proyecto:

- Desarrollo, ejecución y obtención de la fiabilidad del Instrumento y sus componentes, mediante análisis RAMS, siendo éste el primer análisis en su tipo que se realiza en México, para un Instrumento Astronómico.
- Obtención de la incertidumbre (presupuestos de error) del Instrumento de Verificación, así como los cálculos dinámicos que afectan dichos presupuestos con el fin de garantizar el cumplimiento de especificaciones. Siendo éste tipo de análisis, el primero que se realiza en el IA-UNAM y el CIDESI.
- El diseño de los barriles de la óptica, acordes al diseño de las lentes realizado por el IA-UNAM, garantizando dos objetivos principales, su factibilidad de fabricación, y el cumplimiento de las especificaciones del Instrumento. Estos barriles son los primeros en su tipo fabricados en México, ya que éste tipo de óptica sólo se fabrica en Europa.
- El diseño de las pruebas de comprobación de la incertidumbre y fiabilidad por métodos experimentales y de medición.

---

<sup>4</sup> “Curvature equation for segmented telescope”, Cuevas,S., Orlov,V., Garfias,F., Voisekhovich,V.V.,Sánchez, L.J, Proc. SPIE Vol.4003, Astronomical Telescopes: Optical Design, Materials, Fabrication, and Maintenance, Philippe Dierickx; Ed (Bellingham, WA: SPIE Press, pp 291-302, (2000)

**RESUMEN**

Durante la fase de integración del Gran Telescopio Canarias, el Commissioning Instrument que de ahora en adelante llamaremos por su nombre en español: Instrumento de Verificación, será una herramienta de diagnóstico, para la verificación del rendimiento y calidad del telescopio. El Instrumento de Verificación, consta de 4 modos de observación, imagen, imagen de pupila, medición de frente de onda por el método de curvatura y Shack-Hartman de alta resolución.

En el modo imagen el Instrumento de Verificación es un reductor focal, con una imagen accesible de pupila, con multi-aperturas insertadas, para medir la radiación de fondo, en el rango de espectro visible. En el Modo de imagen de pupila, el detector, es colocado en la pupila de imagen del telescopio, con el fin de identificar la luz dispersa. La medición del frente de onda es realizado con dos métodos curvatura y Shack –Hartman. Estos métodos son requeridos para el diagnóstico de la calidad de imagen, midiendo la figura de los segmentos y los errores de los pistones.

El Instrumento de verificación, será usado para verificar el foco Nasmyth. Una vez que la etapa de verificación y alineación este terminada el Instrumento será permanentemente montado en el foco Cassegrain doblado, tanto para imagen como para sintonizado de la imagen del telescopio. En adición, se planea instalar una pirámide de frente de onda con lo que servirá como banco de pruebas para la comparación de los métodos de cofaseo para los ELT (Extremely Large Telescopes) es decir los telescopios gigantes en un telescopio real segmentado.

**ABSTRACT**

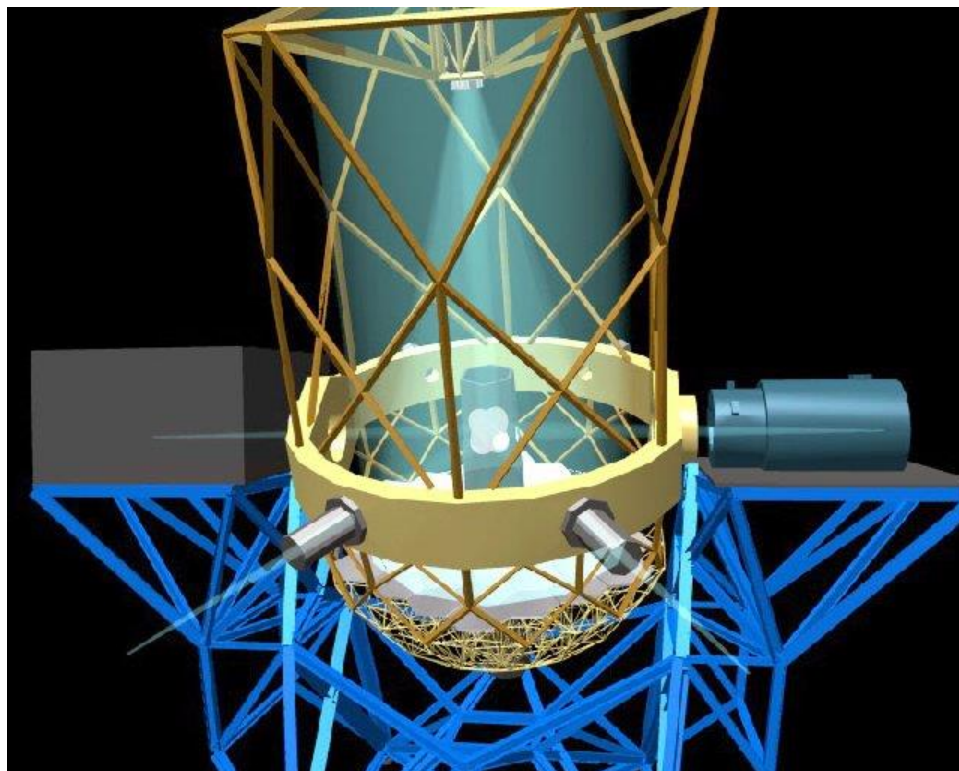
During the Gran Telescopio Canarias integration phase, The Commissioning Instrument, Instrumento de Verificación in Spanish, will be a diagnostic tool for telescope performance verification. The Commissioning Instrument features four operation modes, imaging, pupil imaging, Curvature Wave Front Sensing, and high resolution Shack-Hartman Wave Front Sensing.

In the imaging mode, the Commissioning Instrument is a focal reducer with an accessible pupil image with multi-size stops inserted to measure background radiation in the visible spectral range. In the pupil image mode, the detector is placed at the telescope pupil image in order to identify stray light. The Wave Front Sensing is performed by two methods, Curvature and high resolution Shack-Hartman. This two methods are required for the diagnostic of the quality image of the telescope, measuring the surface of the segments of the primary mirror and the piston errors.

The Commissioning Instrument will be used to verify the Nashmyth foci. After telescope commissioning, the instrument will be permanent mounted in the Cassegrain foci, for imaging and tune-up of the telescope. In addition in also planned to install Wave Front Sensing Pyramid, to serve as a test bench for comparing the co-phasing methods for Extremely Large Telescopes on a real segmented telescope.

# *PARTE I REQUERIMIENTOS DE DISEÑO*

## *CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA*



## PARTE I REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

### CAPITULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se describen los requerimientos de entrada para el diseño del Instrumento de Verificación (Commissioning Instrument) para el Gran Telescopio Canarias. Además se describe la normatividad aplicable durante el diseño, construcción, transporte e instalación. También las definiciones aplicables durante el proyecto con el fin de homogeneizar criterios con la Oficina de Proyectos del GTC.

#### 1.1 REQUERIMIENTOS PARTICULARES DE DISEÑO

El Instrumento de Verificación, debe ser diseñado y construido, de acuerdo a especificaciones del documento: ESP/OPTI/0124-R COMMISSIONING INSTRUMENT SPECIFICATIONS<sup>1</sup>, editado por la Oficina de proyectos de GRANTECAN S.A. descritas en punto 1.4 de este capítulo.

Además, con el fin de cumplir con su objetivo, de verificar el rendimiento y la calidad de imagen del GTC, el Instrumento de Verificación (Commissioning Instrument) (Figura 1.1) debe apegarse a las siguientes restricciones de diseño<sup>2</sup>:

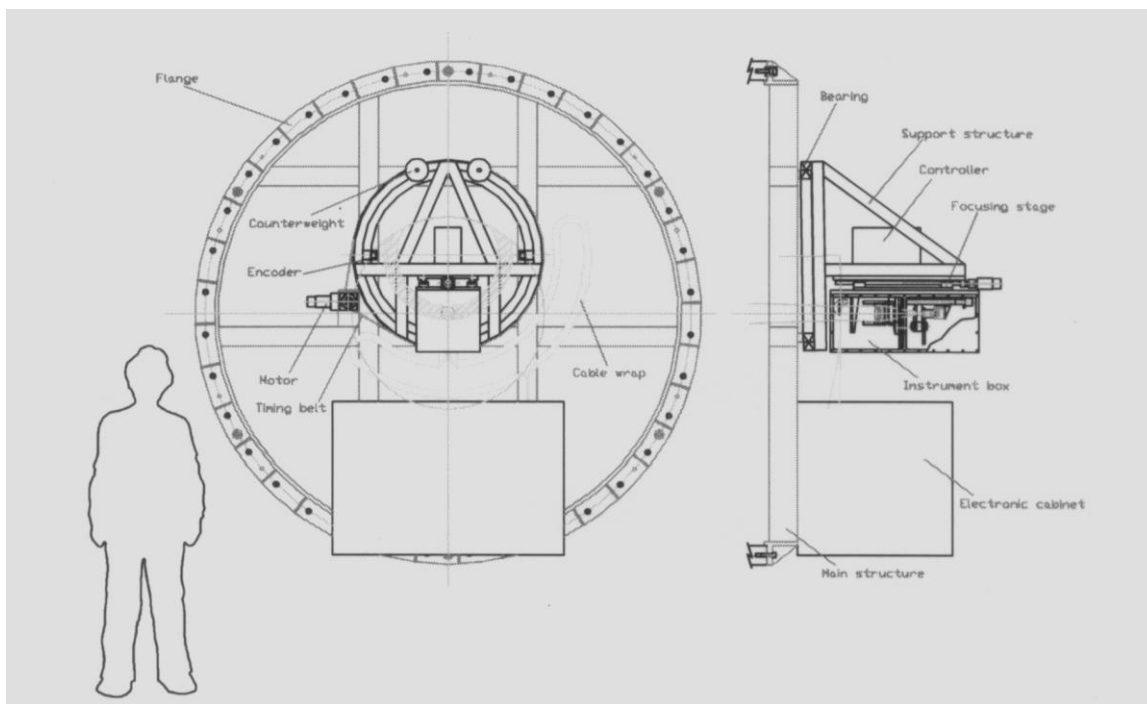


Figura:1.1 Layout del Instrumento de Verificación

<sup>1</sup> Commissioning Instrument Specifications; Nicholas Devaney, Luis Cavaller, Totty Jochum, PO, GTC, ESP/OPTI/0124-R, 1.A. 26/07 00

<sup>2</sup> Commissioning Camera Outline; Nicholas Devaney, PO, GTC, NTE/OPTI/0080-R, 1.A. 02/03/00

a.- Debe contar con 4 modos de observación: Imagen directa, Imagen de la pupila de salida, Medición de frente de onda, por medio de Shack-Hartman y curvatura, estos dos últimos en combinación con el sistema de Adquisición y Guiado del GTC.

b.- Debe estar dividido en dos subsistemas de diseño modular: Posicionador del Instrumento y Caja del Instrumento.

c.- El Posicionador del Instrumento debe ser dividido en 6 partes:

Estructura principal para montarse en el rotador Nasmyth .

Una Mesa giratoria , que al combinarse con el giro del rotador Nasmyth pueda colocar al instrumento dentro de un círculo de 20 minutos de arco centrados en el eje óptico del telescopio.

Una estructura de soporte montada en la mesa giratoria.

Una platina de enfoque, montada en la estructura de soporte sobre la que debe ir montada la caja del instrumento, para enfocar es decir corregir el campo de curvatura cuando el instrumento sea colocado fuera de eje.

La electrónica de control debe ser montada en un gabinete electrónico y fijada a la estructura principal del Instrumento usando las cajas de conexión y ductos necesarios para mantener el diseño modular.

Que la estructura de soporte (Figura 1.2) permita fijar la caja del instrumento al foco Cassegrain doblado del telescopio, separándola de la estructura principal.

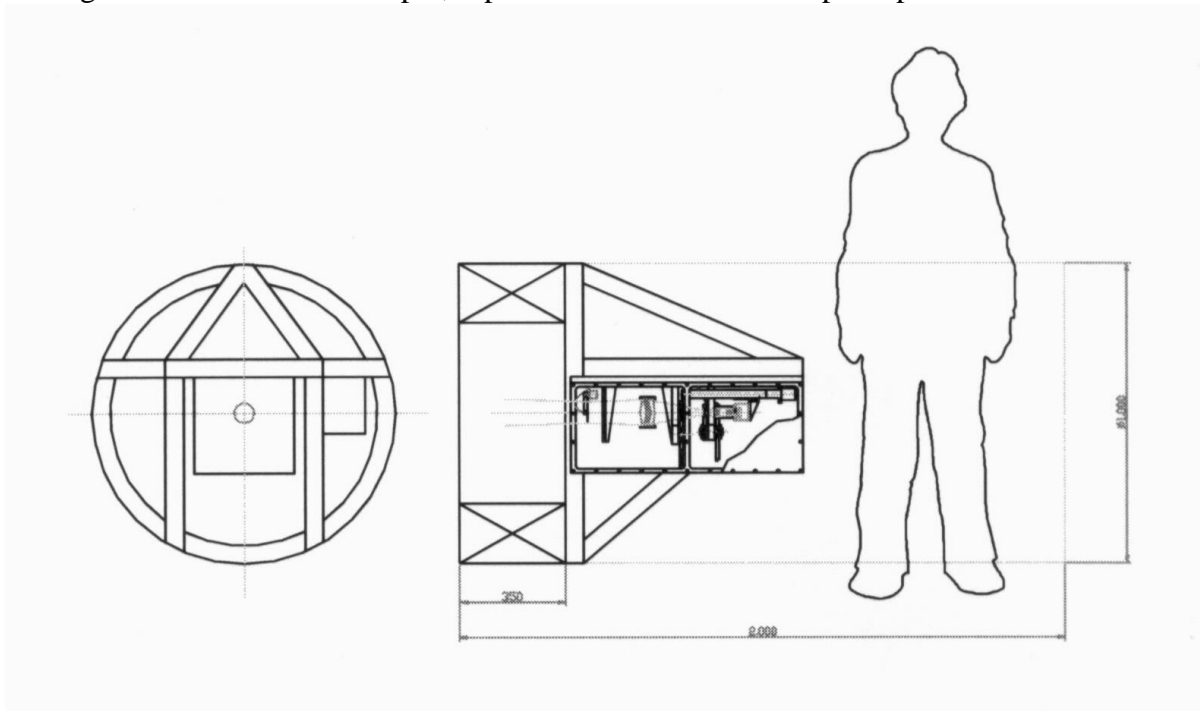


Figura 1.2: Layout del Instrumento de Verificación en el foco Cassegrain Doblado

## 1.2 HIPÓTESIS

Del planteamiento del problema anterior surgen las siguientes hipótesis de trabajo:

1.- Es posible determinar la confiabilidad del Instrumento desde su diseño conceptual, tomando en cuenta, materiales, interacción de componentes, vida esperada de componentes comerciales integrados, y cálculos de diseño. Sabiendo que éste es un diseño único. Garantizando un Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de 720 horas.

2.- Por lo anterior es posible garantizar una duración del Instrumento de 12 años, como lo especifica la Oficina de Proyectos de GTC.

En la tesis se describe el método y análisis de fiabilidad RAMS realizado por un servidor, para garantizar la fiabilidad del instrumento. Para ello hubo que realizar una investigación y análisis exhaustivo de los métodos empleados en Europa y Estados Unidos. Se propuso una forma de presentación y se diseñaron además pruebas para la verificación de los resultados. Este análisis también es la primera vez que se realiza para un instrumento astronómico en México, ya que sólo son realizados por la industria espacial y militar en el extranjero.

3.- Es posible cumplir con las especificaciones y requerimientos del documento: ESP/OPTI/0124-R COMMISSIONING INSTRUMENT SPECIFICATIONS, descritas en punto 1.4 de este capítulo.

4.- Es posible determinar métodos económicos y rápidos para comprobar que las especificaciones se cumplen.

Después de haber realizado un estudio de las especificaciones, el equipo de trabajo utilizando los argumentos anteriores entre otros llegó a la conclusión, de que nos era posible cumplir las especificaciones requeridas. En el trabajo de tesis se describen algunas de los métodos utilizados para la verificación de las mismas.

### 1.3 NORMATIVIDAD

A continuación se listan las Normas y estándares a utilizar durante el diseño y construcción del Instrumento de verificación.

<b>CODIGO</b>	<b>NOMBRE DEL DOCUMENTO</b>
ISO 9001 ver.94	Control de diseño y control de proceso
EN-292	Safety of Machinery Part 1 and 2
EN 61000-6-2	Electromagnetic compatibility (EMC)
EN 50081-2	Electromagnetic compatibility- Generic emission standard
MIL-STD-100	Engineering Drawing Practices
MIL-STD-471	Maintainability/Verification/Demonstration/Evaluation
MIL-STD-483	Configuration Management practices for Systems, Equipment, Munitions and computer programs.
MIL-STD-499	Engineering Management
MIL-STD-690	Failure Rate Sampling Plans & Procedures
MIL-STD-721	Definitions of Terms for Reliability & Maintainability
MIL-STD-973	Configuration Management
MIL-STD-1472	Human Design Criteria
MIL-STD-1629	Procedures for performing a failure modes effects and criticality analysis
MIL-HDBK-217	Reliability Prediction of Electronic Equipment
MIL-HDBK-472	Maintainability Prediction
MIL-HDBK-759	Human Factors Engineering
MIL-HDBK-781	Reliability test methods
MIL-HDBK-245	Preparation of Statement of Work (SOW)
ISO-10110	Optics and Optical Instruments- preparation of drawings for optical elements and systems
ISO-1101	Technical drawings- Geometrical tolerancing- Tolerancing of form, orientation, location and run out- Generalities, definitions, symbols, indications on drawings
ISO -1302	Technical drawings- Method indicating surface texture
ISO -2768-1 y 2	General tolerances part 1 and 2
ISO -7200	Technical drawings- Title blocks
ISO - 55457	Technical drawings- Sizes and layout drawings sheets
ISO - 128	Technical drawings- General principles of presentation
ISO -129	Technical drawings- General principles, definitions, methods of execution and special indicators
ISO - 5455	Technical drawings- Scales
ISO - 126	Technical drawings- General principles of presentation Views
ISO R 286	ISO system of limits and fits

Además de las normas y estándares antes mencionados para la construcción mecánica se usarán en la medida de lo posible componentes métricos de acuerdo a las siguientes especificaciones ISO:

R225- Pernos, tornillos y espárragos

R278- Tornillos y tuercas hexagonales

R724- Roscas de tornillo métrico para propósito general ISO

R887- Arandelas para pernos y tuercas hexagonales serie métrica

R1501- Roscas de tornillo miniatura ISO

ISO 2306 – Brocas para usarse antes de las roscas de tornillo

ISO 2340- Chavetas serie métrica

A continuación se listan los documentos de referencia de la Oficina de Proyectos del GTC, en los cuales se dictan los lineamientos de diseño para los diferentes elementos del Instrumento de Verificación así como su interfase con otros elementos del telescopio.

<b>CODIGO</b>	<b>NOMBRE DEL DOCUMENTO</b>	<b>EDICION</b>
PUB/STMA/0009-L	Integrated Logistic Support Applied to GTC Maintenance and Operations	1.A 20/02/98
ESP/STMA/0017-L	Conceptual Design GTC System Specification	1.H 29/02/00
PUB/STMA/0026-L	Baseline of the GTC operation and Maintenance Plan	1.A 29/02/00
DCI/STMA/0017-R	Interface Control Instrument Rotators Instrumentation	1.D 31/07/00
DCI/STMA/0018-R	Interface Control Instrumentation Telescope Structure	1.D 31/07/00
DCI/OPTI/0040-R	Interface Control Commissioning Instrument Detector and Controller	1.A 18/07/00
DCI/CTRL/0041-R	Interface Control - Control System Commissioning Instrument	1.A 28/07/00
ESP/CTRL/0043-R	Control System GTC Control System Hardware Standards	2.A 18/07/00
RPT/STMA/0075-R	System Engineering GTC Coordinate Systems	2.A 12/05/99
NTE/OPTI/0080-R	Commissioning Instrument Outline	1.A 02/03/00
NTE/OPTI/0090-R	Commissioning Instrument Optics	1.A 02/03/02
NTE/OPTI/0096-R	Instructions for Bidders for the RFP of the Commissioning Instrument	1.A 27/07/00
RPT/STMA/0102-R	Operation and Maintenance Baseline of Maintenance Plan	1.B 28/02/00
ESP/OPTI/0123-R	Optics Statement of Work for the Procurement of the Commissioning Instrument	1.A 26/07/00
ESP/OPTI/0124-R	Optics Commissioning Instrument Specifications	1.A 26/07/00
RPT/STMA/0129-R	Safety Program GTC Safety Program	1.A 15/03/00
RPT/OPTI/0142-R	Commissioning Instrument Preliminary Mechanical Design	1.A 12/07/00



## 1.4 DEFINICIONES

Las siguientes definiciones<sup>3</sup> son en base a la Oficina de Proyectos del GTC en su documento ESP/OPTI/0124-R 1.A del 26/07/2000 y son requeridas tanto para homologar términos en la interpretación de las especificaciones, como para los lineamientos del diseño del instrumento.

### 1.4.1 Exactitud

Este término se refiere tanto al concepto de exactitud total como la incremental, si alguno de estos conceptos no es mencionado explícitamente se considerará exactitud total.

### 1.4.2 Aparato

Este término se refiere a todos los elementos electrónicos o eléctricos, equipo, subsistemas e instalaciones que contengan componentes eléctricos o electrónicos, que sean capaces de generar perturbaciones electromagnéticas o puedan degradar en perturbación electromagnética. Este término no se refiere a:

Componentes individuales como circuitos integrados, tarjetas electrónicas, resistencias y capacitores que puedan ser instaladas en un aparato.

Módulos producidos en una serie de juegos de componentes elementales a ser ensamblados

Partes de equipo comercialmente disponibles que no puedan ser puestas en servicio por si mismas.

### 1.4.3 Posición axial

Posición a lo largo del eje Z del sistema de coordenadas del Instrumento de Verificación (ver 1.4.4).

### 1.4.4 Sistema de Coordenadas del Instrumento de Verificación

El sistema de coordenadas del Instrumento de Verificación<sup>4</sup> (Figura 1.3) es un sistema Cartesiano de mano derecha cuyo origen es el centro de la apertura óptica de la caja del instrumento. El eje Y está dirigido hacia el centro de la mesa giratoria. El eje Z es el eje óptico del instrumento de verificación.

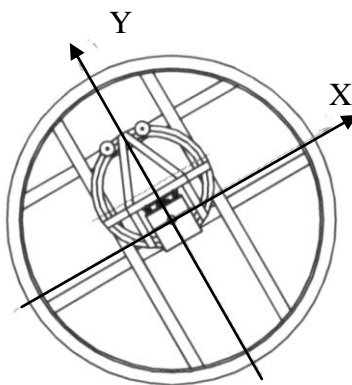


Figura 1.3: Sistema de coordenadas del Instrumento de Verificación (Z hacia el frente de la hoja).

<sup>3</sup> Commissioning Instrument Specifications, Nicholas Devaney, Luis Cavaller, Totty Jochum , PO, GTC, , ESP/OPTI/0124-R , 1.A. 26/07/00

<sup>4</sup> System Engineering; GTC Coordinate System, Alvaro Medina, PO, GTC, RPT/STMA/0075-R, 1.A. 12/05/99

#### **1.4.5 Daño Crítico**

Un daño crítico se refiere a cualquier daño que cause que la estructura se colapse, o se produzca un riesgo o decremento de la funcionalidad durante el ciclo de vida, esto es, un daño que pueda producir un decremento de los factores límite, tomados en cuenta durante el diseño de las estructuras.

#### **1.4.6 Estación Focal**

Una estación focal es un conjunto de equipos cerca de el foco correspondiente del telescopio el cual consiste en el sistema de Adquisición y Guiado, los instrumentos científicos, rotador de campo y de ser requerido los ductos de cableado de los instrumentos. Una estación focal también incluye los correctores de dispersión atmosférica o de campo.

#### **1.4.7 Posición lateral**

Es la posición en el plano XY del sistema de coordenadas del Instrumento de Verificación (ver 1.4.4).

#### **1.4.8 Tiempo Medio de Mantenimiento Preventivo Nocturno (MPMNT)**

El MPMNT es el tiempo nocturno por año en el cual el sistema no es operativo debido a un mantenimiento preventivo.

#### **1.4.9 Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)**

El MTBF es el tiempo medio entre dos fallas consecutivas de un sistema.

#### **1.4.10 Tiempo Medio de Reparación (MTTR)**

El MTTR para un sistema es el tiempo medio utilizado para hacer un mantenimiento correctivo al sistema.

#### **1.4.11 Exactitud Total**

La exactitud total es la medida estadística de las diferencias entre el valor real y el ideal para un número de eventos (mediciones ó actuaciones).

#### **1.4.12 Repetibilidad Total**

La repetibilidad total es la medición estadística de las diferencias entre un número de eventos (mediciones ó actuaciones) donde las condiciones son las mismas.

#### **1.4.13 Repetibilidad**

Este término se refiere a ambos conceptos repetibilidad total e incremental. Si uno de los términos no es mencionado específicamente se asume repetibilidad total.

#### **1.4.14 Resolución**

*Mecánica:* resolución es el incremento más pequeño detectable ya sea en movimientos ó mediciones en la cual la magnitud puede variar.

#### **1.4.15 Visión**

Visión se refiere al efecto de turbulencia atmosférica o local en los frentes de onda colectados por el telescopio. El valor numérico de visión esta dado por el ancho total al máximo medio de una imagen obtenida con un telescopio grande perfecto con un tiempo de exposición el cual es largo comparado con el tiempo de coherencia de la atmósfera.

#### **1.4.16 Falla del sistema**

Una falla del sistema es todo evento acontecido en el GTC el cual impide todas las actividades de observación científica planeadas.

## ***CAPÍTULO 2: REQRIMIENTOS DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN***



## CAPÍTULO 2 : REQUERIMIENTOS DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN

En este capítulo se describen los requerimientos de entrada específicos para el diseño del Instrumento de Verificación (Commissioning Instrument) para el Gran Telescopio Canarias. La siguiente figura muestra el árbol de productos y su código a emplear durante el diseño para una mejor comprensión de los requerimientos.

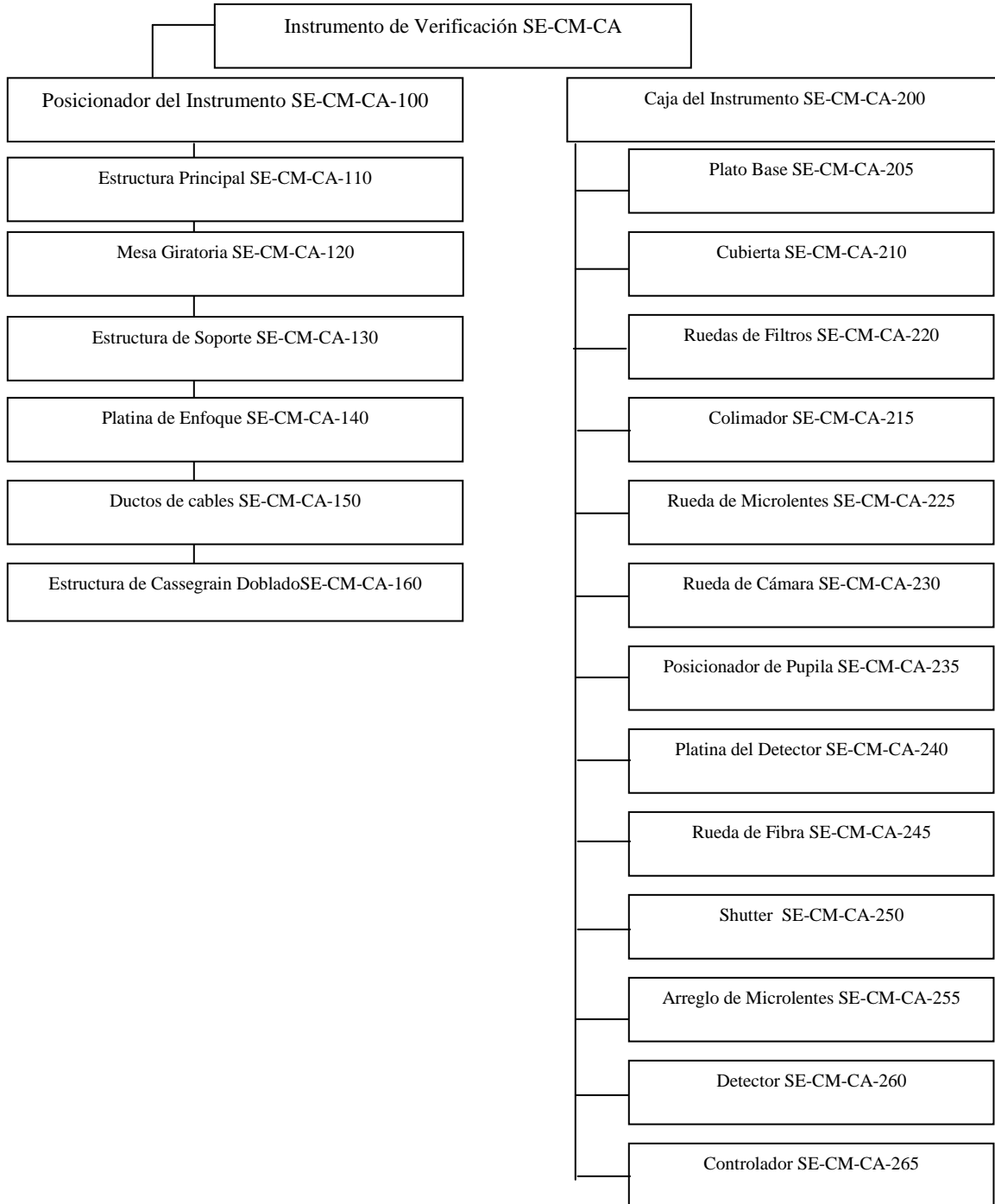


Figura 2.1: Árbol de productos del Instrumento de Verificación

## **2.1 REQUERIMIENTOS GENERALES**

Todos los requerimientos tienen el siguiente código:

SE/SE-CM-CA/N.N.N.N

N.N.N.N indica el índice antes del título del requerimiento

### **2.1.1 Requerimientos funcionales**

#### **2.1.1.1 Concepto**

El Instrumento de Verificación debe consistir de una caja que contenga la optomecánica montada en un posicionador el cual debe girar en el Rotador Nasmyth y el rotador Cassegrain.

#### **2.1.1.2 Modularidad**

El Instrumento de Verificación debe ser diseñado para que la caja del instrumento sea instalada en los focos Nasmyth y Cassegrain del GTC.

### **2.1.2 REQUERIMIENTOS DE RENDIMIENTO**

#### **2.1.2.1 Incertidumbre de posición lateral**

La incertidumbre rms bidimensional en la posición lateral del centro del detector en el modo imagen debe corresponder a menos de 0.02 segundos de arco en el cielo, bajo las condiciones ambientales descritas en 2.1.2.10.

#### **2.1.2.2 Repetibilidad de la posición lateral**

La repetibilidad rms bidimensional en la posición lateral del centro del detector en el modo imagen debe ser mejor de 0.1 segundos de arco en el cielo, bajo las condiciones ambientales descritas en 2.1.2.10.

#### **2.1.2.3 Estabilidad de la posición lateral**

La estabilidad rms bidimensional en la posición lateral del centro del detector en el modo imagen debe ser mejor de 0.1 segundos de arco en el cielo durante el cambio del vector gravedad a cualquier dirección nominal y a una variación de temperatura de 1.8°C.

#### **2.1.2.4 Repetibilidad de la posición axial**

La repetibilidad rms de la posición axial del centro del detector en el modo imagen debe ser un promedio rms de incremento en el tamaño geométrico de la imagen menor a 0.01 segundos de arco, bajo las condiciones ambientales descritas en 2.1.2.10.

### **2.1.2.5 Requerimientos de diseño**

#### **2.1.2.5.1 Temperatura de referencia**

La temperatura de referencia para todas las dimensiones y tolerancias, a menos que se especifique otra debe ser de 8.5°C.

#### **2.1.2.5.2 Lineamiento de vida útil**

La vida útil del Instrumento de Verificación debe ser como mínimo de 12 años

### **2.1.2.6 Requerimientos de características físicas**

#### **2.1.2.6.1 Entornos dimensionales**

Todos los entornos dimensionales del Instrumento de verificación son aquellos especificados en el documento DCI/STMA/0017-R. La caja del instrumento también debe cumplir lo especificado en el documento DCI/STMA/0018-R.

#### **2.1.2.6.2 Masa**

La masa máxima del Instrumento de Verificación debe estar de acuerdo a el documento DCI/STMA/0017-R. La masa de la caja del instrumento también debe cumplir lo especificado en el documento DCI/STMA/0018-R.

#### **2.1.2.6.3 Momento de inercia**

El momento de inercia máximo del Instrumento de Verificación debe ser el indicado en el documento DCI/STMA/0017-R.

### **2.1.2.7 Requerimiento de materiales**

#### **2.1.2.7.1 Lineamiento de expansión térmica**

El CTE de la estructura principal del Instrumento de Verificación debe ser lo más cercano posible al acero al carbón S275.J2.G3C como indica la norma UNE-EN-10025. (acero A36).

#### **2.1.2.7.2 Condición de material**

Todos los materiales usados en la fabricación deben ser nuevos y de la mejor calidad, y deben ser productos de línea de productores reconocidos. Deben tener certificados de análisis, pruebas e inspecciones de acuerdo a estándar, deben ser sometidos a rigurosas inspecciones visuales para que no tengan defectos o deformaciones causadas por abrasión, etc. Los materiales deben cumplir los estándares UNE, DIN o equivalente.

### **2.1.2.8 Recubrimientos, pintura o acabados superficiales**

#### **2.1.2.8.1 Tratamiento superficial**

Todas las partes del Instrumento de Verificación que estén en contacto o cerca de las trayectorias de luz, deben ser ópticamente negras.

### 2.1.2.9 Requerimiento de Compatibilidad Electromagnética

#### 2.1.2.9.1 Requerimiento de estándar EMC

Todos los aparatos el Instrumento de Verificación deben tener la marca EC de uso industrial. Esto significa que deben cumplir el estándar EN 50082-2 y el EN 61000-6-2.

#### 2.1.2.9.2 Lineamiento de estándar de emisión

Siempre que sea posible los aparatos del Instrumento de Verificación deben cumplir los niveles de emisión de acuerdo a estándar EN 50082-2.

#### 2.1.2.9.3 Estándares de productos ó familia de productos

Aquellos aparatos a los que se aplique cualquier estándar de producto o familia de productos aplican los criterios 2.1.2.9.1 y 2.1.2.9.2, es decir la inmunidad electromagnética debe ser maximizada y la emisión electromagnética minimizada.

### 2.1.2.10 Requerimientos de medio ambiente

#### 2.1.2.10.1 Condiciones ambientales

El Instrumento de Verificación debe ser diseñado para operar y sobrevivir las condiciones internas del domo del telescopio como indica la siguiente tabla:

	Condición Nominal	Límite de operación	Limite de sobrevivencia
Temperatura	-2°C a +19°C	-6°C a +30°C	-15°C a +35°C
Variación térmica (en la noche) en 15 minutos	0°C a 0.9°C	N/A	N/A
Variación térmica (en la noche) en una hora	0°C a 1.8°C	N/A	N/A
Variación térmica en la noche) en 2 horas	0°C a 2.4°C	N/A	N/A
Humedad relativa	2% a 87%	90% (o condensación)	0% a 100% con condensación
Presión atmosférica	770 a 790 mbar	N/A	N/A
Viento nominal máximo	0 a 14 m/s	24 m/s (avg 15 min) 30 m/s	N/A

Tabla 2.1: Condiciones ambientales

#### 2.1.2.10.2 Límite se supervivencia a terremotos

El Instrumento de Verificación debe ser capaz de soportar terremotos acorde al estándar NCSE-94 para el Observatorio del Roque de los Muchachos (asumiendo una vida de 50 años para el equipo) sin sufrir ningún daño crítico.



### **2.1.2.10.3 Lineamiento de polvo**

El diseño del Instrumento de Verificación debe asegurar su operación sin degradación al rendimiento requerido después de episodios de polvo provenientes del Desierto del Sahara.

### **2.1.2.10.4 Orientación nominal de la caja del instrumento**

La caja del instrumento debe operar dentro de los requerimientos de estas especificaciones con el vector gravedad actuando en cualquier dirección.

### **2.1.2.10.5 Orientación nominal del posicionador del instrumento**

El posicionador del instrumento debe operar dentro de los requerimientos de estas especificaciones con el eje Z formando un ángulo de menos de 92° con el vector gravedad.

## **2.1.2.11 Requerimientos de confiabilidad**

### **2.1.2.11.1 MTBF**

El Instrumento de Verificación debe tener un MTBF de al menos 700 horas

### **2.1.2.11.2 MTTR**

El Instrumento de Verificación debe tener un MTTR menor o igual a 4 horas.

## **2.1.2.12 Requerimientos de soporte**

### **2.1.2.12.1 Accesibilidad**

Con el fin de facilitar el mantenimiento de ser posible desmontar el Instrumento de Verificación y acceder a sus componentes de una manera directa desde la plataforma Nasmyth.

### **2.1.2.12.2 Lineamiento de desmontaje**

Debe ser posible desmontar la caja del instrumento sin desmontar el posicionador del Instrumento de Verificación.

### **2.1.2.12.3 MPMNT**

El Instrumento de Verificación debe tener un MPMNT de 0 horas.

## **2.1.2.13 Requerimientos de empaque, manejo y transporte**

### **2.1.2.13.1 Limpieza**

El equipo suministrado bajo esta especificación debe ser limpiado y preparado en el taller de construcción antes de embarcarse.

### **2.1.2.13.2 Lineamiento de dimensiones de empaque**

Las piezas a ser transportadas e integradas en el sitio del GTC en el Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma sin medios extraordinarios o acciones debe cumplir con la siguiente tabla:

	<b>Límite recomendado</b>	<b>Límite máximo</b>
Elevación (incluyendo empaque)	2.7 m (altura del trailer 1.3 m)	31. m (altura trailer 0.9 m)
Elevación total	4 m	4 m
Planta (ancho x largo) incluyendo empaque	Cualquiera desde 4.5 m x 6 m Hasta 2.5 m x 8 m	Cualquiera desde 4.5 m x 5.5 m Hasta 2.5 m x 12 m
Masa (excluyendo empaque)	12 Ton	19 Ton

Tabla 2.2: Lineamiento de dimensiones de empaque

La localización final de cualquier pieza particular dentro del GTC así como su secuencia de integración debe restringirse a los límites de la tabla. Adicionalmente los límites de masa aplican no solo a componentes individuales transportadas y manipuladas dentro del GTC sino también a estructuras preensambladas previas a su instalación.

#### 2.1.2.13.3 Obligaciones del contratista

La información de transporte y lineamientos provistos por la Oficina de Proyectos no libera al contratista de su responsabilidad de entregar los componentes y subensambles en el sitio del GTC en el Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma, integrados y completamente operacionales. Excepciones a esto deben ser autorizadas por escrito por la Oficina de Proyectos en caso de que procedan.

#### 2.1.2.13.4 Requerimientos de manejo y almacenaje

El diseño de los componentes y empaques debe prevenir el daño de los mismos bajo las condiciones de la tabla siguiente:

<b>Condición</b>	<b>Requerimiento</b>
Altitud	2250 a 2300 m
Variación de temperatura ambiente	11°C
Limpieza	Polvo ocasional, arena e insectos
Temperatura	-15°C a +35°C
Humedad relativa	0% a 100% con condensación
Presión atmosférica	770 a 790 mbar
Orientación de la gravedad	Todas las orientaciones
Vibración (sólo en elementos frágiles)	0.0008g <sup>2</sup> /Hz, 20 a 1000 Hz en todos los ejes
Impacto (sólo para elementos frágiles)	Aceleración pico 10g en todos los ejes

Tabla 2.3: Requerimientos de manejo y almacenaje

#### 2.1.2.14 Lineamiento de estandarización

Los componentes de los diferentes subsistemas deben ser estándar, comerciales y con buena disponibilidad en el mercado para facilitar el mantenimiento, con sus hojas de datos, los componentes con disponibilidad en las Islas Canarias son preferidos.

#### **2.1.2.15 Lineamiento de disipación de calor**

La disipación de calor del Instrumento de Verificación debe ser minimizada

#### **2.1.2.16 Lineamiento de máxima disipación de calor**

El Instrumento de Verificación debe disipar menos de 200 W de calor dentro de la cámara del telescopio.

#### **2.1.2.17 Requerimientos de interfase**

##### **2.1.2.17.1 Interfase con los detectores de CCD**

La interfase entre el Instrumento de Verificación y los detectores de CCD debe ser la especificada en el documento DCI/OPTI/0040-R.

##### **2.1.2.17.2 Interfase con el Sistema de Control**

La interfase entre el Instrumento de Verificación y el Sistema de Control debe ser como se define en el documento DCI/CTRL./0041-R.

##### **2.1.2.17.3 Interfase con el Rotador del Instrumento**

La interfase del Instrumento de Verificación con los rotadores Nasmyth o Cassegrain debe ser de acuerdo al documento DCI/STMA/0017-R.

##### **2.1.2.17.4 Tolerancias de montaje**

El desalineamiento del Instrumento de Verificación con respecto a su posición teórica debe ser menor a 0.32 mm en el plano XY y 25  $\mu$ rad alrededor de cualquier eje comprendido en el plano XY debido a las tolerancias de montaje en el rotador del instrumento.

### **2.1.3 REQUERIMIENTOS DEL POSICIONADOR DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACION**

Todos los requerimientos tienen el siguiente código:  
SE/SE-CM-CA-100/N.N.N.N

N.N.N.N indica el índice antes del requerimiento.

#### **2.1.3.1 Requerimientos Funcionales**

##### **2.1.3.1.1 Concepto del posicionador del Instrumento de Verificación**

En combinación con los rotadores Nasmyth y/o Cassegrain, el posicionador del Instrumento de Verificación debe colocar la entrada de la apertura de la caja del instrumento en cualquier parte dentro de un campo de 20 minutos de arco centrado el eje óptico del GTC.

##### **2.1.3.1.2 Posición de la pupila**

El eje óptico del Instrumento de Verificación debe ser alineado con el centro de la pupila de salida para cualquier campo del requerimiento 2.1.3.1.1.

##### **2.1.3.1.3 Platina de enfoque**

Una platina de enfoque debe ser provista para soportar la caja del instrumento y proveer la posición axial.

**2.1.3.1.4 Gabinete de la electrónica**

Un gabinete de electrónica debe ser montado en el posicionador del instrumento, y ser capaz de albergar los componentes de potencia y drivers de electrónica, la Unidad de Control Local del detector, y la Unidad de Control Local de los mecanismos y otros componentes requeridos el sistema.

**2.1.3.2 Requerimientos de rendimiento****2.1.3.2.1 Intervalo de movimiento**

El intervalo de movimiento del posicionador del instrumento debe permitir que la caja del instrumento sea colocada en cualquier posición del campo establecido en 2.1.3.1.1 cuando el instrumento es rotado +/- 180°.

**2.1.3.2.2 Tiempo de recorrido**

El tiempo de recorrido del posicionador del instrumento debe ser menor a 30 s para desplazamientos dentro del intervalo de movimientos establecido en 2.1.3.1.1.

**2.1.3.2.3 Deflexión gravitacional**

La máxima deformación gravitacional del Instrumento de Verificación correspondiente a desplazamientos en el centro del detector con el vector gravedad actuando en cualquier dirección se indica en la siguiente tabla:

<b>Deformación</b>	<b>Valor</b>
Ux (desplazamiento a lo largo de X)	16 $\mu\text{m}$
Uy (desplazamiento a lo largo de Y)	16 $\mu\text{m}$
Uz (desplazamiento a lo largo de Z)	26 $\mu\text{m}$

*Tabla 2.4: Deformación de acuerdo a sistema de coordenadas definido en 1.4.4*

**2.1.3.2.4 Eigenfrecuencias**

Todas las eigenfrecuencias del Instrumento de Verificación, incluyendo a aquellas de los modos locales, cuando esté completamente ensamblado deben estar por encima de los 60 Hz o comprendidas entre 35 y 45 Hz.

**2.1.3.2.5 Carrera de la platina de enfoque**

El intervalo mínimo de la platina de enfoque debe ser +75/-10 mm con respecto al plano focal al centro del campo de visión de la Nasmyth. (un movimiento positivo es considerado hacia la brida de sujeción al rotador).

**2.1.3.2.6 Tiempo de recorrido de la platina de enfoque**

El tiempo de recorrido de la platina de enfoque debe ser menor de 15 s para desplazamientos de 70 mm.

**2.1.3.2.7 Repetibilidad de la platina de enfoque**

La repetibilidad de la platina de enfoque debe ser mejor de 10 $\mu\text{m}$ .

#### **2.1.3.2.8 Paralelismo de la platina de enfoque**

El recorrido de la platina de enfoque debe ser paralelo al eje óptico del Instrumento de Verificación, con un valor mejor de 0.5 mm sobre el recorrido especificado en 2.1.3.2.5.

#### **2.1.3.2.9 Repetibilidad de montaje de la caja del instrumento**

La repetibilidad de la posición de la caja del instrumento con respecto al posicionador del instrumento debe ser mejor de 0.1 mm en el plano XY en el sistema de coordenadas del Instrumento de Verificación y 75  $\mu$ rad alrededor de cualquier eje comprendido en el plano XY, cuando la caja del instrumento es desensamblada del posicionador del instrumento.

#### **2.1.3.2.10 Control térmico del gabinete de la electrónica**

El gabinete electrónico debe ser aislado de disipar menos de 100 W de calor al aire circundante.

### **2.1.3.3 Requerimientos de diseño**

#### **2.1.3.3.1 Desconexión por paro del posicionador del instrumento**

El posicionador del instrumento debe mantener su posición cuando no tiene energía.

#### **2.1.3.3.2 Sensores de temperatura**

Sensores de temperatura deben ser previstos para monitorear la temperatura del Instrumento de Verificación con una resolución mejor que 0.1°C.

#### **2.1.3.3.3 Distribución de los sensores de temperatura**

Sensores de temperatura deben ser previstos para monitorear la temperatura del Instrumento de Verificación con el fin de predecir los cambios en dimensión de al menos de 6  $\mu$ m sobre el intervalo de temperatura nominal y las variaciones térmicas.

#### **2.1.3.3.4 Ductos de cables**

Ductos de cables deben ser previstos para conducir los cables desde la mesa giratoria al gabinete de la electrónica.

#### **2.1.3.3.5 Cajas de conexión**

Cajas de conexión deben ser previstas en el posicionador del instrumento y en los ductos del rotador para facilitar la instalación y remoción del instrumento.

#### **2.1.3.3.6 Separación de cables**

Los cables de potencia y de control deben ser separados lo más posible para prevenir interferencias de señal.

#### **2.1.3.3.7 Calentamiento del agua glicolada suministrada**

La temperatura del agua glicolada suministrada por el telescopio para enfriamiento de los racks electrónicos no debe ser mayor de 4°C.

## **2.1.4 CAJA DEL INSTRUMENTO**

Todos los requerimientos en esta sección tienen el código siguiente:

SP/SE-CM-CA-200/N.N.N.N

N.N.N.N indica el índice antes del requerimiento.

### **2.1.4.1 Requerimientos funcionales**

#### **2.1.4.1.1 Modo de imagen**

El Instrumento de Verificación debe tener un modo de operación que provea imágenes del cielo en el detector.

#### **2.1.4.1.2 Modo de imagen de pupila**

El Instrumento de verificación debe tener un modo de operación que provea una imagen de la pupila de salida del GTC en el detector.

#### **2.1.4.1.3 Modo de curvatura**

El Instrumento de Verificación debe proveer de un modo de medición de curvatura de frente de onda.

#### **2.1.4.1.4 Modo de Shack-Hartmann**

El Instrumento de Verificación debe proveer de un modo de medición de frente de onda Shack-Hartmann.

#### **2.1.4.1.5 Lineamiento de concepto de óptica del Instrumento de Verificación**

El Instrumento de Verificación debe ser una cámara-colimador con intercambio de los diferentes modos de operación realizados por la inserción / remoción de la cámara óptica y un desplazamiento axial del detector.

#### **2.1.4.1.6 Ruedas de Filtros**

El Instrumento de Verificación debe incluir dos ruedas de filtros, referidas aquí como rueda de filtros 1 y rueda de filtros 2, respectivamente, cada una de ellas debe contener 7 posiciones para filtros o aperturas claras.

#### **2.1.4.1.7 Obturador**

El Instrumento de Verificación debe incluir un obturador para bloquear el paso de luz al detector.

#### **2.1.4.1.8 Fuente de calibración**

Debe ser posible insertar y remover un punto fuente en el plano de imagen del telescopio, para propósito de calibrar los modos de operación de medición de frente de onda.

#### **2.1.4.1.9 Apertura del campo de medición de frente de onda**

Debe ser posible insertar y remover un campo de apertura en el plano de imagen del telescopio con el propósito de limitar el campo de visión, en el modo de medición de frente de onda que lo requiera.

#### **2.1.4.1.10 Rueda de aperturas de pupila y arreglo de lentes**

Debe ser posible insertar aperturas de pupila o arreglo de lentes en la imagen interna de la pupila de salida del GTC.

#### **2.1.4.1.11 Posicionador de pupila**

Debe proveerse un mecanismo que permita a la imagen de pupila colimada moverse lateralmente con dos grados de libertad con el fin de corregir los desalineamientos entre la caja del instrumento y la pupila de salida del telescopio.

### **2.1.4.2 Requerimientos de rendimiento**

#### **2.1.4.2.1 Intervalo de longitud de onda del modo imagen**

La transmisión, la eficiencia de quantum del detector y la calidad de imagen del Instrumento de Verificación, debe ser optimizada sobre un intervalo de longitud de onda de  $0.38 \mu\text{m} < \lambda < 1.0 \mu\text{m}$ , para uso en el modo imagen.

#### **2.1.4.2.2 Modo de transmisión de imagen**

La transmisión del foco del telescopio al foco del detector del instrumento debe ser de al menos 0.7 sobre el intervalo de longitud de onda 0.5-0.6  $\mu\text{m}$  cuando no hay filtros interpuestos.

#### **2.1.4.2.3 Calidad óptica en el eje del modo imagen**

En el modo imagen, cuando el eje óptico del Instrumento de Verificación coincida con el eje óptico del GTC, el diámetro de la imagen que circunda el 80% de la energía en el intervalo de longitud de onda dado en 2.1.4.2.1, calculado usando trazo geométrico de rayos debe ser de al menos 0.2 segundos de arco para imágenes en el centro del campo de visión del instrumento.

#### **2.1.4.2.4 Campo de visión del modo imagen**

El campo de visión del Instrumento de verificación en el modo imagen debe ser de un minuto de arco por un minuto de arco.

#### **2.1.4.2.5 Calidad óptica fuera del eje en el modo imagen**

La calidad óptica en el modo imagen debe ser optimizada sobre el campo de visión dado en 2.1.4.2.4.

#### **2.1.4.2.6 Escala de la imagen en el modo imagen**

La escala de la imagen del Instrumento de Verificación en el modo imagen debe ser de 0.0586+/- 0.005 segundos de arco por píxel.

#### **2.1.4.2.7 Número de aperturas de pupila**

Debe ser posible insertar dos aperturas de pupila de diferentes diámetros de claro en la imagen interna de la pupila de salida del GTC.

#### **2.1.4.2.8 Número de arreglos de lentes**

Debe ser posible insertar un arreglo de lentes en una posición conjugada del espejo primario del GTC.

#### **2.1.4.2.9 Tamaño de la imagen de pupila**

El diámetro del círculo que circunscribe la imagen de la pupila de salida del Instrumento de Verificación debe ser de 11.98 mm

#### **2.1.4.2.10 Medición de frente de onda y intervalo de longitud de onda de imagen de pupila**

La calidad de la imagen de transmisión del Instrumento de Verificación debe ser optimizada, sobre el intervalo de longitud de onda de  $0.60 \mu\text{m} < \lambda < 0.90 \mu\text{m}$  para uso en los modos curvatura, Shack-Hartmann e imagen de pupila.

#### **2.1.4.2.11 Campo de visión de medición de frente de onda e imagen de pupila**

El campo de visión del Instrumento de Verificación debe ser de 6 segundos de arco por 6 segundos de arco, cuando se usa curvatura, Shack-Hartmann e imagen de pupila.

#### **2.1.4.2.12 Distorsión de pupila**

La distorsión de la imagen de pupila debe ser menor del 0.5% sobre el campo de visión (2.1.4.2.11) y sobre el intervalo de longitud de onda (2.1.4.2.10) correspondiente a los modos de imagen de pupila, curvatura, y medición de frente de onda Shack-Hartmann.

#### **2.1.4.2.13 Pendientes de frente de onda en la pupila**

En los modos imagen de pupila, curvatura y medición de frente de onda Shack-Hartmann, al menos el 80% de las pendientes de frente de onda debe ser menor de 0.1 segundos de arco, sobre el correspondiente campo de visión (2.1.4.2.11) y el intervalo de longitud de onda (2.1.4.2.10).

#### **2.1.4.2.14 Intervalo de movimiento del detector**

Debe ser posible mover el detector en los planos siguientes

- en el foco del colimador-cámara
- en la imagen de la pupila de salida del GTC
- En los planos conjugados correspondientes a +/- 719 mm con respecto al foco del telescopio
- En el plano 9.44 mm después de la imagen de la pupila de salida del GTC.

#### **2.1.4.2.15 Intensidad de la fuente de calibración**

La fuente de calibración debe tener una intensidad remotamente ajustable entre 0 y 1 microwatt en un haz de f/15.46.

#### **2.1.4.2.16 Uniformidad de la fuente de calibración**

La salida de la fuente de calibración debe ser uniforme dentro de un 20% sobre el haz f/15.46.

#### **2.1.4.2.17 Salida espectral de la fuente de calibración**

No más del 20% de la salida de la fuente de calibración sobre longitudes de onda del intervalo de 0.6-0.9  $\mu\text{m}$  debe ser contenida en las líneas de emisión.

#### **2.1.4.2.18 Repetibilidad del posicionamiento de la fuente de calibración**

Debe ser posible la posición de la fuente de calibración en el eje con una repetibilidad de 100  $\mu\text{m}$ .



**2.1.4.2.19 Tamaño de la fuente de calibración**

El ancho completo al medio máximo de la fuente de calibración debe ser de al menos  $400 \pm 50 \mu\text{m}$ .

**2.1.4.2.20 Claro de apertura del obturador**

Cuando abre, el obturador no debe de obstruir el campo de visión del instrumento.

**2.1.4.2.21 Tiempo de exposición mínimo del obturador**

El tiempo mínimo de exposición del obturador debe ser de al menos 500 ms.

**2.1.4.2.22 Lineamiento de exposición mínima del obturador**

El tiempo mínimo de exposición del obturador debe ser de 5 ms.

**2.1.4.2.23 Lineamiento de exposición máxima**

El obturador debe permitir tiempos de exposición de 14 minutos.

**2.1.4.2.24 Exactitud del tiempo de exposición**

La exactitud de la exposición efectiva debe ser mejor del 1% sobre el completo campo de visión para exposiciones mayores de 1 segundo.

**2.1.4.2.25 Lineamiento de velocidad del obturador**

El obturador debe tener un tiempo muerto máximo de 1 segundo

**2.1.4.2.26 Intervalo del posicionador de pupila**

El posicionador de pupila debe tener la habilidad de desplazar la imagen de la pupila  $\pm 200 \mu\text{m}$  en cada uno de sus dos grados de libertad.

**2.1.4.2.27 Repetibilidad del posicionador de pupila**

El posicionador de pupila debe ser capaz de posicionar la imagen de la pupila con una repetibilidad mejor de  $5 \mu\text{m}$ .

**2.1.4.2.28 Repetibilidad del posicionador del detector**

La repetibilidad axial del posicionador del detector debe ser mejor de  $10 \mu\text{m}$ .

**2.1.4.2.29 Tiempo de carrera del detector**

El tiempo de carrera del posicionador del detector debe ser de 30 s para desplazamientos en el intervalo completo de movimiento requerido en 2.1.4.2.14.

**2.1.4.2.30 Paralelismo del posicionador del detector**

El viaje del posicionador del detector debe ser paralelo al eje óptico del Instrumento de Verificación con un valor mejor de  $0.5 \text{ mm}$  sobre el intervalo requerido en 2.1.4.2.14.

**2.1.4.3 Requerimientos de diseño**

**2.1.4.3.1 Propiedades del haz de entrada**

Las propiedades ópticas del haz de entrada del telescopio se muestran en la Figura 2.2.

**2.1.4.3.2 Ventana de entrada**

La cubierta de la caja del instrumento debe tener una ventana de entrada con el fin de prevenir la acumulación de polvo en los componentes optomecánicos.

**2.1.4.3.3 Rueda de filtros 1**

La rueda de filtros 1, debe proveer de filtros de densidad neutral con valores 0.4, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 y también una posición clara. Los filtros deben tener recubrimiento antirreflejante y una planitud de superficie comparable con lo requerido en 2.1.4.2.3.

**2.1.4.3.4 Rueda de filtros 2**

Es la rueda cercana al detector y debe proveer de filtros de banda I, B, V; R y dos filtros de banda angosta . Las longitudes de onda centrales de los filtros de banda angosta son las presentadas en la tabla 2.5. Los filtros deben tener recubrimiento antirreflejante y planitud acorde a 2.1.4.2.3. Una posición clara debe ser prevista también.

$\lambda$ centro	$\Delta\lambda$
700 nm	100 nm
800 nm	100 nm

Tabla 2.5: Longitudes de onda centrales de los filtros

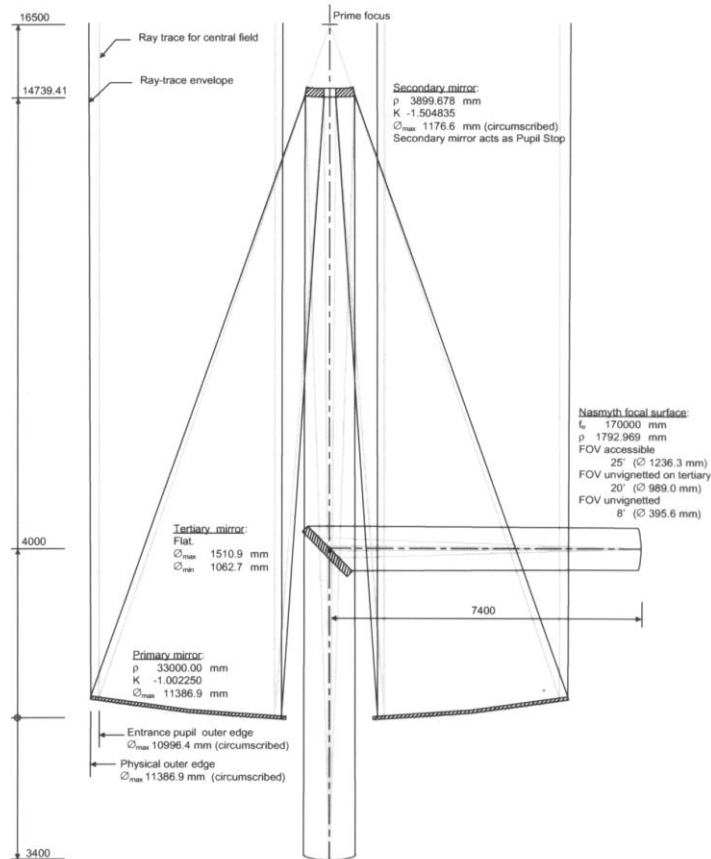


Figura 2.2: Haz de luz de entrada al telescopio

#### **2.1.4.3.5 Compensación de foco de filtros**

Los filtros deben ser diseñados para producir un foco constante incorporando ventanas adicionales de vidrio óptico. Los elementos de cada filtro y cualquier ventana adicional deben ser pegados juntos.

#### **2.1.4.3.6 Tamaño de las aperturas de pupila**

Las aperturas de pupila deben ser de un 10 % de sobre tamaño con respecto al círculo que circunscribe la imagen de la pupila de salida del GTC y la imagen inscrita en la pupila del GTC respectivamente.

#### **2.1.4.3.7 Repetibilidad de la inserción de la cámara**

La repetibilidad de la inserción óptica de la cámara debe ser tal que la repetibilidad de la posición de la imagen en el detector sea mejor de 0.1 segundos de arco en el cielo ( en el modo imagen).

#### **2.1.4.3.8 Lineamiento de telecentricidad del modo imagen**

La cámara de Verificación debe ser telecéntrica al espacio de imagen en el modo imagen.

#### **2.1.4.3.9 Luz dispersa y rechazo de imágenes fantasmas**

El diseño del Instrumento de Verificación debe proveer de rechazo de luz dispersa en el tren óptico por medio de baffles. Cualquier imagen fantasma debe ser menor de un 1% de su imagen fuente.

## ***PARTE II SOLUCIÓN PROPUESTA***

### ***CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO***



## PARTE II SOLUCIÓN PROPUESTA

### CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO

En este capítulo, se describe el Telescopio, el Instrumento de verificación y el modelo de solución propuesto, así como la descripción detallada de sus partes, y su función.

#### 3.1 EL TELESCOPIO

El GTC Gran Telescopio Canarias<sup>1</sup> (Figura 3.1) consta de un espejo primario M1 de 10.4 m constituido por 36 segmentos hexagonales movidos por pistones que los inclinan para formar perfecto paraboloide simulando un espejo monolítico. A su vez dichos pistones deforman la superficie de los segmentos para compensar las aberraciones de la imagen debido a perturbaciones de la atmósfera por lo cual el GTC cuenta con óptica adaptativa y activa que le brinda una calidad de imagen superior a los telescopios existentes de menor tamaño.

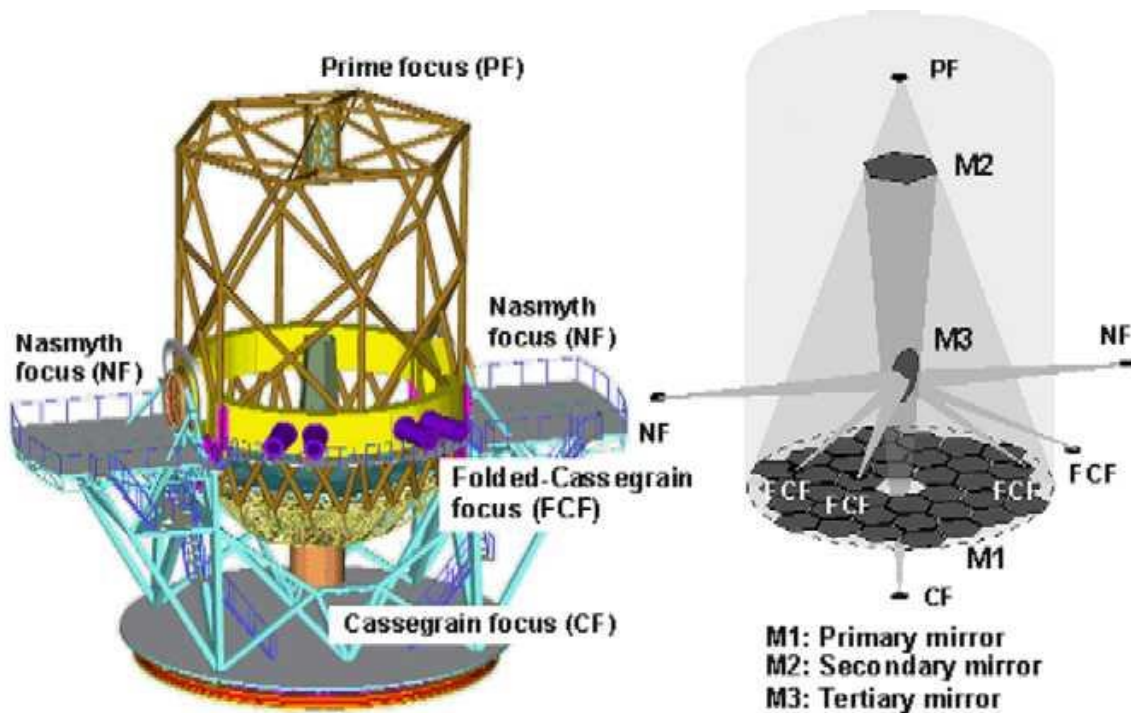


Figura 3.1: Vista general del GTC.

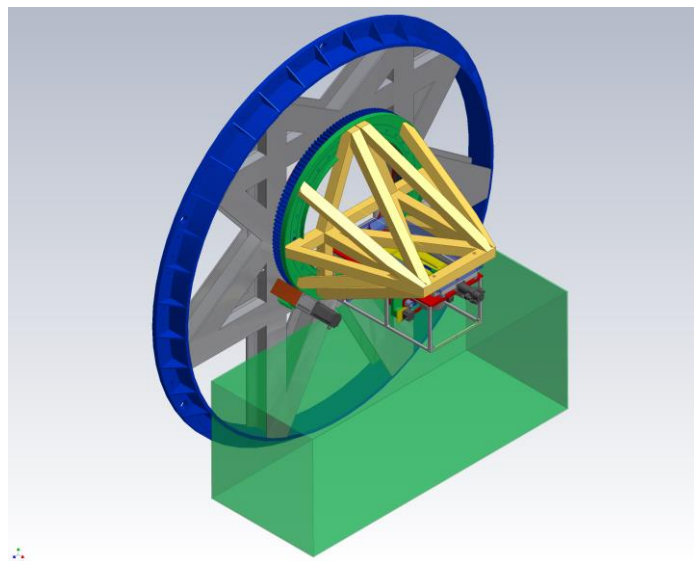
<sup>1</sup> GTC Telescope Mechanics Design, Jorge Pan, Consolación Asenjo, PO, GTC, ,PUB/TELE/0031-L. ,23/03/00

### 3.2 EL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN

Durante la fase de integración del GTC el Instrumento de verificación, CI (Commissioning Instrument) (Figura 3.2) por sus siglas en inglés, será una herramienta de diagnóstico para la verificación del rendimiento del telescopio. Básicamente el CI realizará tres tareas principales<sup>2</sup>:

- Imagen de los segmentos independientes del espejo primario M1.
- Verificación de la geometría de la superficie del espejo M1
- Alineación de los segmentos.

La alineación de los segmentos está directamente relacionada a la calidad y rendimiento del telescopio. Durante la integración de los segmentos, el CI verificará el alineamiento relativo de los segmentos de espejo.



*Figura 3.2: Vista general del Instrumento de Verificación.*

Por esa razón el CI requiere un razonablemente amplio campo de visión para identificar los puntos fuera de calibración, y asimismo identificar las fuentes de error para corregir la degradación de la imagen.

Resumiendo lo anterior el CI tiene los siguientes modos de observación (Figura 3.3):

#### **Imagen directa**

Esta permite la verificación de la calidad de imagen del telescopio. En este modo es posible alinear los segmentos del espejo primario M1 en su inclinación. Requiere un campo de visión de aproximadamente un arco minuto, y además permite insertar aperturas de pupila de menor y mayor tamaño permitiendo el efecto de baffle en la superficie analizada.

#### **Imagen de pupila de salida del telescopio**

Este modo ayuda a identificar el origen de la luz dispersa identificando las áreas brillantes en la pupila.

<sup>2</sup> Commissioning Camera for The Gran Telescopio Canarias, Salvador Cuevas, Carlos Espejo, Beatriz Sánchez, Vicente Bringas, Armando Chavoya, J. Manuel Montoya, Nicholas Devaney, Javier Castro, SPIE Vol 4840-35, 2002.

### Medición de Frente de Onda

Este modo es requerido como diagnóstico de la calidad de imagen. Puede ser llevado a cabo con los sensores de frente de onda de Adquisición y Guiado (sistema montado antes del Instrumento de Verificación del lado interno del telescopio). Dos técnicas son consideradas para la medición del frente de onda: Shack- Hartman y curvatura. La curvatura no requiere alineamiento preciso del arreglo de lentes por lo que permite medir los errores en los pistones de los segmentos. Por otra parte Shack-Hartman en combinación con el arreglo de lentes permite una alta resolución espacial en la medición de la figura de los segmentos del primario M1.

Por ello la óptica del CI está dividida en dos unidades, un colimador que provee una imagen de alta calidad y una cámara que coloca el haz colimado por detrás de la imagen de pupila en un detector de alta resolución de imagen. Este mismo detector es usado en todos los modos de observación.

Para el modo imagen, la cámara es insertada en la trayectoria de la luz. En cualquiera de los otros modos la cámara debe ser removida y el detector re- posicionado.

Idealmente, el CI debe ser usado para alinear los focos Nasmyth y Cassegrain. Una vez, que la etapa de alineación esté concluida, el CI será montado permanentemente en el Foco Cassegrain doblado ya sea para imagen o sintonizado del telescopio.

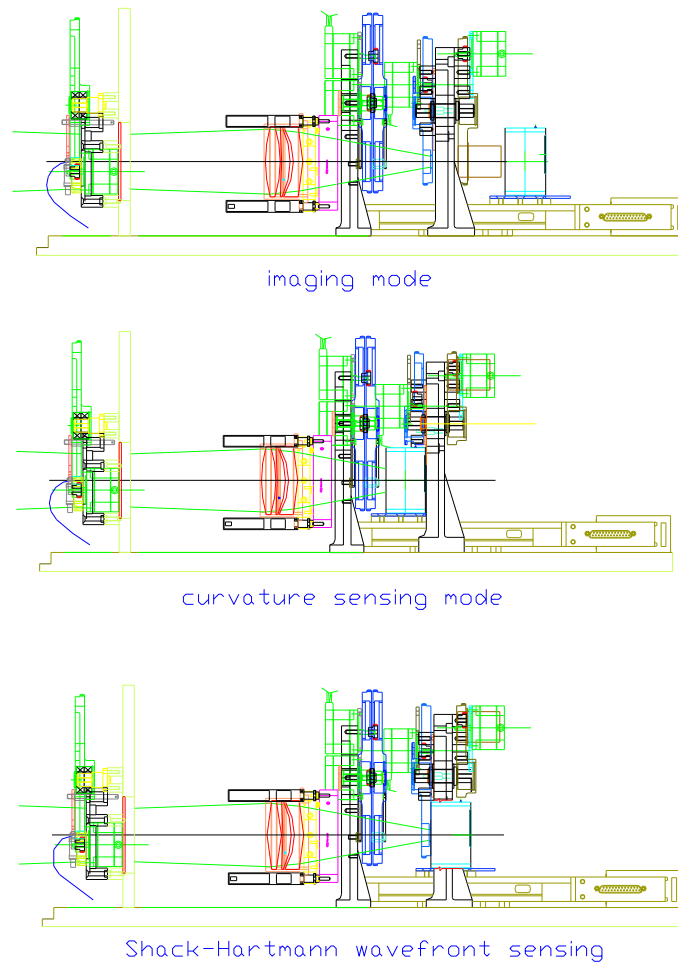


Figura 3.3: Configuración del instrumento para los diferentes modos de observación.

Por otra parte el CI por requerimiento tiene un diseño modular y consta de dos elementos la caja del instrumento y el posicionador del instrumento, a su vez este último consta de la estructura principal y la estructura de soporte ambas unidas por medio de un plato giratorio, La caja del instrumento esta sujeta a la estructura soporte mediante le platina de enfoque, a continuación se describen a detalle los elementos antes mencionados.

### 3.3 CAJA DEL INSTRUMENTO

Consta de una base ligera de aluminio que forma la cama óptica, a la cual están atornillados los marcos de sujeción de las cubiertas (Figura 3.4). Las cubiertas pueden ser desmontadas independientemente para un mejor acceso a los diferentes componentes.

En su parte interior consta de una ventana y un obturador seguidos de un colimador, un posicionador de pupila, y dos ruedas de filtros. Tras las ruedas de filtros se encuentra un soporte que integra la rueda de lentes con dos aperturas de pupila seguida por la rueda de cámara removible. Para completar el sistema óptico se encuentra una platina traslatoria con un detector de CCD montado sobre la misma. Al frente del sistema antes descrito se encuentra una rueda de calibración con dos aperturas. Todas las superficies expuestas a la luz están tratadas y son ópticamente negras así como los barriles de las lentes tienen baffles para eliminar las luces dispersas.

Todos los sistemas tienen posibilidades de alineación mediante excéntricos diseñados ex profeso.

A continuación se describen con mas detalle los diferentes elementos.

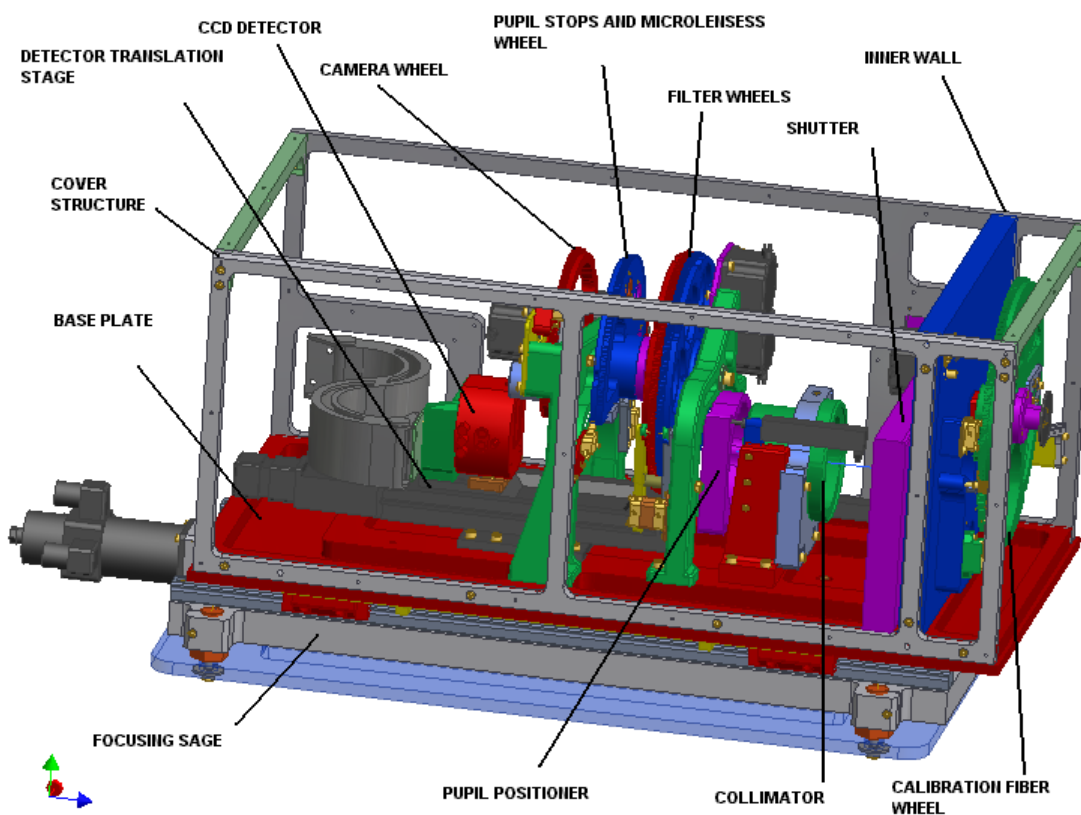


Figura 3.4: Vista general de la caja del instrumento.



### 3.4 RUEDAS DE FILTROS

El sistema consta de dos ruedas con filtros de 2 pulgadas de diámetro los cuales se interponen en el haz de luz. La rueda 1 provee posiciones para los filtros de densidad neutral con valores 0.4, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 y . La rueda 2 contiene los filtros B, V, g',r',I'. Ambas ruedas tienen una ventana BK7 con recubrimiento antirreflejante, y una posición vacía para un total de 7 posiciones por rueda (Figura 3.5).

Ambas ruedas son dentadas y están acopladas a un motor de pasos por medio de un piñón. Además las ruedas son indexadas en su posición mediante unos retenedores mecánicos que entran dentro de las ranuras de posicionamiento (7) en cada rueda y cuentan con un micro interruptor de posición de "home" y otro de posición de filtro para identificar cual filtro es colocado en el haz de luz.

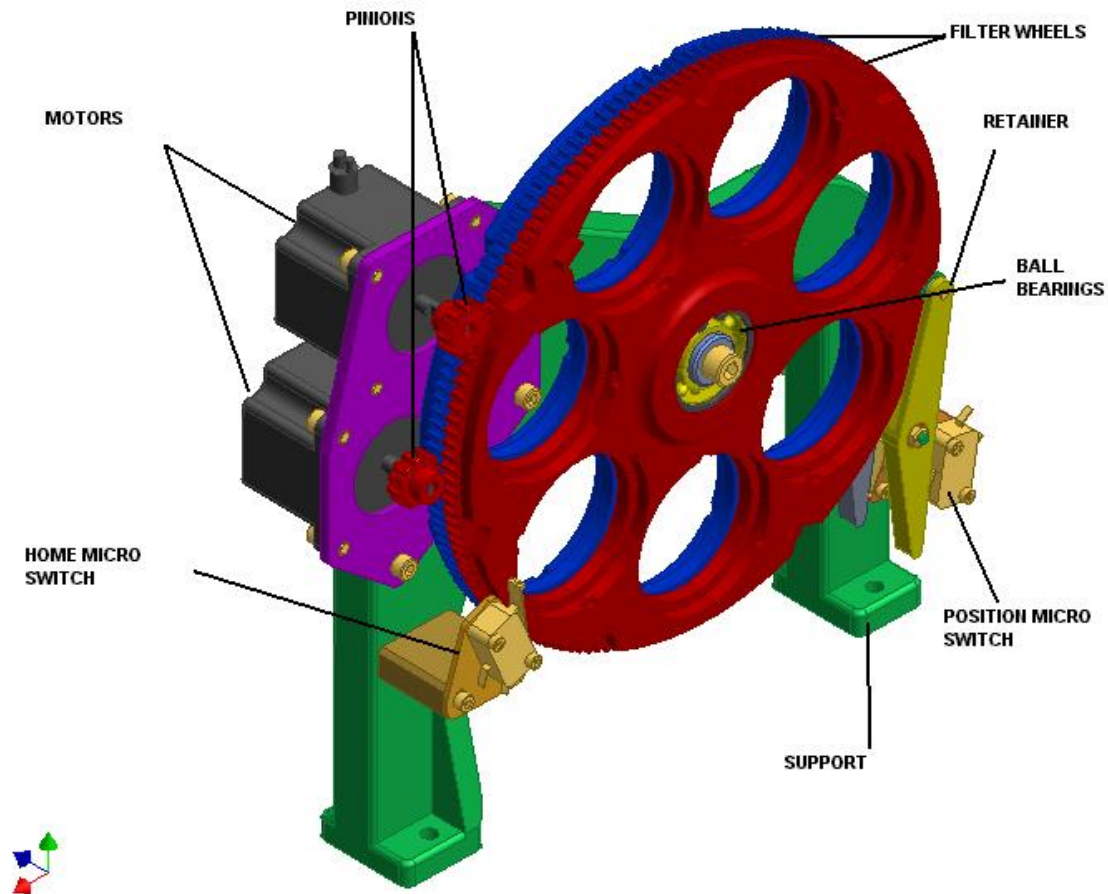


Figura 3.5: Conjunto de ruedas de filtros y soporte.

### 3.5 RUEDA DE CAMARA

Esta es un segmento de rueda (Figura 3.6) la cual coloca o remueve la cámara del haz de luz. También como las de filtros es dentada y acoplada a un motor de pasos por medio de un piñón, para transmitir el movimiento. También cuenta con un retentor mecánico con dos ranuras de posicionamiento dentro-fuera, y sus micro interruptores de “home” y de posición.

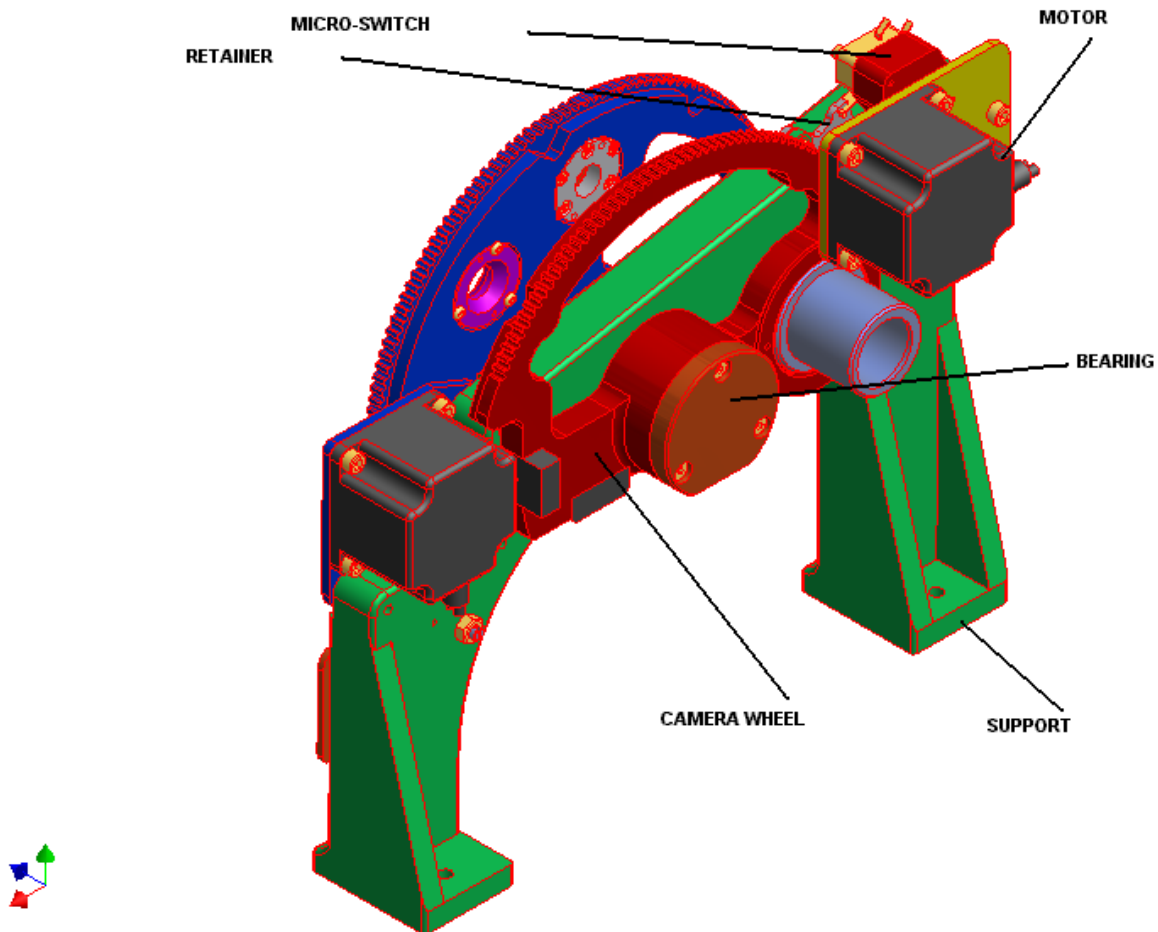


Figura 3.6: Rueda de cámara en soporte con rueda de microlentes

### 3.6 RUEDA DE MICROLENTES Y APERTURAS DE PUPILA

Esta es otro segmento de rueda (Figura 3.7) que contiene el arreglo de lentes y dos aperturas de pupila para interponerlas en el haz de luz es decir en el plano de pupila del espejo M2. Como las anteriores es dentada y esta acoplada a un motor de pasos por medio de un piñón. El retentor mecánico se posiciona en 4 ranuras una para las lentes, dos para las pupilas y una para posición fuera del haz. También cuenta con dos interruptores “home” y posición.

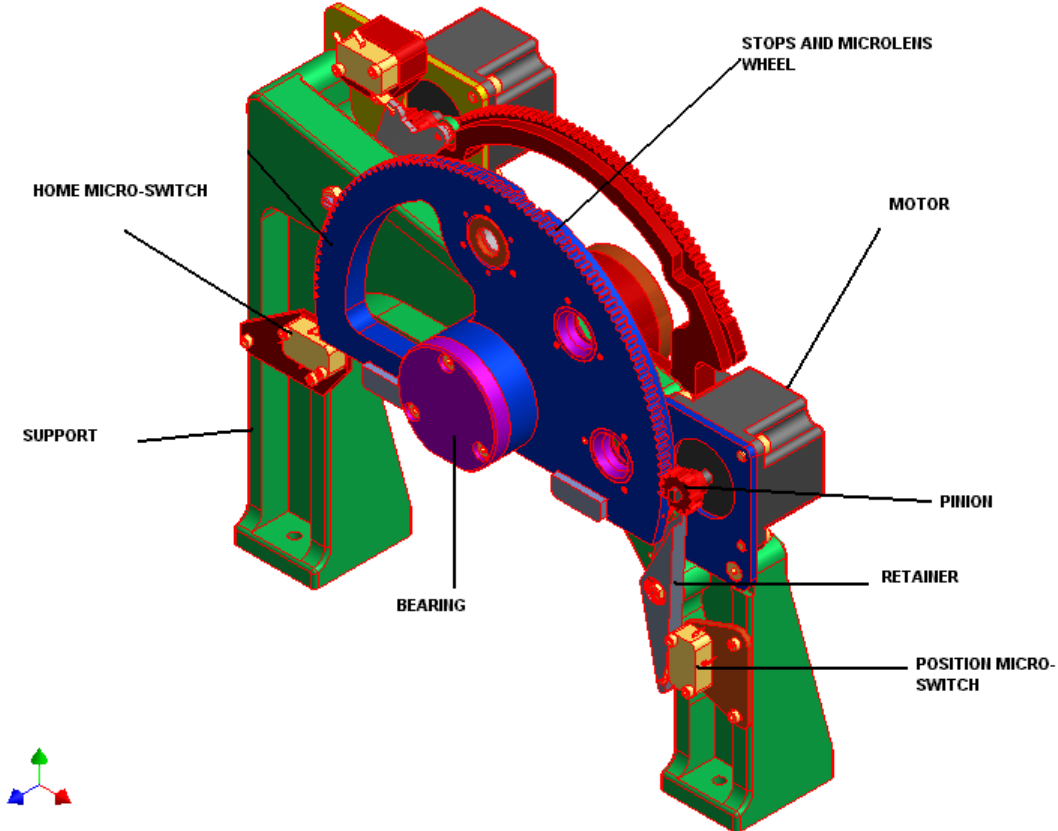


Figura 3.7: Rueda de microlentes en soporte con rueda de cámara

### 3.7 OBTURADOR

El obturador (Figura 3.8) interrumpe el haz de luz en su curso hacia el CCD, está localizado entre la ventana y el colimador su accionamiento es por medio de un solenoide con un tiempo mínimo de exposición de 60 milisegundos.



Figura 3.8 : Obturador

### 3.8 RUEDA DE FIBRA DE CALIBRACIÓN

La función de la rueda de fibra (Figura 3.9) es ser usada como una fuente de luz para la calibración de los diferentes modos de operación introduciéndola en el campo de visión del instrumento.

Consta de una rueda dentada acoplada a un motor de pasos por medio de un piñón como las ruedas anteriores. Tiene cuatro posiciones de funcionamiento con un retentor mecánico y ranuras de posición, un micro interruptor de “home” y otro de posición. Las 4 posiciones son: posición de fibra, apertura cuadrada de 49 mm para imagen directa 1’x1’ FoV, apertura cuadrada de 5 mm 6”x6” FoV para Wave Front Sensing (Medición de frente de Onda) en Shack –Hartmann y curvatura ó análisis de pupila. La tercera apertura es más grande de 1’x1’ para estudios de luz dispersa del telescopio.

La fibra de calibración es una fibra óptica iluminada por una fuente de luz digitalmente controlada localizada dentro del gabinete de la electrónica.

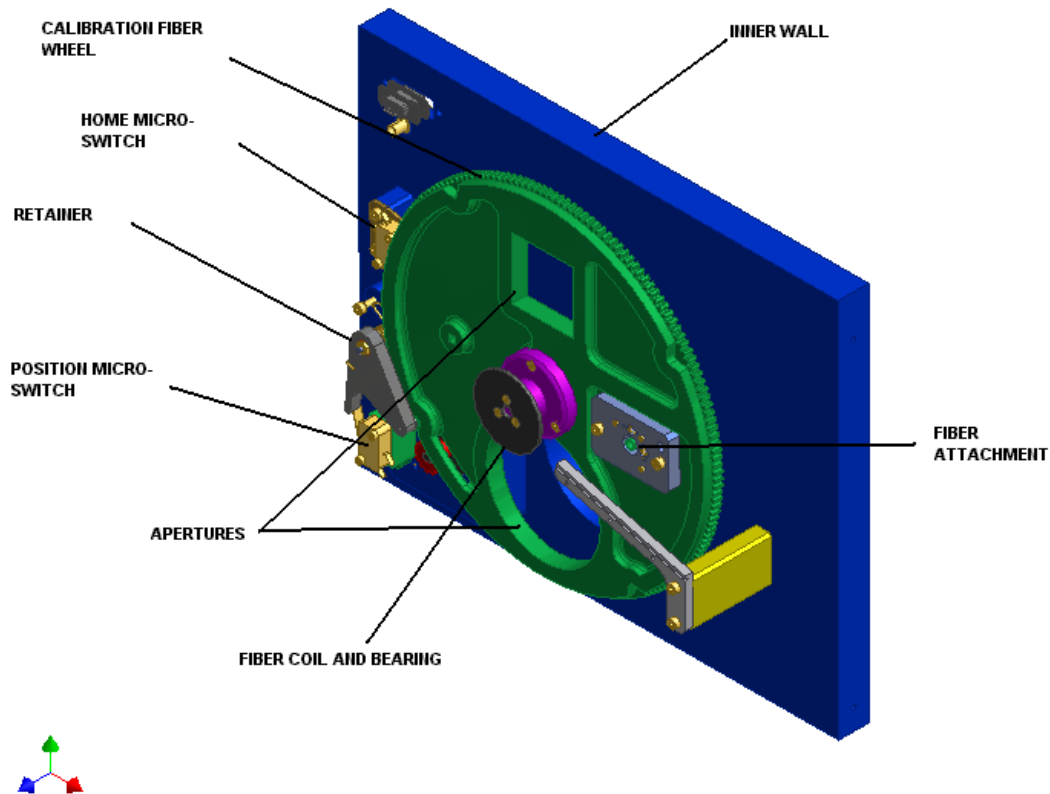


Figura 3.9 : Rueda de fibra de calibración

### 3.9 POSICIONADOR DE PUPILA

Consta de una montura cinemática que sujeta la pupila y la inclina por medio de dos micrómetros motorizados en dos ejes (Figura 3.10). Esta inclinación alinea la imagen del espejo primario M1 del telescopio con el arreglo de lentes. El intervalo requerido de movimiento es de  $\pm 0.2$  mm en el plano de la pupila. Esto corresponde a  $\pm 2.8^\circ$  de inclinación de la lente de 12 mm de espesor.

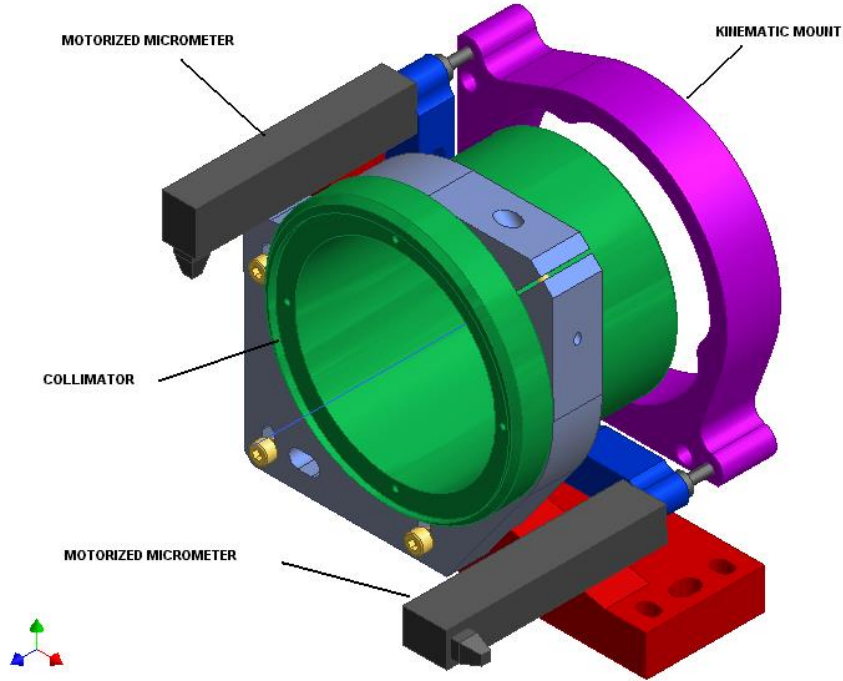


Figura 3.10: Posicionador de Pupila

### 3.10 PLATINA DE TRASLACIÓN DEL DETECTOR DE CCD

El detector de CCD se mueve por medio de una platina de traslación (Figura 3.11) la cual provee un suave movimiento durante los diferentes modos de operación de la caja del instrumento a lo largo del eje óptico con un intervalo de 150 mm de carrera.

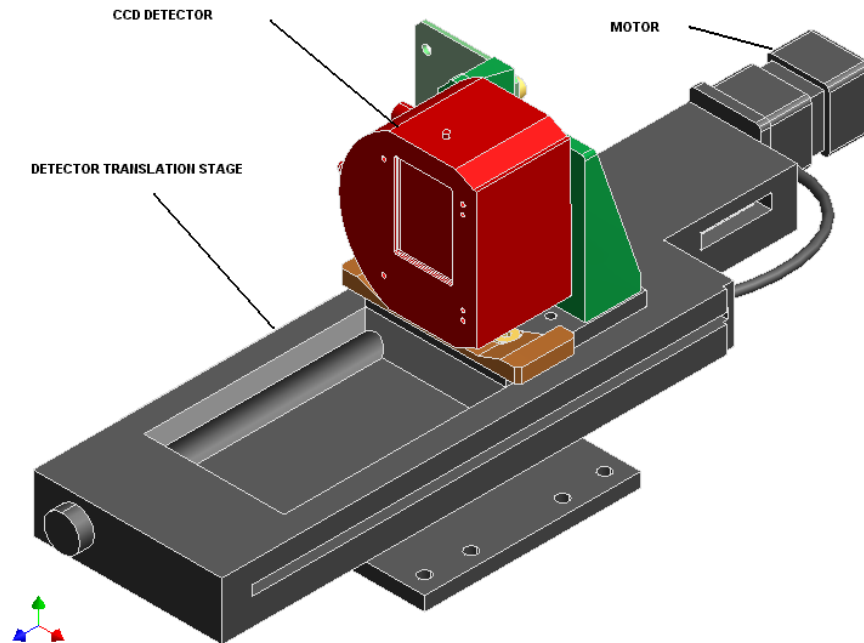


Figura 3.11: Platina de traslación del detector de CCD

### 3.11 DETECTOR DE CCD

La caja del CCD (Figura 3.12) integra el detector de CCD , el dispositivo de enfriamiento, la tarjeta de circuito y el intercambiador de calor. Dicha caja se acopla sobre la platina de traslación del CCD. Su sistema de enfriamiento Peltier permite su operación a aproximadamente  $-50^{\circ}\text{C}$ . El sistema de enfriamiento se conecta al sistema general de enfriamiento del telescopio. Cuenta con un controlador acoplado opuesto a la caja del Instrumento con dimensiones aproximadas de 350x200x160 mm.

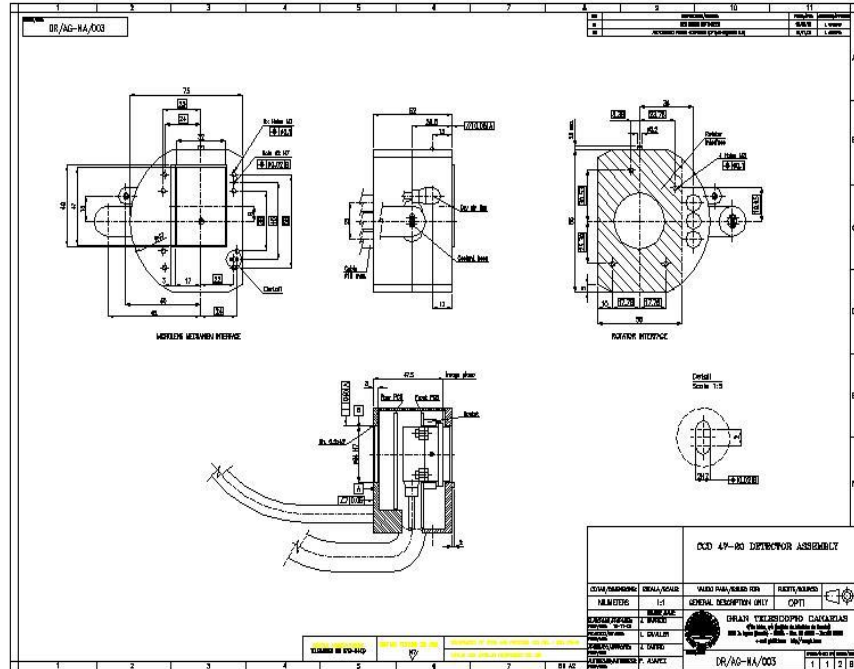


Figura 3.12: Detector de CCD

### 3.12 POSICIONADOR DEL INSTRUMENTO

El posicionador del Instrumento (Figura 3.13) consta de la estructura principal, la estructura de soporte, la mesa giratoria y la platina de enfoque. El posicionador permite al instrumento apuntar a cualquier parte del campo del espejo primario M1 del telescopio manteniendo a su vez alineado el espejo secundario M2 así como el enfoque de la caja del instrumento. Como es modular permite acoplar el instrumento a la plataforma Nasmyth con la estructura principal acoplada o al foco Cassegrain doblado usando sólo la estructura de soporte también sirve de soporte al gabinete de la electrónica del instrumento. A continuación se describen con más detalle sus elementos.

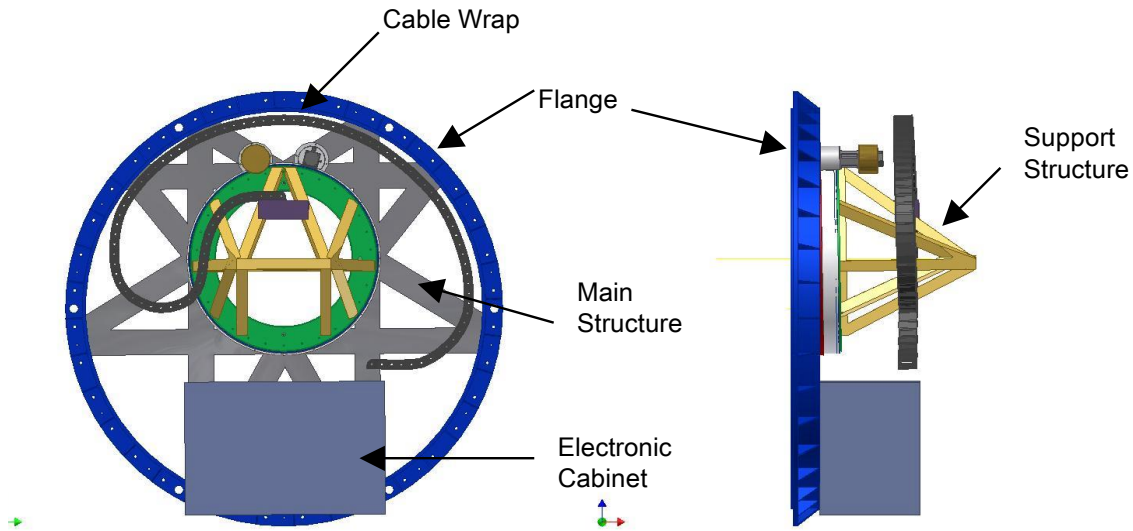


Figura 3.13: Posicionador del instrumento

### 3.13 MESA GIRATORIA

La mesa giratoria (Figura 3.14) consiste de un rodamiento dentado de rodillos cruzados impulsada por un piñón acoplado a un reductor 30:1 y un motor de pasos. Además cuenta con un freno magnético acoplado a otro piñón para sostener la posición evitando el juego de los engranes al desconectar la energía del motor. Cuenta con un encoder absoluto en la pista interior para determinar la posición de giro de la mesa y tres micro interruptores uno de “home” otro de fin de carrera y otro de inicio de carrera. También cuenta con contrapesos opuestos a la caja del instrumento para balancear y facilitar la estabilidad del sistema en posición.

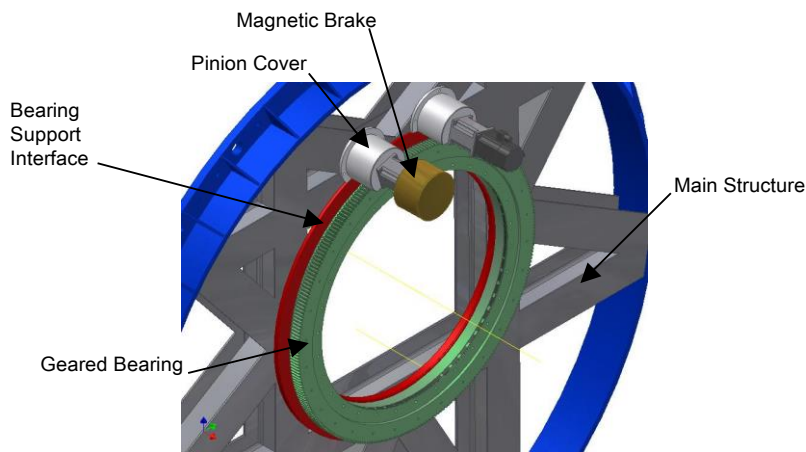


Figura 3.14: Mesa giratoria



### 3.14 ESTRUCTURA\_PRINCIPAL

La estructura principal (Figura 3.15 ) fija el Instrumento de Verificación al rotador Nasmyth del telescopio y a su vez es el soporte de toda la mecánica del instrumento. Dicha estructura da un ángulo de  $57^{\circ}30.43''$  de la mesa giratoria con respecto a la brida del rotador para mantener la caja del instrumento apuntando al espejo secundario M2 del telescopio.

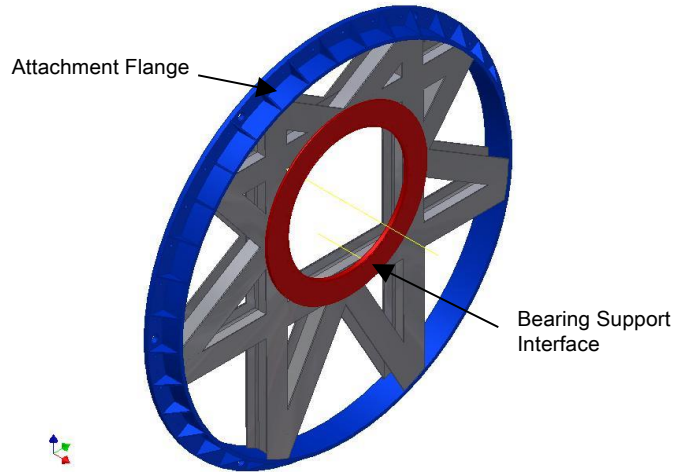


Figura 3.15: Estructura principal

### 3.15 ESTRUCTURA DE SOPORTE

Esta estructura (Figura 3.16) se atornilla a la mesa giratoria que a su vez está sujeta a la estructura principal. Sirve de soporte a la platina de enfoque que sujeta la caja del instrumento. Cuenta con un ángulo de  $57^{\circ}30.43''$  como la estructura principal con la finalidad de mantener la caja del instrumento apuntando al espejo secundario M2 del telescopio.

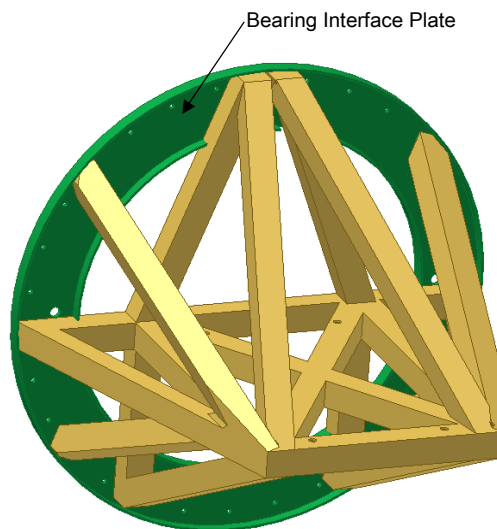


Figura 3.16: Estructura de soporte

### 3.16 PLATINA DE ENFOQUE

Permite posicionar y enfocar la caja del instrumento (Figura 3.17) en el plano focal del telescopio consta de una platina con guías lineales de “cero juego” y es impulsada por un motor de pasos el intervalo de desplazamiento de la platina es de  $+75/-10$  mm con respecto a la posición del plano focal. Cuenta con un encoder lineal para registrar y controlar su posición y tres micro interruptores, uno de “home”, otro de carrera frontal y otro de carrera posterior. Además cuenta con un plato de interfase entra la platina y la estructura de soporte para desmontar la caja del instrumento sin perder la alineación de la misma durante las actividades de mantenimiento.

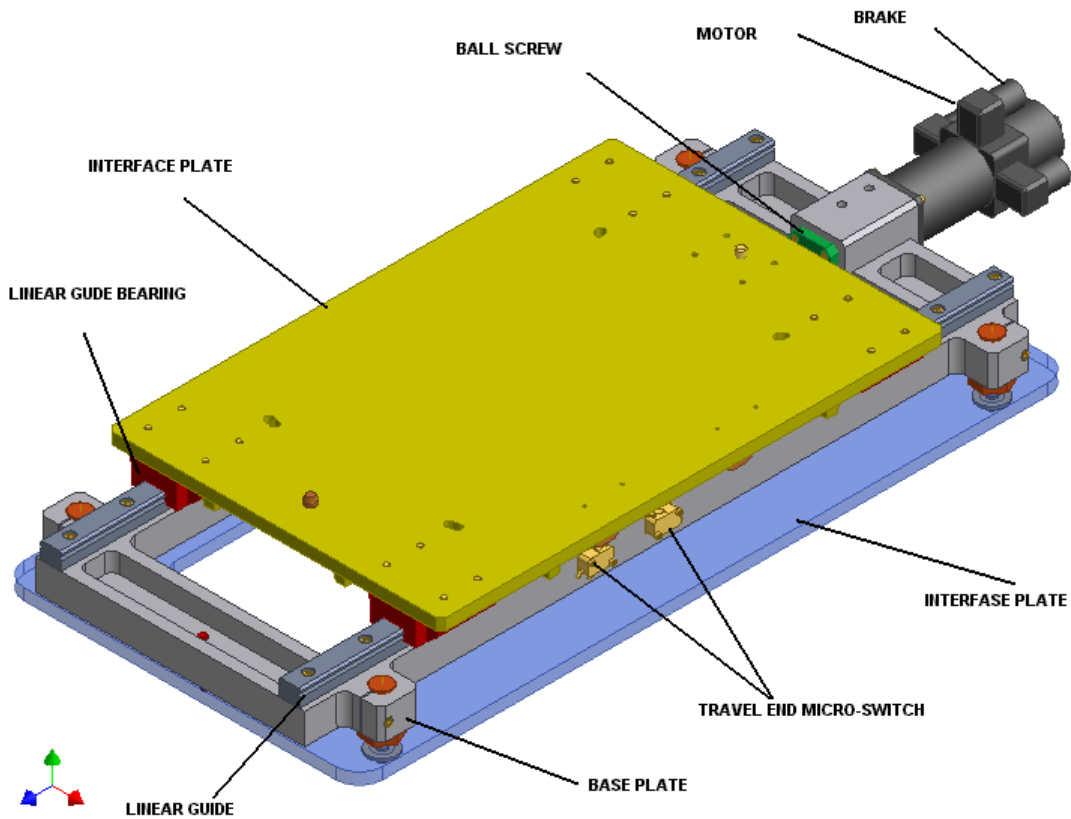


Figura 3.17 Platina de enfoque.

### 3.17 GABINETE DE LA ELECTRÓNICA Y DUCTO DE CABLEADO

El gabinete de la electrónica alberga los elementos de control del instrumento y el sistema de enfriamiento de la electrónica para evitar disipar calor al interior de la cámara del telescopio. Dicho gabinete está interconectado a la caja del instrumento por ductos de cableado tipo cadena los cuales permiten la movilidad de los componentes del instrumento con la conservación de la integridad del cableado y mangueras de enfriamiento. A continuación se muestra un diagrama de bloques de la interconexión electrónica.

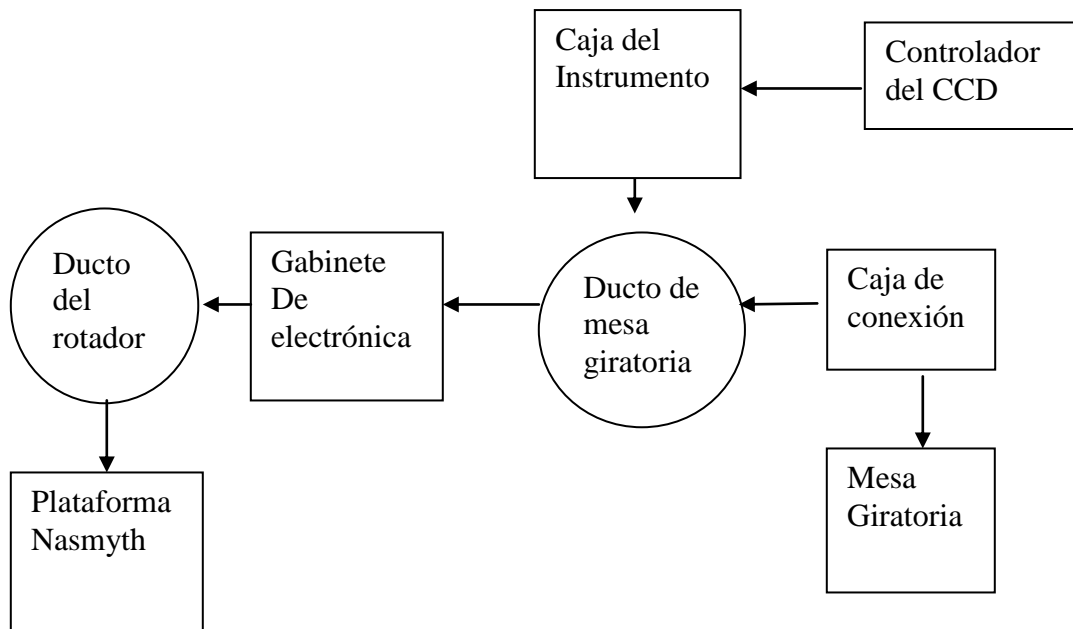
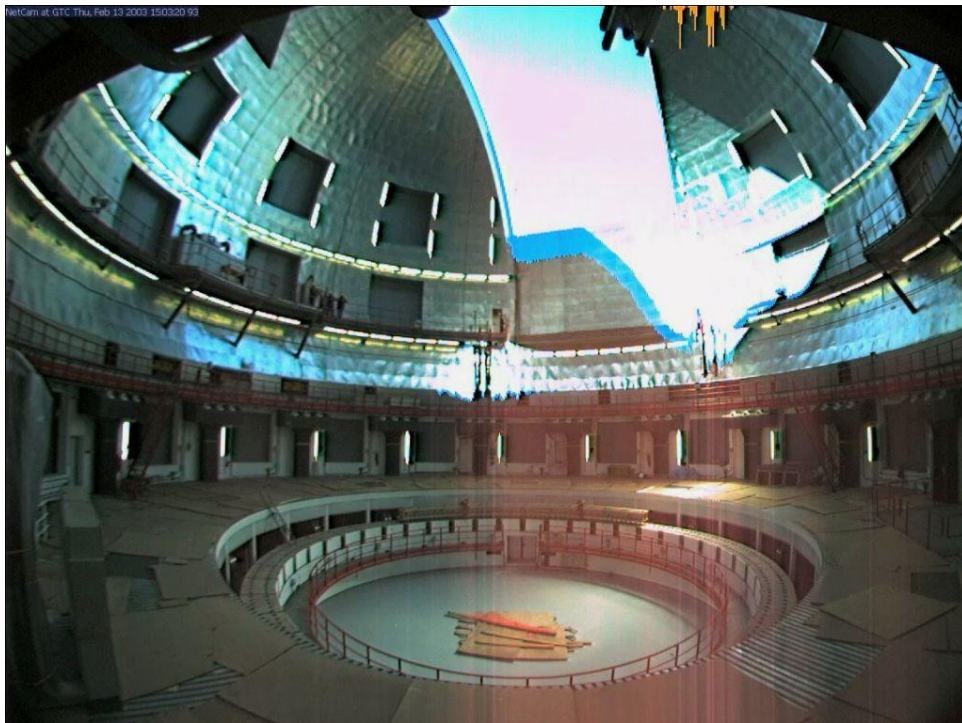


Figura 3.18: Diagrama de ruta de cableado.

# ***CAPÍTULO 4 : METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES Y SU VERIFICACIÓN***



## **CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES Y SU VERIFICACIÓN.**

En este capítulo se hace una breve descripción de la metodología propuesta para la verificación y control del cumplimiento de especificaciones durante el proyecto de desarrollo del Instrumento de Verificación.

De acuerdo al documento ESP/OPTI/0123-R Statement of Work for the Procurement of the Commissioning Instrument el trabajo está dividido en los siguientes paquetes de trabajo:

- Diseño mecánico
- Diseño óptico
- Análisis RAMS
- Herramientas de Soporte y Pruebas
- Sistema de control y aceptación
- Suministros, fabricación y ensamble
- Integración en sitio y pruebas
- Administración y sistemas de ingeniería

A continuación se describen, las metodologías propuestas, para la verificación del cumplimiento de especificaciones, en el diseño y construcción del Instrumento de Verificación, para cada uno de los paquetes de trabajo antes mencionados. Sólo se enunciarán en forma general, ya que serán descritas a fondo, en los capítulos posteriores.

### **4.1 DISEÑO MECÁNICO Y METODOLOGÍA DE VERIFICACIÓN**

Los productos de este paquete de trabajo y su método de verificación son los siguientes:

**Reporte de diseño mecánico:** describe el diseño mecánico (componentes y funciones). (*Primera aportación del trabajo de tesis*). **Verificación** : comparación del concepto contra las especificaciones del instrumento.

**Reporte de cálculos mecánicos:** describe los cálculos llevados a cabo para seleccionar los componentes y sus interfases con otros elementos. **Verificación:** contra especificaciones del instrumento.

**Análisis de elemento finito:** describe el análisis estructural, térmico, y de vibración para validar el diseño mecánico. **Verificación:** contra especificaciones y con prueba experimental en el caso de frecuencias naturales.

**Planos y lista de partes de compra y fabricación:** incluye todos planos de detalle, modelo tridimensional, listas de partes y componentes comerciales. **Verificación:** medición de componentes fabricados contra plano y especificación, (Matriz de cumplimiento) verificación de componentes comerciales contra hojas de datos, evaluación de materiales empleados.

## 4.2 DISEÑO ÓPTICO

Los productos de este paquete de trabajo y su método de verificación son los siguientes:

**Reporte del diseño óptico:** es una descripción completa del diseño óptico, que incluye las especificaciones y dibujos de los componentes ópticos y sus tolerancias de montaje así como los cálculos, y el diseño de los barriles (*Segunda aportación del trabajo de Tesis*)  
**Verificación:** por medio de software ZEMAX, y medición física y de cualidades de los componentes ópticos

**Documentos de especificación:** éstos incluyen los dibujos de especificación para la fabricación y adquisición de los componentes ópticos. **Verificación:** contra planos de diseño y en el caso de filtros curvas de transmisión y demás características ópticas.

**Procedimientos de alineación:** incluyen los procedimientos de montaje y alineación de las delicadas componentes ópticas. **Verificación:** Contra planos y especificaciones de diseño.

**Procedimientos de aceptación en fábrica de la óptica:** estos incluyen los métodos de inspección y pruebas a ser realizados durante la liberación en fábrica. **Verificación:** Con instrumentos ópticos para verificar el cumplimiento de especificaciones.

## 4.3 ANÁLISIS RAMS

Los productos de este paquete de trabajo y su método de verificación son los siguientes:

**Reporte de análisis RAMS:** éste documento incluye el análisis FMECA, el MTBF y MTTR del instrumento. (*Este análisis es la tercera aportación del trabajo de Tesis*).  
**Verificación:** En sí este documento es una verificación del diseño y el cumplimiento de especificaciones, que serán verificadas contra las especificaciones del capítulo 2.

**Lista de refacciones:** este documento incluye las refacciones por 10 años requeridas para mantener funcionando el Instrumento de Verificación. **Verificación:** contra resultados arrojados por el análisis RAMS.

**Manual de mantenimiento:** este es el manual de mantenimiento y el procedimiento de desensamble y ensamble del Instrumento. **Verificación:** contra norma EN-292.

## 4.4 HERRAMIENTAS DE SOPORTE Y PRUEBAS

En este paquete de trabajo se incluyen las herramientas de soporte que ayudan a colocar el Instrumento en su posición el telescopio como son sujetadores y monturas. Además incluye los dispositivos de pruebas y de montaje utilizados durante el proceso de ensamble, alineación y pruebas. **Verificación:** por medio de reporte contra especificaciones.

## 4.5 SISTEMA DE CONTROL Y ACEPTACIÓN

Los productos de este paquete de trabajo y su método de verificación son los siguientes:

**Selección de los componentes de control:** incluye la selección de motores controladores, sensores, interfases y actuadores del instrumento así como sus especificaciones.

**Verificación:** la verificación de los componentes debe ser de acuerdo a las especificaciones, cálculos RAMS y estándares EMC.

**Diseño e implementación del sistema de control de aceptación:** este incluye la comunicación con los sistemas de control del GTC y las pruebas de aceptación del Instrumento. **Verificación:** de acuerdo a los estándares y protocolos indicados por la Oficina de Proyectos del GTC verificando la perfecta comunicación con los componentes del GTC.

#### 4.6 SUMINISTROS, FABRICACIÓN Y ENSAMBLE

Los productos de este paquete de trabajo y su método de verificación son los siguientes:

**Fabricación de los componentes:** este incluye la fabricación de los componentes optomecánicos del Instrumento. **Verificación:** contra especificaciones de diseño en matriz de cumplimiento tanto para componentes mecánicos como ópticos.

**Suministro de componentes comerciales:** esto incluye todos los componentes mecánicos, electrónicos y periféricos necesarios para la construcción del Instrumento. **Verificación:** contra especificaciones de diseño, hojas de datos de los componentes mediante inspección, prueba o certificados correspondientes.

**Ensamble y pruebas:** comprende todas las actividades de ensamble y pruebas de los componentes en forma independiente y de conjunto. **Verificación:** de acuerdo a especificaciones en pruebas, carga, alineación de los conjuntos para verificar su rendimiento de acuerdo a matriz de aceptación.

#### 4.7 INTEGRACIÓN EN SITIO Y PRUEBAS

Este incluye los procedimientos de prueba y verificación con la Oficina de Proyectos del GTC de la calidad y rendimiento del Instrumento de Verificación. **Verificación:** la verificación de este paquete de trabajo es en conjunto con la Oficina de Proyectos del GTC.

#### 4.8 ADMINISTRACIÓN DE SISTEMAS DE INGENIERÍA

Este paquete de trabajo es el proceso administrativo de verificación que incluye el monitoreo de los avances y reportes mensuales, así como la descripción y control de los puntos críticos de desarrollo del proyecto.

## ***PARTE III DISEÑO***

### ***CAPÍTULO 5: DISEÑO MECÁNICO, PRESUPUESTOS DE ERROR Y PRUEBAS EN EL SISTEMA MECÁNICO***





**PARTE III DISEÑO**

**CAPITULO 5: DISEÑO MECÁNICO, PRESUPUESTOS DE ERROR Y PRUEBAS EN EL SISTEMA MECÁNICO**

En este capítulo se describen los cálculos para el diseño mecánico<sup>1</sup> del Instrumento de verificación, parte fundamental del trabajo de tesis, con el fin de verificar el cumplimiento de las especificaciones requeridas en el capítulo 2, mediante la estimación de los presupuestos de error de la mecánica del instrumento:

**5.1 Definición del sistema local de coordenadas**

El sistema local de coordenadas de la caja del instrumento estará localizado en el punto  $x = -39 \text{ mm}$ ,  $y = -119.0$  con respecto al “0” del sistema general de coordenadas del Instrumento definido en 1.4.4 el cual a su vez también es un sistema de coordenadas de mano derecha (ver figura 5.1). Lo anterior con el fin de calcular los centros de masa.

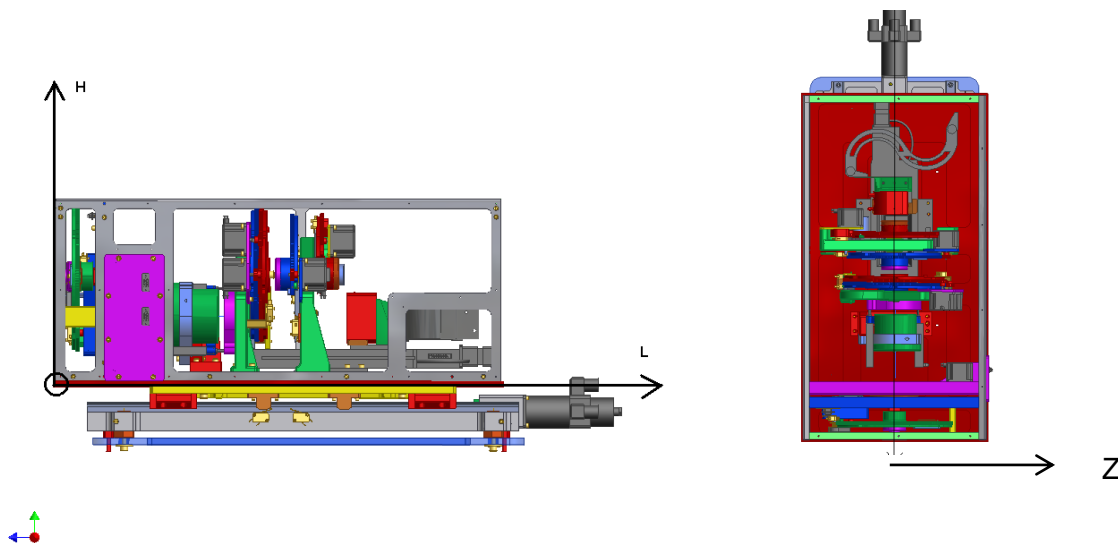


Figura 5.1 Sistema local de coordenadas de la caja del instrumento

La orientación con respecto al sistema general de coordenadas definido en 1.4.4 por requerimiento se muestra en la Tabla 5.1.

Sistema local	Sistema general	Dirección
L	z	opuesta
H	y	misma
Z	x	misma

Tabla 5.1. Sistema de Coordenadas

<sup>1</sup> Commissioning Instrument Preliminary Mechanical Design, Luis Cavaller, PO, GTC, RPT/OPTI/0142-R, 1.A, 12/07/00

## 5.2 Masa de los componentes de la caja del instrumento

La tabla 5.2 muestra la masa de los componentes de la caja del instrumento y las coordenadas de su centro de masa CoG.

Componente	Masa (kg)	CoGL (mm)	CoGH (mm)	CoGZ (mm)
Ruedas de filtros	9.45	375.93	180	27.37
Ruedas de cámara y microlentes	7.1	469.66	185.78	-14.9
Platina de traslación del detector	1.75	200.4	31.134	52.389
Posicionador de pupila	1.5	275.43	88.25	-19.07
Shutter	3	129.35	119	56
Ventana y rueda de fibra de calibración	27.25	321.69	77.17	0
Detector de CCD	0.75	559	119	0
Cubierta y soporte	0.49	variable	variable	variable
Total caja del instrumento	51.29	360.9	110	0

Tabla 5.2 Masa de la caja del instrumento

## 5.3 Masa total de los componentes del instrumento

La siguiente tabla muestra la masa total de los componentes del instrumento.

Componente	Masa (kg)	CoG L(mm)	CoGH (mm)	CoGZ (mm)
Estructura principal	797.31	59.28	79.2	100
Rodamiento	166	0	300	144
Mesa giratoria	110	0	315	155
Controlador de CCD	6	695	255	0
Estructura soporte	180	486.4	54.58	89.98
Platina de enfoque	38.5	481.54	-33.57	0
Caja del instrumento	51.29	360.9	110	0
<b>Total Instrumento</b>	<b>1239.1</b>	<b>219.89</b>	<b>132.22</b>	<b>0</b>

Tabla 5.3 Masa del Instrumento de Verificación

**Verificación:** Lo anterior cumple con la especificación de masa dada en el documento DCI /STMA /0018-R que es de 7500 kg máximo en el rotador Nasmyth con un 16% de la capacidad nominal de carga del rotador. Los cálculos se corroboraron con pesajes físicos de los componentes terminados (Figura 5.2).



Figura 5.2 Pesado de la caja del instrumento

#### 5.4 Análisis de la estructura utilizando el Método de Elementos Finitos

A continuación se describen los resultados del análisis de Elementos Finitos<sup>2</sup>, con el fin de estimar los presupuestos de error y complementarlos con los cálculos dinámicos.

##### 5.4.1 Modelo Global

En la Figura 5.3 se muestra el modelo global mallado del Instrumento de Verificación utilizando el software ANSYS.

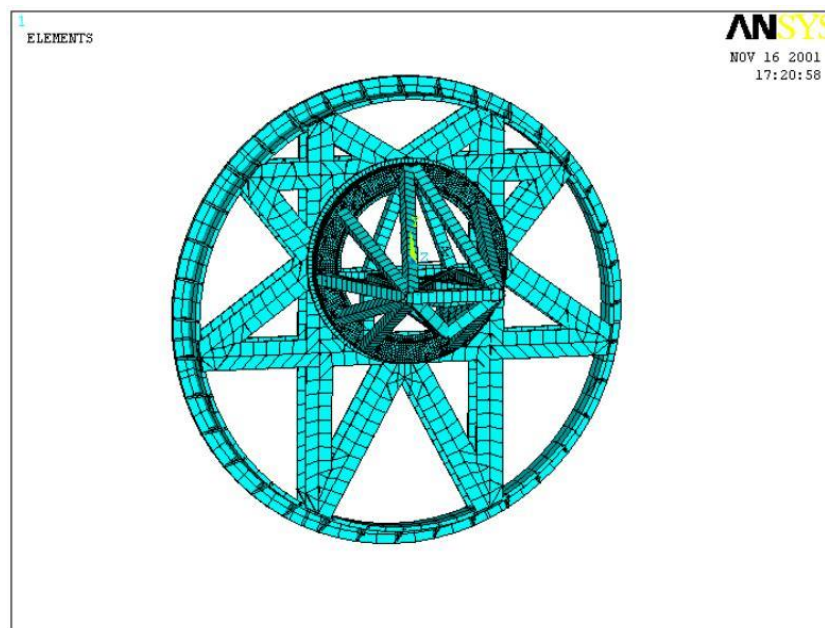


Figura 5.3 Modelo global de elementos finitos del Instrumento

<sup>2</sup> Commissioning Instrument FEM Document, Luis del Llano, J.L. Sánchez, Alfredo Manzo, Alejandro Farha, Javier Godoy, Vicente Bringas, Carlos Espejo, EXT/UNAM, 21/07/02.

### 5.4.2 Condiciones de frontera

El modelo de la estructura principal (Figura 5.3) se consideró fijo en la periferia de la brida de sujeción a la Nasmyth simulando los tornillos de fijación. Con el fin de simular la estructura de soporte, platina de enfoque y caja del instrumento se aplicó en el nodo de control N1 una fuerza equivalente de 2500 N. El vector de gravedad fue posicionado en 0°, 45°, 90°, y 180° para cumplir con la especificación de deflexión gravitacional. También, se aplicaron fuerzas simulando los elementos independientes en los nodos N2, N3, y N4 como se muestra en la Tabla 5.4. En la Tabla 5.5 se muestran las propiedades de los materiales utilizadas para el análisis.

Componente	Nodo de control	Fuerza (N)
Caja del instrumento, estructura de soporte y demás componentes	N1=(0, 0, 1)	2500
Controlador CCD	N2=(0, 0.135, 0.681)	60
Platina de enfoque	N3=(0, -0.093, 0.846)	385
Caja del instrumento y sus componentes	N4=(0, -0.277, 0.763)	700

Tabla 5.4: Nodos de control

Propiedades	Acero (ASTM A36)	Material auxiliar	Rodamiento
E (N/m <sup>2</sup> )	2x10 <sup>11</sup>	1x10 <sup>12</sup>	2x10 <sup>11</sup>
POISSON RATIO	0.26	0.26	0.26
CTE (K <sup>-1</sup> )	11.7x10 <sup>6</sup>	11.7x10 <sup>6</sup>	11.7x10 <sup>6</sup>
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	7850	≈ 0	6572

Tabla 5.5: Propiedades de los materiales para el análisis

### 5.4.3 Elementos auxiliares

En la Figura 5.4 se aprecian unas líneas delgadas que van de la brida exterior hacia el centro del instrumento estos elementos viga con masa de elemento auxiliar se utilizan para localizar el centro del CCD, que es la posición en la cual se deben localizar los desplazamientos de la especificación 2.1.3.2.3 del capítulo 2. Esta herramienta auxiliar también es requerida para simular las condiciones de frontera en el análisis térmico.

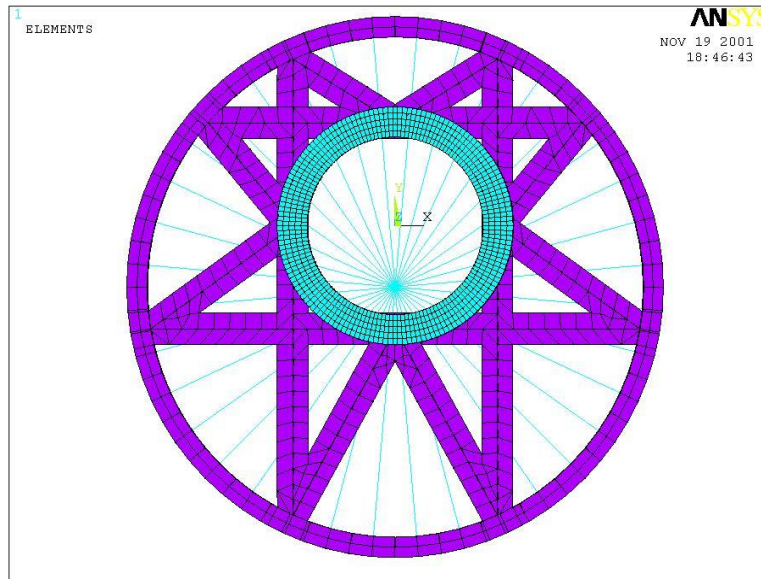


Figura 5.4: Elementos auxiliares

#### 5.4.4 Desplazamientos gravitacionales

En las siguientes tablas y figuras se muestran los resultados obtenidos de desplazamientos en los ejes x, y, z respectivamente. El nodo 270029 es el correspondiente a la posición del CCD de acuerdo a requerimiento 2.1.3.2.3

Nodo	Ux (m)	Uy (m)	Uz (m)	U Total (m)
27009	$-0.14183e^{-4}$	$0.61415e^{-7}$	$0.11879e^{-6}$	$0.14183e^{-4}$

Tabla 5.6: Desplazamientos en el eje x en el nodo del CCD

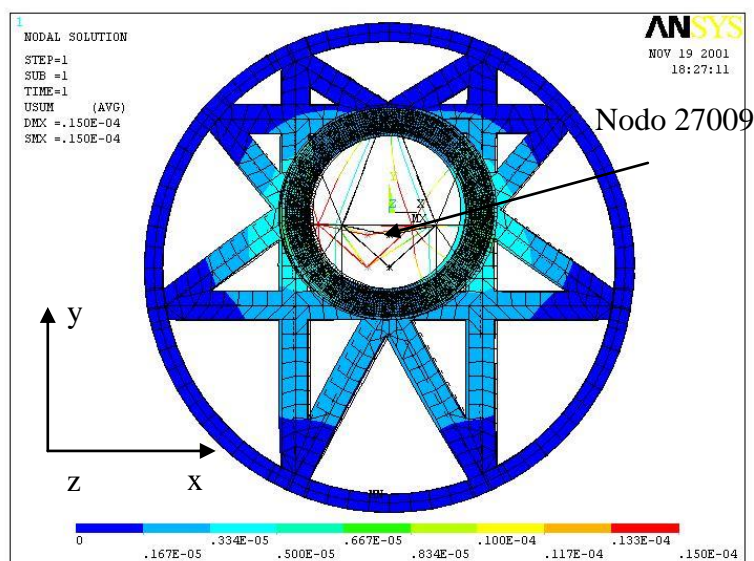


Figura 5.5: Desplazamientos totales en el eje x

Nodo	Ux (m)	Uy (m)	Uz (m)	UTotal (m)
27009	$0.90394e^{-8}$	$-0.13550e^{-4}$	$-0.75275e^{-5}$	$0.15501e^{-4}$

Tabla 5.7 :Desplazamientos en el eje y en el nodo del CCD

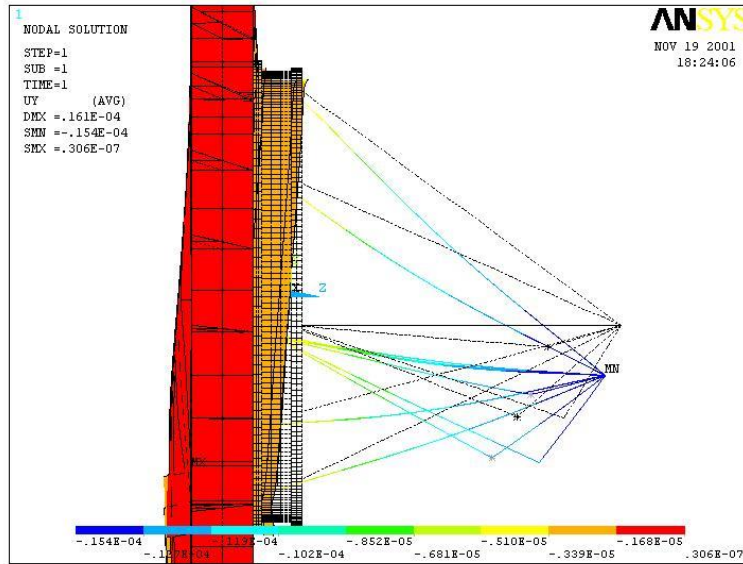


Figura 5.6: Desplazamientos totales en el eje y

Nodo	Ux (m)	Uy (m)	Uz (m)	UTotal (m)
27009	$-0.28425e^{-6}$	$0.13758e^{-4}$	$0.29870e^{-4}$	$0.32887e^{-4}$

Tabla 5.8: Desplazamientos en el eje z en el nodo de control del CCD

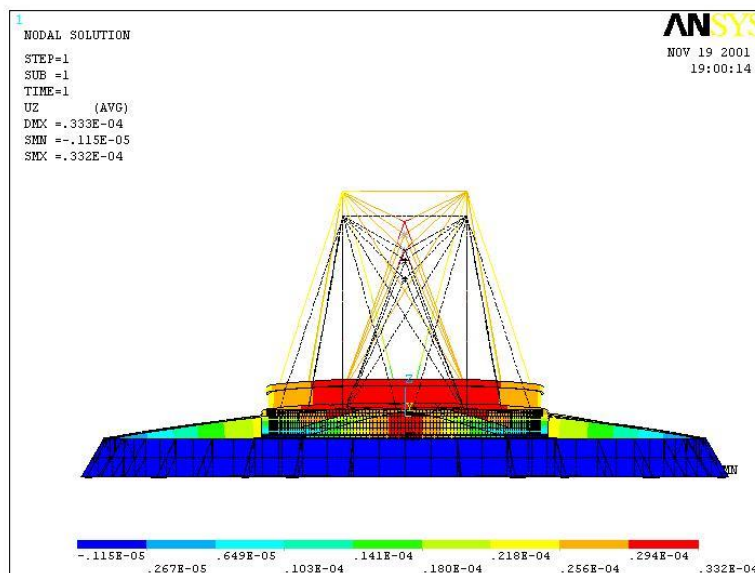


Figura 5.7: Desplazamientos totales en el eje z

En la Tabla 5.9 se muestra el resumen de resultados gravitacionales totales con rotacionales, una vez incluida en el análisis la flexibilidad del rodamiento de mesa giratoria.

	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)	Rotx (µrad)	Roty (µrad)	Rotz (µrad)
<b>Gravitacional X</b>	-46.7	0.07	0.18	-0.12	-29	-8.8
<b>Gravitacional Y</b>	0.028	-45.8	-12.8	33.89	0.05	-0.06
<b>Gravitacional Z</b>	-0.46	17.4	39.9	-22.3	-0.52	-0.003

Tabla 5.9: Desplazamientos gravitacionales incluyendo la flexibilidad del rodamiento

### 5.4.5 Análisis térmico

Como ya se mencionó en 5.4.3 Una herramienta auxiliar de 36 elementos es usada para el análisis térmico dichos elementos son unidos en el centro restringiendo en ese punto la rotación y el desplazamiento con el fin de simular el comportamiento durante la expansión térmica, es decir que se comporten como elementos unidos físicamente como es en realidad. El gradiente para el análisis es considerado en 1.8°C en una hora, como lo indica el requerimiento 2.1.2.10 del capítulo 2. Los resultados se muestran en la Tabla 5.10 y la Figura 5.7.

Nodo	Ux (m)	Uy (m)	Uz (m)	UTotal (m)
25383	-0.35547e <sup>-6</sup>	0.51143e <sup>-6</sup>	0.19593e <sup>-4</sup>	0.19599e <sup>-4</sup>

Tabla 5.10: Desplazamientos por gradiente térmico

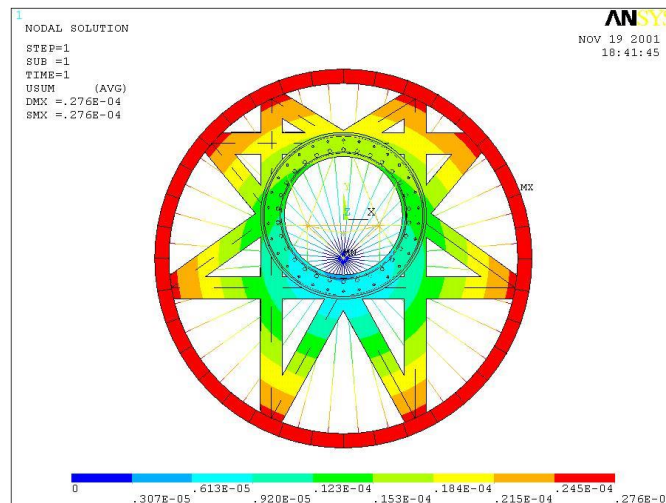


Figura 5.8: Deformación térmica

### 5.4.6 Análisis de frecuencias

En la Tabla 5.11 se muestran los resultados para los primeros cuatro modos de vibración de la estructura. La Figura 5.8 muestra la imagen del primer modo de vibración.

Número	Eigenfrecuencia (Hz)	Modo de vibración
1	108,2	Membrana circular de la estructura principal
2	131,53	Flexión general de la estructura principal al rededor del eje y
3	171,67	Flexión general de la estructura principal alrededor del eje x
4	193,62	Flexión de la estructura principal alrededor del eje x

Tabla 5.11: Primeros 4 modos de vibración del Instrumento

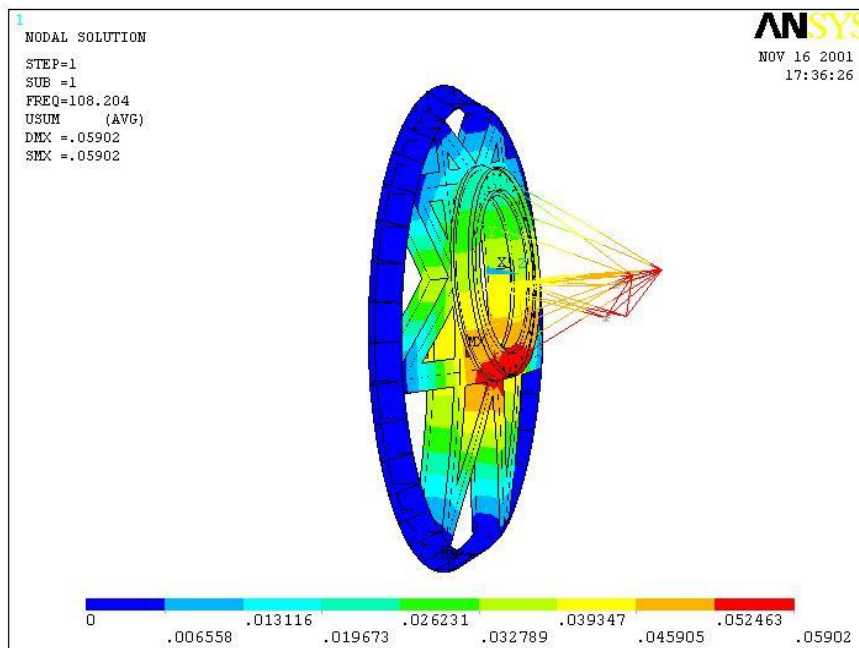


Figura 5.9: Primer modo de vibración del Instrumento

### 5.4.7 Verificación Análisis de elementos finitos con prueba experimental.

#### 5.4.7.1 Prueba de eigenfrecuencias

Con el fin de verificar el análisis de elementos finitos experimentalmente se realizó una medición de las frecuencias naturales<sup>3</sup> del Instrumento usando un analizador de espectro Bruel and Kjaer modelo Pulse 3560 C y un acelerómetro Bruel and Kjaer modelo 4506. Se

<sup>3</sup> Commissioning Instrument Eigenfrecuencias Test, Carlos Rubio, Vicente Bringas, EXT/UNAM, 21/02/03.



aplicó un peso muerto equivalente a la caja del instrumento y la platina de enfoque como muestra la Figura 5.9.

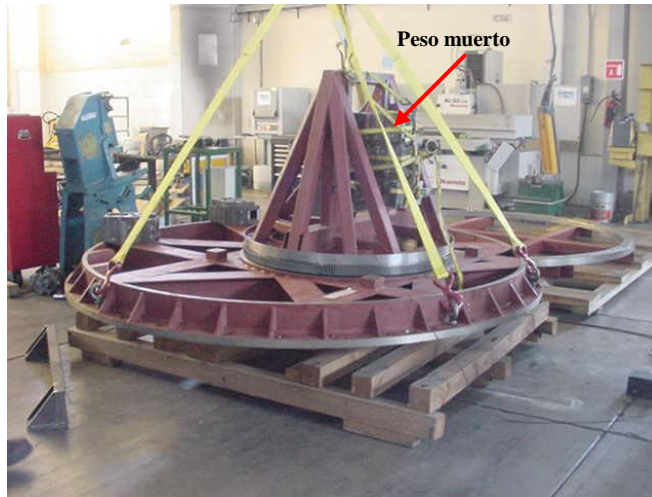


Figura 5.10: Instrumento con peso muerto en posición horizontal

El acelerómetro fue colocado en las posiciones x, y, z de acuerdo a sistema de coordenadas especificado en el punto 1.4.4. del Capítulo 1( Figura 5.10)

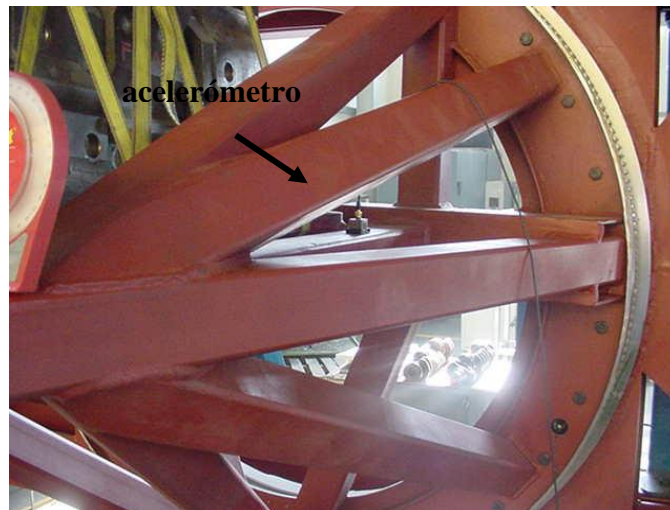


Figura 5.11: Acelerómetro montado en el instrumento en posición vertical

Diferentes posiciones fueron consideradas para el análisis, horizontal Figura 5.9, y vertical Figura 5.11. En la posición horizontal se consideró una sola lectura y posición, para la vertical se consideraron diferentes orientaciones de la estructura de soporte:  $\theta = 0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  y  $60^{\circ}$  respectivamente en sentido de las manecillas del reloj, ver Figura 5.11. Esto de acuerdo a especificación 2.1.3.2.4 del capítulo 2, excitando la estructura con un martillo y tomando lectura para cada posición de giro de la estructura, los resultados del análisis son mostrados en la Tabla 5.12.



Figura 5.12: Orientación de la estructura de soporte en posición vertical a 30 °

Posición de estructura $\theta$		1 <sup>ra</sup> y 2 <sup>da</sup> Frecuencia Natural (Hz)	
Horizontal		146	170
Vertical	0 <sup>0</sup>	131	168
	30 <sup>0</sup>	98	116
	45 <sup>0</sup>	98	114
	60 <sup>0</sup>	98	114

Tabla 5.12: Primeras dos frecuencias naturales del Instrumento

Dichos valores cumplen con la especificación 2.1.3.2.4 ya que todas las frecuencias están por encima de 60 Hz.

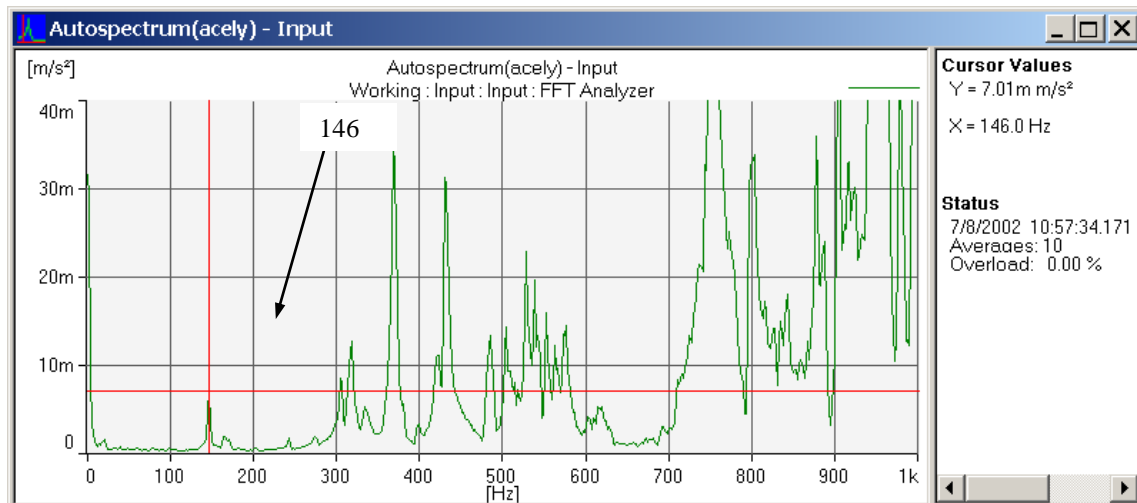


Figura 5.13: Espectro para la primera frecuencia horizontal

### 5.4.7.2 Prueba de flexión

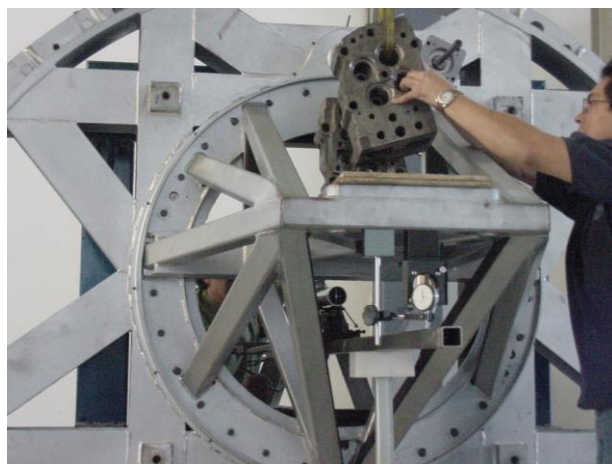
Se realizó la prueba de flexión de la estructura utilizando un telescopio de alineación y un indicador de carátula para medir el desplazamiento debido a la carga en la estructura de soporte.

*Descripción de la prueba:* se colocó el telescopio de alineación en la trayectoria óptica del instrumento colocando un espejo para medir los desplazamientos lineales y angulares de la estructura debido a la carga. Además se colocó un indicador de carátula en la posición extrema de la estructura de soporte para medir el desplazamiento como indica la Figura 5.14.



*Figura 5.14: Telescopio de alineación e indicador de carátula*

Se aplicó una carga de 135 kg en incrementos de 45 kg (ver Figura 5.15) y posteriormente se retiraron comprobando la homogeneidad en la lectura. Los resultados se muestran en la Tabla 5.13.



*Figura 5.15: Aplicación de carga a estructura de soporte*

PESO (kg)	DEFORMACIÓN EN $\mu\text{m}$
45	5
90	10
135	15

Tabla 5.13: Resultados de deformación a incremento de la carga

**Conclusión:** De los resultados de la prueba se aprecia que la deformación de 15  $\mu\text{m}$  a máxima carga, cumple las especificaciones requeridas y que comparándolas con el modelo de elemento finito nos indica que la deformación del rodamiento no afecta y se comporta completamente rígido como en la primera suposición que se muestra en la Tabla 5.7 del apartado 2.4.4 que indica un desplazamiento en el nodo de la posición del detector en  $y = -13 \mu\text{m}$  ( $-0.1355 \times 10^{-4} \text{ m}$ ) con un peso de 89.79 kg ( peso real de la caja del instrumento) lo que al comparar con el resultado de la prueba y en la posición extrema donde se midió que el sistema se comporta y cumple con las especificaciones mencionadas en el requerimiento 2.1.3.2.3 del capítulo 2. Además, comprueba los datos del fabricante de que para tener una deformación significativa del rodamiento esta comienza del 40 % al 60% de su capacidad de carga según la posición, en este caso sería el 40 % que equivale a 2617 kg en posición tangencial contra los 275.79 kg de carga en el instrumento lo que refleja una deformación despreciable.

#### 5.4.7.3 Prueba de desplazamiento lateral

Además de la prueba de flexión se realizó la prueba de los desplazamientos laterales de la caja del instrumento, para comprobar la especificación requerida.

*Descripción de la prueba:* Se colocaron indicadores de carátula en las posiciones lateral e inferior de la caja como muestra la Figura 5.16 para medir los posibles desplazamientos laterales al girar la estructura.

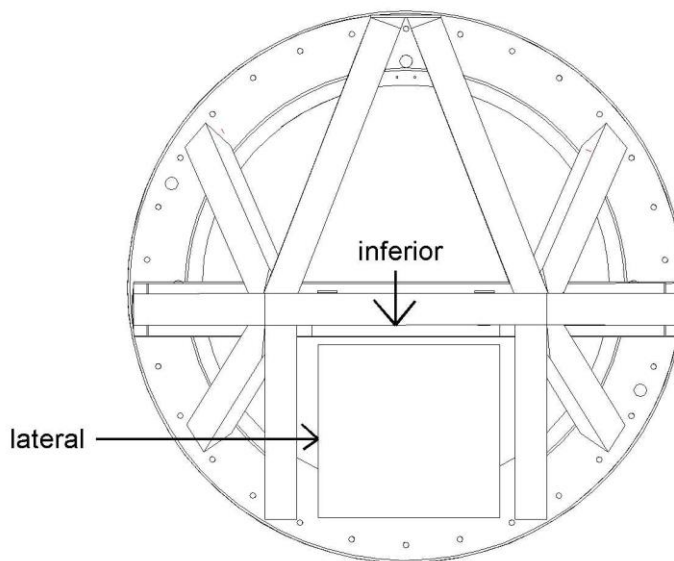


Figura 5.16: posiciones de medición

Se realizaron las mediciones a diferentes posiciones de rotación del instrumento como ilustran las Figura 5.17 registrando con el indicador el desplazamiento.



Figura 5.17: Medición de los desplazamientos

Los resultados se ilustran en la Tabla 5.14.

LATERAL ( $\mu\text{m}$ )	INFERIOR ( $\mu\text{m}$ )	ANGULO CCW
0	0	45
5	0	60
5	1	90
5	1	120
5	1	90
5	0	60
0	0	45

Tabla 5.14: Deformación a diferentes ángulos en sentido CCW

**Conclusión:** De los resultados de la prueba y de la Tabla 5.14. se deduce que los desplazamientos reales de la caja debido a las deformaciones de las guías y la platina, en la posición lateral, son de aproximadamente 5  $\mu\text{m}$  y en la inferior de 1  $\mu\text{m}$ . por lo que se cumple la especificación del requerimiento 2.1.3.2.3 del capítulo 2.

### 5.5 Sumario de presupuestos de error para verificación de especificaciones

La determinación de los datos de los presupuestos de error, para evaluar el cumplimiento de las especificaciones, son el resultado de los análisis de elementos finitos y los datos de los componentes comerciales proporcionados por los fabricantes.

### 5.5.1 Sensibilidad óptica

Para analizar los desplazamientos resultado del análisis de elementos finitos (ver Tabla 5.9), hay que tomar en cuenta que el Instrumento de Verificación trabaja como un reductor focal en el modo imagen (ver 7.2.2), con una reducción de  $\frac{1}{4}$  en la posición del CCD en la posición lateral (ejemplo Tabla 5.15) y de  $\frac{1}{16}$  en la posición axial (ejemplo Tabla 5.16).

<b>Dx (<math>\mu\text{m}</math>) (caja)</b>	<b>CCD x (<math>\mu\text{m}</math>) (detector)</b>	<b>Segundos de arco</b>
40	10	0.05
60	16	0.07
80	21	0.1

Tabla 5.15: Desplazamientos en la imagen del CCD debido a desplazamientos laterales de la caja del instrumento

<b>Z (mm) (caja)</b>	<b>CCDz (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
1	10
5	300
10	600

Tabla 5.16: Desplazamientos en la imagen del CCD debido al desplazamiento axial de la caja del instrumento

### 5.5.2 Desplazamientos

Las cargas aplicadas por la caja del instrumento, platina de enfoque y estructura de soporte al rodamiento de la mesa giratoria causan una deflexión en el mismo (Tabla 5.17). Tomando en cuenta las especificaciones, la Tabla 5.18, muestra los cambios en el tamaño de la imagen en el CCD, debido a los desplazamientos axiales de la caja del instrumento (Dx), o los desplazamientos axiales del CCD (dx).

Usando los parámetros de diseño de la óptica del Instrumento de Verificación e introduciéndolos a simulación en el software ZEMAX, es posible obtener la sensibilidad óptica del sistema debido a los desplazamientos térmicos y estructurales.

<b>Rotx (<math>\mu\text{rad}</math>)</b>	<b>CCDy (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Segundos de arco</b>
33	-1	0.005
70	-2	0.01
140	-5	0.025
280	-10	0.05
560	-20	0.1

Tabla 5.17: Desplazamientos en la imagen del CCD debidos a la deflexión del rodamiento

Dz (m) (caja)	CCDz (μm)	dx (m) (cambio lateral en la imagen)	Segundos de arco
500	31	0.8	0.0036
800	50	2	0.01
100	62	2.7	0.0123
1500	93	5.5	0.0252

Tabla 5.18: Cambios en el tamaño de imagen (rms) debidos al desplazamiento lateral de la caja del instrumento.

### 5.5.3 Deformación gravitatoria residual

Asumiendo que la rotación de la mesa giratoria es de  $120^\circ$  en sus posiciones extremas (Figura 5.18), y considerando los datos críticos de x, y de la Tabla 5.9, el desplazamiento en x puede ser formulado geoméricamente como sigue:

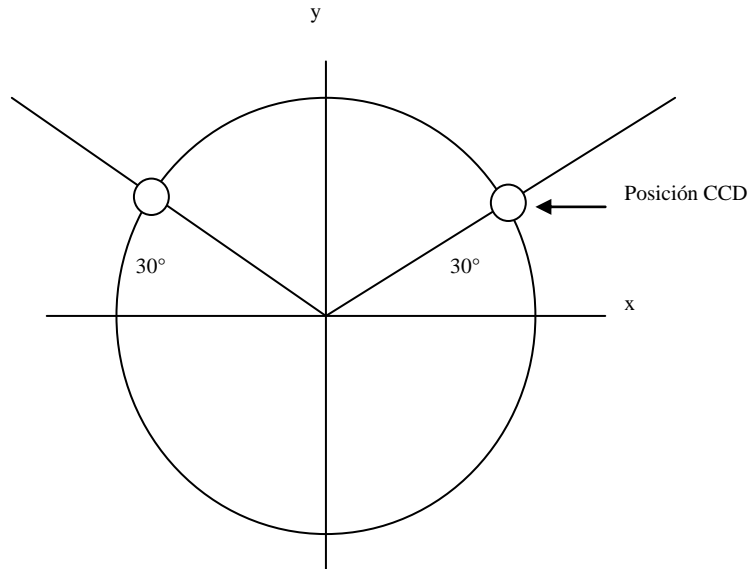


Figura 5.18: Posiciones del CCD al actuar el instrumento

$$46.7 \cos 30^\circ + 45.8 \sin 30^\circ = 63.34 \mu\text{m}$$

La diferencia en el desplazamiento de la imagen en el peor escenario será:

$$63.34 - 46.7 = 16.64 \mu\text{m}$$

Asumiendo que el desplazamiento de la imagen puede ser modelado y corregido un 20% el desplazamiento lateral producido por la deformación gravitacional residual será  $3.3 \mu\text{m}$ . Esto corresponde a  $0.83 \mu\text{m}$  en la posición del CCD por la reducción focal  $f_{\text{colimador}} / f_{\text{cámara}} = 3.99$ .

#### 5.5.4 Desplazamiento térmico no modelado

Para la evaluación del desplazamiento térmico no modelado, por el análisis de elemento finito, es considerado el peor escenario de posiciones extremas. Sabiendo que el instrumento está construido de diferentes materiales, con un gradiente de 1.8°C, se evalúan los desplazamientos en forma geométrica.

La distancia entre el centro del rodamiento y el foco o eje óptico es de 303,36 mm que con una constante de dilatación térmica de  $11,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  para el acero, con lo que resulta un desplazamiento debido al rodamiento de:

$$\Delta l = (l_{\text{inicial}}) \alpha (T_2 - T_1) = 303,36 (11,7 \times 10^{-6})(1,8) = 6,38 \text{ } \mu\text{m}.$$

Por otra parte y de la misma forma, la caja del instrumento está soportada por una platina de aluminio con constante  $22 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  y longitud de 46,02 mm, unas guías de acero de 33,00 mm, una placa base de 40 mm, una platina de acero de 37 mm, y una base del CCD de 54,5 mm por lo que el desplazamiento total en el CCD será de  $(46.02)(22 \times 10^{-6})(1.8) + (33)(11.7 \times 10^{-6})(1.8) + (40)(22 \times 10^{-6})(1.8) + (37)(11.7 \times 10^{-6}) + (54)(22 \times 10^{-6})(1.8) \approx 7 \text{ } \mu\text{m}$ . La incertidumbre relacionada es del 25 % del valor anterior. Esto corresponde a 0.43  $\mu\text{m}$  debido a la reducción focal de  $f_{\text{colimador}} / f_{\text{cámara}} = 3.99$ , en la posición del detector de CCD.

#### 5.5.5 Incertidumbre de posición lateral

La siguiente tabla muestra los resultados de la incertidumbre de posición lateral:

Fuente de error	Efecto( $\mu\text{m}$ ) con factor de reducción
Desplazamiento gravitacional residual	0,83
Run-out radial del rodamiento de la mesa giratoria (Total = 7,63 $\mu$ , no repetitivo (20%)=1,9 $\mu$ ), en el CCD	0,47
Precisión del encoder de la mesa giratoria ( $\pm 3$ arc sec; HEIDENHAIN)	1,6
Desplazamientos térmicos no modelados por elemento finito	0,43
Factor de seguridad 100 % del total rms de los anteriores	1.91
<b>TOTAL</b>	<b>2.7 rms</b>

Tabla 5.19: Incertidumbre de posición lateral

De acuerdo al requerimiento 2.1.2.1 del capítulo 2 la incertidumbre de posición lateral requerida es de 0.02 segundos de arco que equivale a 4.42  $\mu\text{m}$  en el CCD, de acuerdo a la tabla 5.19 tenemos 2.7  $\mu\text{m}$  por lo que este requerimiento se cumple.



### 5.5.6 Repetibilidad de la posición lateral

La repetibilidad de la posición lateral requerida de acuerdo a especificación 2.1.2.2 es de 0.1 segundos de arco que equivale a 22  $\mu\text{m}$  en el CCD.

La repetibilidad esta dada por la incertidumbre de posición lateral de 2,71  $\mu\text{m}$  mas el movimiento causado por el accionamiento del freno magnético de aproximadamente 60  $\mu\text{m}$ , el cual se ve reducido a un valor de 15  $\mu\text{m}$  por el factor de reducción focal de 3,99. La Tabla 5.20 muestra el resultado de 21,55  $\mu\text{m}$  por lo que esta especificación se cumple.

Fuente de error	Efecto ( $\mu\text{m}$ )
Incertidumbre de posición lateral	2.71
Accionamiento del freno magnético	15
Factor de seguridad 100 % del total rms de las anteriores	15,24
<b>TOTAL</b>	<b>21,55 rms</b>

Tabla 5.20: Repetibilidad de posición lateral

### 5.5.7 Estabilidad de posición lateral

De acuerdo a la especificación 2.1.2.3., la estabilidad de la posición lateral, es de 0.1 segundos de arco, que equivale a 22  $\mu\text{m}$  en el CCD. Dicha estabilidad esta dada por el desplazamiento térmico no modelado y el gravitacional. En la posición del CCD, la deformación total gravitacional máxima medida Tabla 5.13, es de 15  $\mu\text{m}$  resultando ser de 4  $\mu\text{m}$  aproximadamente, debido al factor de reducción óptica lateral del instrumento  $f_{\text{colimador}} / f_{\text{cámara}} = 3,99$ .

Del resultado de la Tabla 5.21 la estabilidad es de 11,4  $\mu\text{m}$  por lo que la especificación se cumple.

Fuente de error	Efecto ( $\mu\text{m}$ )
Desplazamiento gravitacional medido	4
Desplazamiento térmico no modelado por elemento finito (2.5.4)	7
Factor de seguridad 100% del rms de los anteriores	8,06
<b>TOTAL</b>	<b>11.4 rms</b>

Tabla 5.21: Estabilidad de posición lateral

### 5.5.8 Repetibilidad de la posición axial

De la Tabla 5.9 el valor del desplazamiento gravitacional máximo en z es de 39.9  $\mu\text{m}$ . Sin embargo el factor de reducción focal como ya se mencionó en 5.5.1 reduce los desplazamientos en 1/16. Esto significa que el desplazamiento axial en la posición del CCD es de 2.49  $\mu\text{m}$ . Asumiendo que el desplazamiento axial puede ser modelado y corregido un 20% el desplazamiento producido por la deformación gravitacional residual es de 0.5  $\mu\text{m}$ . De acuerdo al desplazamiento térmico calculado en el análisis de elemento finito en el eje z (Tabla 5.10) es de 19.59  $\mu\text{m}$ , éste no se reduce ya que es directo a la base del CCD. El run-out axial del rodamiento es de 7,63  $\mu\text{m}$  (certificado del fabricante). Asumiendo un run-out no repetible del 25% el efecto de 7,63 mm en la posición axial del run-out del rodamiento es de 0,12  $\mu\text{m}$  por el factor de reducción 1/16.

La repetibilidad de la platina de enfoque es de 1,6  $\mu\text{m}$  (certificado de fabricante). Esto corresponde a 0.1  $\mu\text{m}$  en la posición del CCD. El valor de repetibilidad de la platina del detector de CCD es de 5  $\mu\text{m}$  (certificado de fabricante), este valor es directo ya que el CCD está montado sobre ella. La Tabla muestra los resultados de la posición axial.

Fuente de error	Efecto ( $\mu\text{m}$ )
Deformación gravitacional	0,5
Run-out del rodamiento de la mesa giratoria	0,12
Desplazamiento térmico modelado	19.59
Repetibilidad de la platina de enfoque	0,1
Repetibilidad de la platina del detector de CCD	5
Factor de seguridad 100 % del total rms de los anteriores	20,22
<b>TOTAL</b>	<b>28 rms</b>

Tabla 5.22: Incertidumbre de posición axial

De acuerdo al requerimiento 2.1.2.4 la incertidumbre de posición axial requerida es de 0.01 segundos de arco equivalente a 50  $\mu\text{m}$  en la posición del CCD (Tabla 5.18 segunda fila), de la Tabla 5.22 el resultado es de 28  $\mu\text{m}$ , por lo que la especificación se cumple.

### 5.5.9 Certificados de rendimiento de los componentes

Con el fin de verificar el cumplimiento de especificaciones, y para la realización de los cálculos de presupuestos de error, se solicitó a los fabricantes los certificados de laboratorio e inspección de las características de los componentes. En el anexo 1 se muestran algunos de los certificados.

## 5.6 Cálculos dinámicos

### 5.6.1 Mesa giratoria

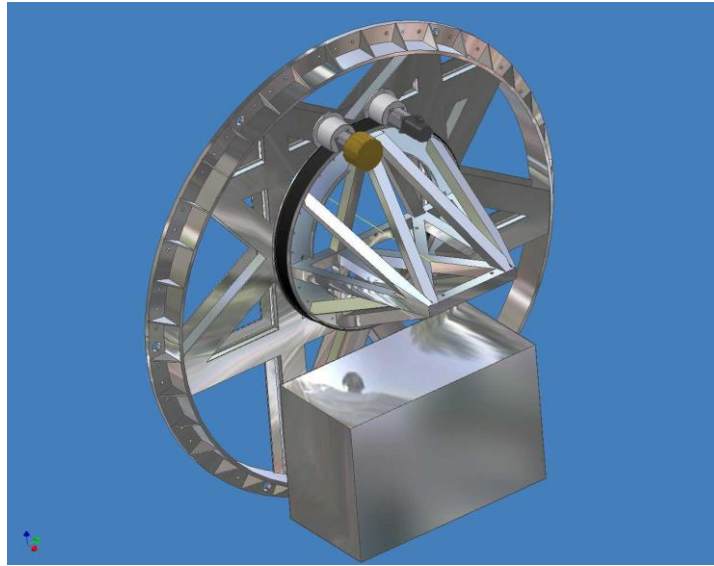


Figura 5.19: Mesa giratoria y componentes montados en la estructura principal

#### ***datos de entrada:***

$\theta = 240^\circ$ ;  $\theta$  = desplazamiento angular

$t = 30$  s;  $t$  = tiempo de rotación en segundos

$\omega_0 = 0$ ;  $\omega_0$  = velocidad angular inicial

#### ***desplazamiento angular en radianes:***

$$\theta_t = \frac{\pi}{180} \text{grados} = (240^\circ) (0.017453) = 4.188 \text{ rad}$$

#### ***Movimiento uniformemente acelerado:***

(considerando una velocidad nominal de  $8.5^\circ/\text{s}$  “requerimiento”)

$$\omega_f = \frac{2\theta}{t} \quad \omega_f = \frac{2(4.188)}{30} = 0.2792 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \text{velocidad final rad/s} \quad (5.1)$$

$$\omega_n = 8.5(0.01745) = 0.1483 \text{ rad/s} \quad \text{velocidad constante} \quad (5.2)$$

de la siguiente ecuación:

$$\theta_t = 2\theta_a + \theta_{cte} = 2\left(\frac{\omega_n t_a}{2}\right) + \omega_n t, \quad (5.3)$$

obtenemos:

$$t_a = \frac{\omega_n t - \theta_t}{\omega_n} = \frac{0.1483(30) - 4.188}{0.1483} = 1.759 \text{ s} \quad \text{tiempo de aceleración} \quad (5.4)$$

$$t\omega_c = t - 2 t_a = 30 - 2(1.759) = 26.48 \text{ s} \quad \text{tiempo de velocidad constante} \quad (5.5)$$

$$\alpha = \frac{\omega_n}{t_a} = \frac{0.14835}{1.759} = 0.0843 \text{ rad/s}^2 \quad \text{aceleración angular} \quad (5.6)$$

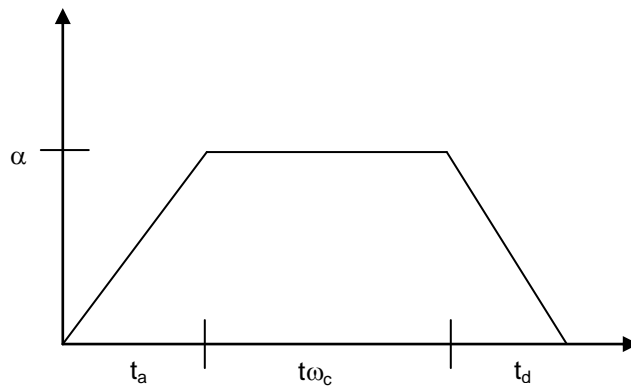


Figura 5.20: Diagrama de movimiento de la mesa giratoria

### Momento polar de inercia

De la tabla 2.3 tenemos:

masa de rodamiento 166 kg

masa de la caja del instrumento 51.29 kg

masa del controlador de CCD 6 kg

masa de la estructura de soporte 180 kg

masa de la platina de enfoque 38.5 kg

masa de los contrapesos 90 kg

masa del ducto de cable 30 kg

Considerando las masas anteriores a un radio de giro de 0.56 m tenemos

$$J_m = \frac{1}{2}mr^2 = \frac{1}{2}(561.79)(0.56)^2 = 88.08 \text{ kg.m}^2 \quad \text{momento de inercia} \quad (5.7)$$

### Par de giro

De los datos del fabricante del rodamiento de rodillos cruzados modelo RD839E1

Número de dientes: 278

Diámetro de paso: 1112 mm

Peso: 166 kg

Módulo: 4

Precarga diametral: 0.033 mm

Par resistente  $M_r = 216 \text{ Nm}$  (de dato de fabricante en prueba)

Momento resistente del ducto de cable (radio =0.556 m):

$$M_{CW} = (30 \times 9.81)(0.556) = 163.63 \text{ Nm}$$

Par resistente debido a las cargas ( $T_r$ ):

$$T_r = J_m \alpha + M_{CW} - M_r \quad (5.8)$$

$$T_r = (88.08)(0.0843) + 163.63 - 216$$

$$T_r = -44.94 \text{ Nm}$$

*Par de rotación requerido por la mesa giratoria*

$$T_t = J_m \alpha + M_{CW} + M_r \quad (5.9)$$

$$T_t = (88.08)(0.0843) + 163.63 + 216$$

$$T_t = 387.05 \text{ Nm}$$

Durante la operación del instrumento por requerimiento debe cortarse la energía del motor de la mesa giratoria garantizando la estabilidad y conservación de la posición especificación 2.1.3.3.1. del Capítulo 2.

Debido a lo anterior y al cálculo del par resistente de  $-44,94 \text{ Nm}$  el sistema debe conservar su posición. Por otro lado como medida de seguridad para garantizar lo anterior se incluirá un freno magnético acoplado a un engrane motriz de 32 dientes, de las siguientes características:

Freno magnético ajustable Sjogren modelo SMB – 120 (Figura 5.21)  
Capacidad de par resistente: 1.13 – 13.5 Nm



Figura 5.21: Freno Sjögren SMB-120

Par requerido por el motor

Datos del reductor

STEALTH PS115 (reductor planetario recto de cero juego)

Reducción (Sr) 30:1

Piñón motriz 32 dientes

Rodamiento 278 dientes

Relación de reducción piñón- rodamiento (Grb) 8.6:1

Par nominal del reductor  $T_m = 226 \text{ Nm}$

Par pico: 675 Nm

Eficiencia:  $(\eta) = 0.9$

El par requerido por el motor será

$$T_m = \frac{T_t}{S_r \cdot G_{rb} \cdot \eta} \quad T_m = \frac{387.05}{[(30)(8.6)(0.9)]} \quad (5.10)$$

$$T_m = 1.66 \text{ Nm}$$

El motor seleccionado es un Berger Lahr modelo VRDM 3913 (Figura 5.22) con par nominal de y par máximo de 6 Nm por lo que el factor de seguridad para el motor será:



Figura 5.22: reductor STEALTH PS115 con motor VRDM3910

$$F_S = \frac{T_{rm}}{T_m} = \frac{6}{1.66} = 3.61 \quad (5.11)$$

El par requerido a la salida del reductor será:

$$T_{req} = \frac{T_t}{G_{rb}} \quad T_{req} = \frac{387.05}{[(8.6)]} \quad (5.12)$$

$$T_{req} = 45 \text{ Nm}$$

El factor de seguridad del reductor será:

$$F_S = \frac{T_{red}}{T_{req}} = \frac{226}{45} = 5.02 \quad (5.13)$$

El Freno magnético entregará una capacidad de par al rodamiento de :

$$Cfm = 13.5 \times 8.6 = 116.1 \text{ Nm}$$

Encoder de mesa giratoria:

Para garantizar que el encoder registre la lectura requerida en especificación tenemos:

$r = 439.00 \text{ mm}$  (radio del rodamiento en la posición del encoder)

$\alpha = 3 \text{ arcseg}$  (resolución del rodamiento)

$l =$  Incertidumbre mínima de posición al radio dado

$$l = \frac{(r)(\alpha)(3.1416)}{180} \quad (5.14)$$

$$l = \frac{(439)(8.33 \times 10^{-4})(3.1416)}{180}$$

$$l = 0.00638 \text{ mm}$$

**Verificación:** Los cálculos anteriores verifican el cumplimiento de las especificaciones 2.1.3.1.1, 2.1.3.1.2, 2.1.3.2.1, 2.1.3.2.2, 2.1.2.2, 2.1.2.3 y 2.1.2.4

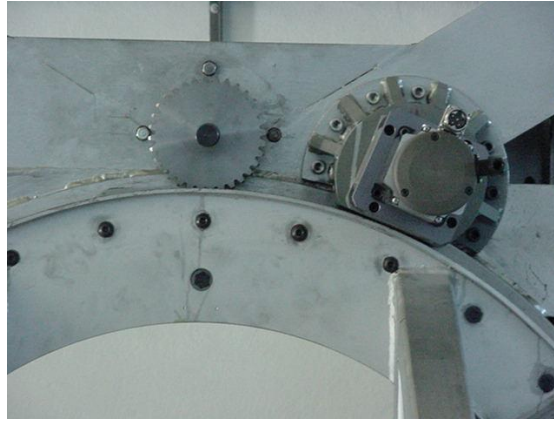


Figura 5.23: Sistema de motor-reductor y freno montados

### 5.6.1.1 Verificación de los cálculos de par requerido.

Par de giro especificado por Rothe Erde sin carga: 216.9 N-m

Descripción de la prueba: La prueba se realizó colocando un peso equivalente a 135 kg en la posición de la caja del instrumento como ilustra la Figura 5.24.

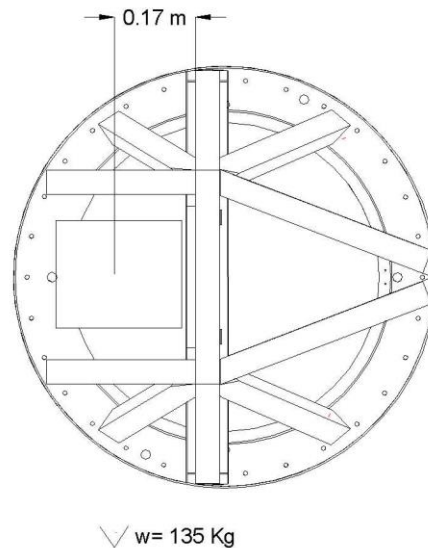


Figura 5.24: Colocación del peso de prueba

El par se registro con un giro de 360° aplicando la fuerza con un torquímetro en el centro del piñón motriz como indica la Figura 5.25.





Figura 5.25: Medición del par requerido

Se determinó el par máximo en la posición lateral del peso de 135 kg con un desbalanceo total más la fricción del rodamiento resultando ser de 80 N-m en el centro del piñón equivalente al que tendría que suministrar el motor en esta condición crítica. Ahora teniendo una reducción de 30 a 1 el motor requeriría un par de:

$$T_{\text{motor}} = 2.66 \text{ N-m}$$

**Conclusión:** El par del motor Berger Lahr VRDM 3913 es de 6 N-m con lo cual se verifica que aún en condiciones extremas el motor proporciona el movimiento con seguridad.

### 5.6.1.2 Verificación de estabilidad de la estructura de soporte

Se realizó también la prueba de estabilidad, la cual permite comprobar la necesidad de el freno Sjogren modelo SMB-120 con capacidad resistente de 1.13 – 13.5 N-m.

Descripción de la prueba: Se realizó la prueba colocando 135 kg en la posición de la caja del instrumento en la posición crítica de desbalanceo lateral, como indica la Figura 5.26.



Figura 5.26: Peso de prueba en posición lateral

Se registró por medio de un micrómetro el desplazamiento rotacional en el tiempo con la carga, como indica la Figura 5.27.



*Figura 5.27: Medición del desplazamiento rotacional*

Los resultados fueron de un desplazamiento de 200 micras por hora con el desbalanceo de 135 Kg.

**Conclusión:** de la prueba de par y estabilidad concluimos que con un desbalanceo de 135 Kg se requiere un par de 26.16 N-m al centro del rodamiento para moverlo incluida la fricción con la carga desbalanceada, por lo que el freno de par máximo a la flecha de 13 N-m es suficiente para sostener la carga en posición ya que la relación del freno con el engrane es de 8.6:1 se tendría un par de 104 N-m al centro del rodamiento como indica el requerimiento 2.1.3.2.3 con el cambio del vector gravedad a cualquier posición. Además el peso real de la caja con la platina de enfoque es de 84 kg y se encuentra balanceado con contrapesos por lo que como indican los cálculos se espera una demanda real de par al motor incluyendo ducto de cable, la fricción y caja del controlador de CCD de 1.66 N-m y por estar balanceado la calibración del freno en su rango menor de 1.13 N-m a la flecha será suficiente para mantener el sistema estable ocasionando al motor un incremento de par por resistencia al freno por la relación de 8.6:1 equivalente a 1.79 N-m cumpliendo así con las características de diseño requeridas.

### 5.6.2 Platina de enfoque

La platina de enfoque consta de un husillo de bolas y dos correderas de guías lineales (Figura 5.28). El husillo está acoplado a un motor Berger Lahr VRDM 3910 con freno magnético integrado de desconexión eléctrica al frenar, para cumplir especificación. En esta platina se monta la caja del instrumento que a su vez se monta sobre la estructura soporte (ver Figura 5.29). A continuación se describen los cálculos de selección:

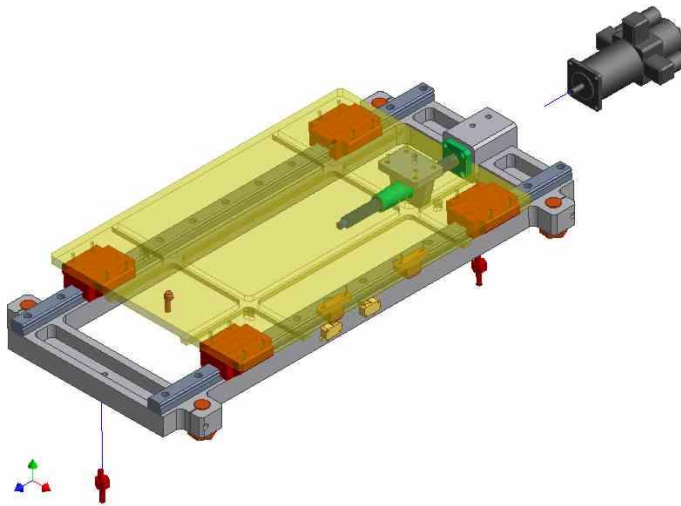


Figura 5.28: Platina de enfoque con guías, husillo y motor

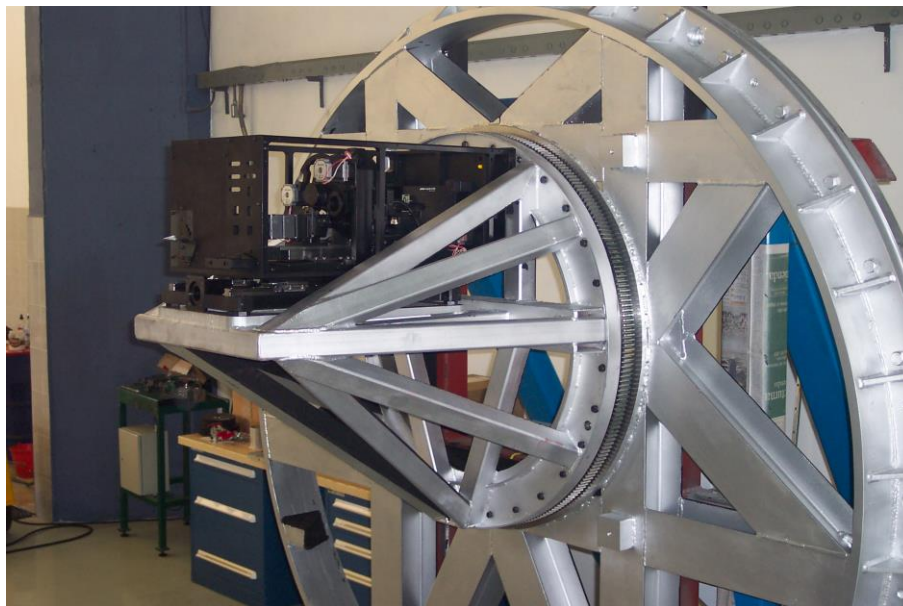


Figura 5.29: Caja del instrumento y platina montados en estructura

Cálculos del par del motor de la platina.

Los siguientes cálculos se basan en el catálogo E3154 del fabricante NSK

Velocidad constante (m/s)	$v = 0.005 \text{ m/s}$
Peso de la caja del instrumento	$m = 51.29 \text{ kg}$
Tiempo de movimiento requerido	$t = 15 \text{ sec.}$
Desplazamiento requerido	$S = 70 \text{ mm}$
Aceleración gravitacional	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Coefficiente de fricción de las guías lineales	$\mu = 0.01$
NSK modelo LS25LA-Z3	

Especificación del husillo de bolas NSK MJFD1602-4

Precarga	$(F_{ao}) = 351 \text{ N}$
Paso	$l = 0.2 \text{ cm}$
Eficiencia normal	$(\eta) = 0.9$
Diámetro circular de la pista de las bolas	$dm = 1.64 \text{ cm}$

$$t_a = \frac{v \cdot t_r - S}{v} \quad (5.15)$$

$$t_a = \frac{(0.005)(15) - (0.07)}{0.005} = 1 \text{ s} \quad \text{tiempo de aceleración}$$

$$t_{\omega_c} = t - (2)(t_a) \quad (5.16)$$

$$t_v = 15 - (2)(1) = 13 \text{ sec.} \quad \text{tiempo de velocidad constante}$$

$$a = \frac{v}{t_a} = \frac{0.005}{1} = 0.005 \frac{m}{s^2} \quad (5.17) \quad \text{aceleración lineal}$$

Como el sistema funciona tanto en forma vertical como horizontal tenemos:  
Operación en el eje horizontal

Fuerza de par dinámico de fricción:

Para cada unidad de guía lineal de embalada la fuerza de fricción dinámica depende del valor de precarga. Para el caso de las guías LS25L-Z3 tenemos:

$$F_1 = (i)(P)(S) \quad (5.18) \quad \text{donde:}$$

$F_1$  = Fuerza de fricción dinámica  
 $i$  = Coeficiente de contacto (0.004) en este caso  
 $P$  = Precarga (880 N)  
 $S$  = Número de correderas (4)

$$F_1 = 0.004 (880)(4) = 14.08 \text{ N}$$

Par del husillo precargado ( $T_{po}$ ) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$T_{po} = 0.014 F_{ao} \sqrt{dm * l} \quad (5.19)$$

Donde

$dm$  es el diámetro circular de la pista de las bolas

$l$  es el paso del husillo, resultando:

$$T_{po} = 0.014 (351) \sqrt{(1.64)(0.2)}$$

$$T_{po} = 2.814 \text{ Ncm}$$

El par de fricción del soporte ( $T_u$ ) del husillo de datos de fabricante es:

$$T_U = 2.1 \text{ Ncm}$$

La carga axial a velocidad y aceleración constantes ( $F_a$ ) será

$$F_a = \mu m g + m a + F_1 \quad (5.20)$$

$$F_a = [(0.01) (51.29) (9.81)] + [(51.29) (0.005)] + 14.08$$

$$F_a = 19.37 \text{ N}$$

La conversión del par rotacional a movimiento lineal será:

$$T_a = \frac{F_a l}{2\pi \eta} = \frac{(19.37)(0.2)}{(2)(3.1416)(0.9)} \quad (5.21)$$

$$T_a = 0.685 \text{ Ncm}$$

El par resultante del motor ( $T_m$ ) en la posición horizontal será:

$$T_m = T_{po} + T_a + T_u \quad (5.22)$$

$$T_m = 2.814 + 0.685 + 2.1$$

$$T_m = 5.6 \text{ Ncm} = 0.056 \text{ Nm}$$

Operación en el eje vertical

Las fuerzas aplicadas son calculadas para cada corredera asumiendo que la caja del instrumento está posicionada verticalmente:

Fricción de las correderas (con carga)

Cada corredera se calcula usando la siguiente ecuación:

$$P_1 = \sum \frac{F}{4} + \sum \frac{K_p}{2}, \quad (5.23) \quad \text{donde:}$$

$P_1$	Carga en cada corredera
$K_p$	Coefficiente de posición de carga
$F$	Carga total (503.16 N)

El coeficiente de posición de carga ( $K_p$ ) es calculado por la siguiente ecuación:

$$K_p = \frac{Z_1}{L_b} + \frac{Y_1}{L_b}, \quad (5.24) \quad \text{donde:}$$

$Z_1$	punto de carga 146.5 mm
$Y_1$	distancia de corrimiento del punto de carga 0 mm
$L_b$	largo de corredera 449 mm
$L_r$	ancho de corredera 250 mm

$$K_p = \frac{146.5}{449} + \frac{0}{449}$$

$$K_p = 0.326$$

$$P_l = \frac{503.16}{4} + \frac{(0.326)(503.16)}{2}$$

$$P_l = 207.8 \text{ N}$$

Fuerza de fricción del rodamiento del husillo (con carga)

$$F_{rs} = \mu P_l S \quad (5.25)$$

$$F_{rs} = (0.01)(207.8)(4)$$

$$F_{rs} = 8.3 \text{ N}$$

Par del husillo

El par básico del husillo precargado ( $T_{po}$ ) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$T_{po} = 0.014 F_{ao} \sqrt{dm * l} \quad (5.26)$$

$$T_{po} = 0.014 (351) \sqrt{(1.64)(0.2)}$$

$$T_{po} = 2.814 \text{ Ncm}$$

Par de fricción del soporte del husillo ( $T_u$ ) según dato fabricante será:

$$T_u = 2.1 \text{ Ncm}$$

Carga axial

La carga axial a velocidad y aceleración constante ( $F_a$ ) será:

$$F_a = m g + m a + F_{rs} + F_l \quad (5.27)$$

$$F_a = (51.29) (9.81) + (51.29) (0.005) + 8.3 + 14.08$$

$$F_a = 525.8 \text{ N}$$

La conversión del par rotacional a movimiento lineal será:

$$T_a = \frac{F_a l}{2\pi \eta} = \frac{(525.8)(0.2)}{(2)(3.1416)(0.9)} = 18.59 \text{ Ncm} \quad (5.28)$$

El par resultante del motor ( $T_m$ ) en la posición vertical será:

$$T_m = T_{po} + T_a + T_u \quad (5.29)$$

$$T_m = 2.814 + 18.59 + 2.1$$

$$T_m = 23.5 \text{ Ncm} = 0.235 \text{ Nm}$$

Debido a que el par máximo obtenido de los cálculos es el de la posición vertical con un valor de  $T_m = 0.235 \text{ Nm}$ , comparándolo con el motor VRDM 3910 cuyo par máximo es de  $T_{rm} = 3.5 \text{ Nm}$  el factor de seguridad será:

$$F_s = \frac{T_{rm}}{T_m} = \frac{3.5}{0.235} = 14.89 \quad (5.30)$$

**Verificación:** Los cálculos anteriores verifican el cumplimiento de las especificaciones 2.1.3.1.4, 2.1.3.2.5, 2.1.3.2.6, 2.1.3.2.7, 2.1.3.2.8, 2.1.3.2.9.

### 5.6.3 Cálculo de los retentores y pivotes flexurales.

A continuación se muestran los cálculos del par del motor requerido para que las ruedas de cámara, lentes, filtros y fibra de calibración sean sacadas de su posición de retención (ver Figura 5.30). El cálculo es idéntico para todas ya que el paso y diámetros de las ruedas son equivalentes.

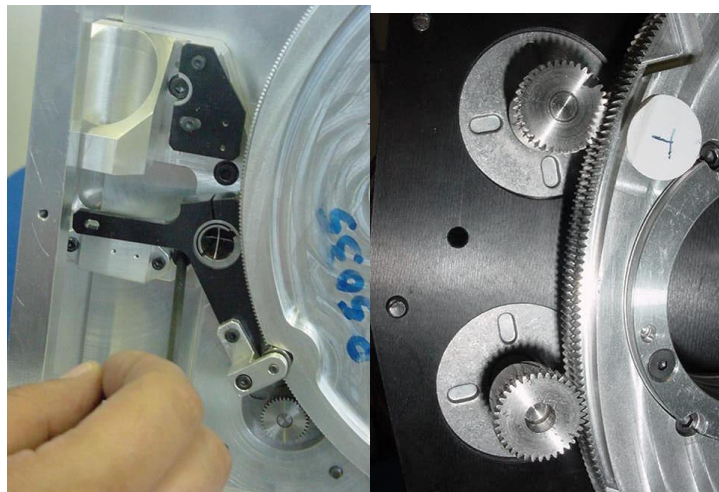


Figura 5.30: Sistema de retentor y pivote flexural montados en la rueda y engranaje de motor-rueda



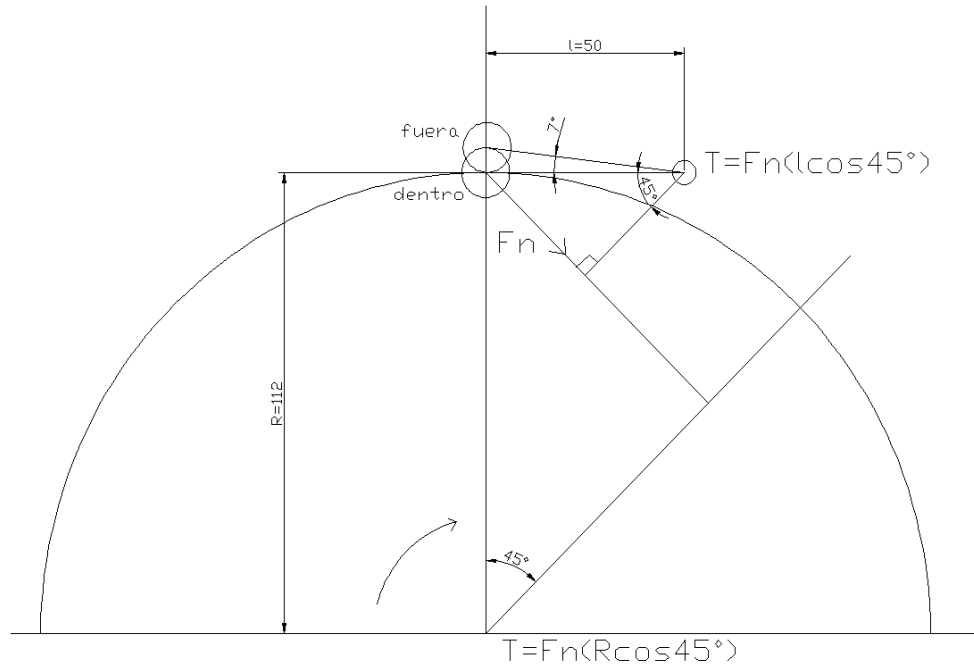


Figura 5.31: Posición geométrica del retentor y la rueda

Especificaciones del motor Berger Larh VRDM 266 y la rueda -piñón

Par máximo ( $T_a$ ) = 0.45 Nm

Par requerido para moverlo sin energía ( $T_b$ ) = 0.02 Nm

$D_{\text{piñón}} = 18$  mm (pinion)

$D_{\text{rueda}} = 228$  mm (wheel)

$R_{\text{min rueda}} = 112$  mm (radio efectivo de contacto de la rueda con el retentor)

Eficiencia de sistema rueda-piñón:  $\eta = 0.9$

Par del rodamiento central de la rueda  $T_1 = 0.258$  Nm

Brazo de palanca del retentor:  $L = 50$  mm

Relación rueda-piñón

$$i = \frac{D_{\text{rueda}}}{D_{\text{piñón}}} = \frac{228}{18} = 12.66 \quad (5.31)$$

El par requerido para mover el motor sin energía es  $T_b = 0.02$  Nm. Es decir el par que debe ejercer el pivote del retentor para colocar la rueda en posición de retención:

$$T_{\text{frmotor}} = \frac{T_b(i)}{\eta} = \frac{0,02(12,66)}{0,9} \quad (5.32)$$

$$T_{\text{frmotor}} = 0,281$$

Por lo que el par resistente para mover la rueda a su posición será la suma del par requerido por el motor, más el par del rodamiento central de la rueda:

$$T_{resistente\ rueda} = T_{fmotor} + T_l \quad (5.33)$$

$$T_{resistente\ rueda} = 0,281 + 0,258$$

$$T_{resistente\ rueda} = 0.539\ Nm$$

Considerando un factor de seguridad de 1.5 tenemos:

$$T_{resistente\ rueda} = 0,539 (1,5) = 0.8085\ Nm$$

Por lo tanto el par requerido por el pivote flexural para mover la rueda es (Figura 5.31):

$$T_{pivote} = Fn (l * \cos 45^\circ), \quad Fn = T_{pivote} / (l * \cos 45^\circ) \quad (5.34) \quad \text{donde:}$$

Fn es la fuerza normal y L es el brazo de palanca del retentor

$$T_{resistente\ rueda} = Fn (R_{min\ rueda} * \cos 45^\circ), \quad Fn = T_{resistente} / (R_{min\ rueda} * \cos 45^\circ) \quad (5.35)$$

Igualando Fn :

$$\frac{T_{pivote}}{(L)(\cos 45^\circ)} = \frac{T_{resistente\ rueda}}{(R_{min\ rueda})(\cos 45^\circ)} \quad (5.36)$$

$$T_{pivote} = \frac{T_{resistente\ rueda} (l * \cos 45^\circ)}{R_{min\ rueda}} = \frac{0,8085(0,05)(\cos 45^\circ)}{0,112(\cos 45^\circ)}$$

$$T_{pivote} = 0,3609\ Nm \quad \text{Par requerido por el pivote}$$

Ahora el ángulo de flexión del pivote será:

$$\theta_{pivote} = \frac{T_{pivote}}{K_{pivote}} = \frac{0,3609}{0,04497}, \quad (5.37) \quad \text{donde:}$$

K es de catálogo de fabricante de pivote para el caso K = 0.04497 por grado entonces:

$$\theta_{pivote} = 8.02^\circ$$

Para que la rueda sea liberada de requiere que además el pivote gire otros 7° tenemos:

$$\theta_{pivote} = 8,02^\circ + 7^\circ = 15,02^\circ \quad \text{ángulo de giro del pivote}$$

El par total requerido por el pivote para 15.02 ° será:

$$T_{pivoterequerido} = K_{pivote} (\theta_{pivote}) \quad (5.38)$$

$$T_{pivoterequerido} = (0.04497)(15,02) = 0.675\ Nm$$

El par resistente para 15.02° en la rueda será

$$T_{resistente} = \frac{T_{pivoterequido}(R_{\min \text{ rueda}})}{l} = \frac{(0,675)(0,112)}{0,050} \quad (5.39)$$

$$T_{resistente} = 1,512 \text{ Nm}$$

Por lo tanto el par resistente de la rueda (wtrt) es:

$$T_{wtrt} = T_{resistente} + T_{resistente \text{ rueda}}$$

$$T_{wtrt} = 1,512 + 0,8085 = 2,32 \text{ Nm}$$

El par del motor será:

$$T_{motor} = \frac{T_{wtrt}}{\eta(i)} = \frac{2,32}{0,9(12,66)} \quad (5.40)$$

$$T_{motor} = 0,203 \text{ Nm}$$

El factor de seguridad para el motor será:

$$F_s = \frac{T_a}{T_{motor}} = \frac{0,45}{0,203} \quad (5.41)$$

$$F_s = 2,21$$

Utilizando los cálculos anteriores el pivote más adecuado es el

Lucas Varity #4024-600 para montaje en cantiliver

Par 0.0449 Nm por grado de giro

$$\varnothing_{\text{ext.}} = 19,5 \text{ mm}$$

**Verificación:** los cálculos anteriores verifican el cumplimiento de las especificaciones 2.1.4.1.1, 2.1.4.1.2, 2.1.4.1.3, 2.1.4.1.4, 2.1.4.1.6, 2.1.4.1.8, 2.1.4.1.9, 2.1.4.1.10, 2.1.4.2.7, 2.1.4.2.8, 2.1.4.3.3, y 2.1.4.3.4.

#### 5.6.4 Platina del detector

En el caso de la platina del detector, no es requerido ningún cálculo, ya que la platina Newport UTM 150, es un componente integral que cumple especificaciones (Figura 5.32).

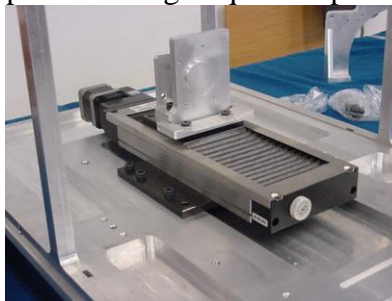
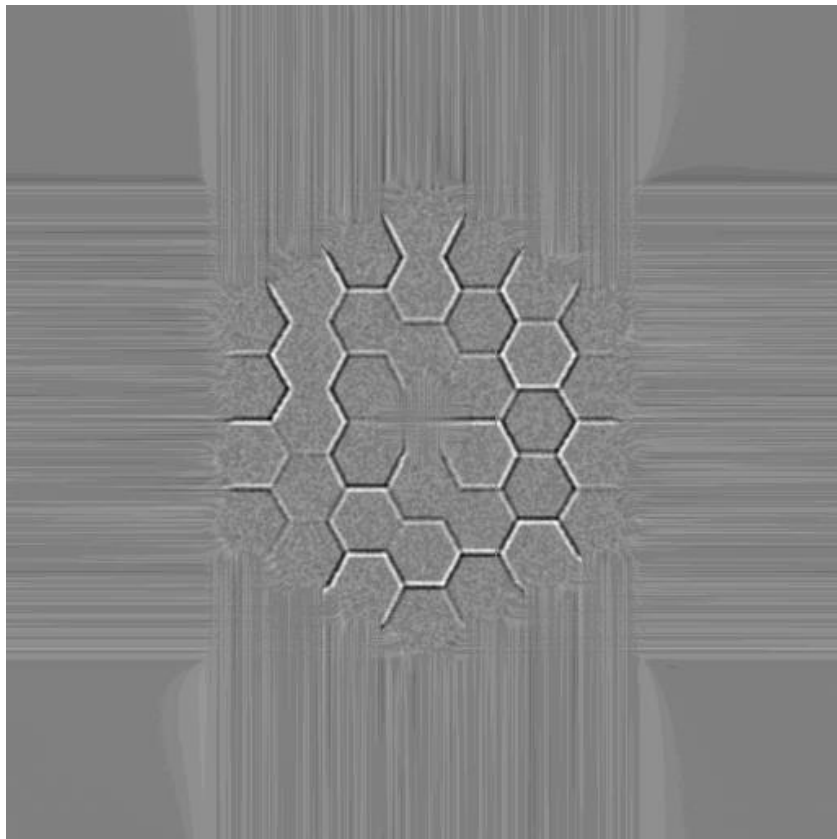


Figura 5.32: Platina del detector UTM 150

## *CAPÍTULO 6: ÓPTICA ASTRONÓMICA*



## CAPITULO 6: ÓPTICA ASTRONÓMICA.

Este capítulo, describirá la Óptica Astronómica aplicable al Instrumento de Verificación. Dichas consideraciones darán una mejor comprensión del Instrumento así como la teoría aplicable al mismo.

### 6.1 Óptica adaptativa (Adaptive Optics)<sup>1</sup>.

#### 6.1.1 Efectos de la atmósfera en las imágenes de los telescopios.

Desde su invención hace 400 años, los telescopios astronómicos han evolucionado de ser unos dispositivos manuales para observación visual, hacia unos grandes y complejos instrumentos controlados por computadora con salida de imagen digital y datos.

A lo largo de esta evolución, dos parámetros son particularmente importantes: la capacidad de colección de luz del telescopio (permitiendo ver objetos más débiles y distantes) y la resolución angular (o agudeza de la imagen). Para un telescopio utilizado en el vacío, la resolución es directamente proporcional al inverso del diámetro del telescopio. Un frente de onda plano proveniente de una estrella distante (efectivamente al infinito) debe ser convertida por el telescopio, en un frente de onda perfectamente esférico, formando la imagen, con una resolución angular sólo limitada por la difracción de la luz, llamado límite de difracción.

En la práctica, sin embargo, la atmósfera y los errores propios del telescopio, distorsionan el frente de onda esférico, creando errores de fase en las trayectorias de los rayos de las imágenes formadas. Aún en los mejores sitios de observación, los telescopios terrestres, observando a longitudes de onda visibles (de 315 a 650 nm aprox), no pueden debido a las perturbaciones atmosféricas, alcanzar una resolución angular mejor que los telescopios de 10 a 20 cm de diámetro. Para un telescopio de 4m , la distorsión atmosférica degrada la resolución espacial por más de 20 comparado con el límite de difracción, y la intensidad al centro de la imagen de la estrella es decrementada por un factor de 100 ó más. La causa son las perturbaciones aleatorias en el frente de onda, tanto espaciales como temporales inducidas por la turbulencia en las estructura de capas de la atmósfera. Adicionalmente la calidad de la imagen es afectada por los errores de fabricación y las aberraciones en el frente de onda inducidas por los efectos térmicos, mecánicos y ópticos en el telescopio, como son el desenfoque, descentrado, y las deformaciones en los espejos, generadas por sus propios soportes.

A finales de los 80's, en búsqueda de esa mayor capacidad de colección de la luz, se inició la construcción de grandes telescopios por encima de los 4 m de diámetro, como los Keck, VLT, y el Gran Telescopio Canarias (GTC), quedando claro que los métodos convencionales limitaban la calidad de la imagen por el costo y las limitaciones de peso de la estructura. Como resultado se desarrolló la nueva técnica de *Óptica Activa* (Active Optics), para telescopios de rango medio a grande, en los cuales la calidad de la imagen es optimizada por medio de ajustes constantes, con elementos ópticos autocorrectivos operando en frecuencias muy bajas en el tiempo de 0.05 Hz o menos, como es el caso del GTC.

---

<sup>1</sup> Adaptive Optics Tutorial publicado por ESO, [www.eso.org](http://www.eso.org)

### 6.1.2 Aberraciones Ópticas<sup>2</sup>

Las aberraciones Ópticas (del latín aberrare, desviar) causan que la imagen se extienda, ocasionando pérdida de resolución y eficiencia del telescopio.

Las más comunes son la coma, el astigmatismo, y la aberración esférica, y pueden deberse a dos razones.

Aberraciones de campo que varían con el ángulo de campo.- Si un sistema óptico forma imágenes perfectas para objetos en el eje óptico puede no hacerlo para objetos fuera del eje, éstas son las llamadas aberraciones de campo y varían de acuerdo al ángulo de incidencia de los rayos con respecto al eje óptico. Para un sistema óptico particular su magnitud depende del diseño óptico.

Aberraciones cuya magnitud es constante sobre el campo.- Es de sorprender que las aberraciones puedan ocurrir en imágenes dentro en eje, éstas aberraciones tienen la misma forma que las aberraciones fuera de eje, excepto que éstas no dependen del ángulo de campo Figura 6.1.

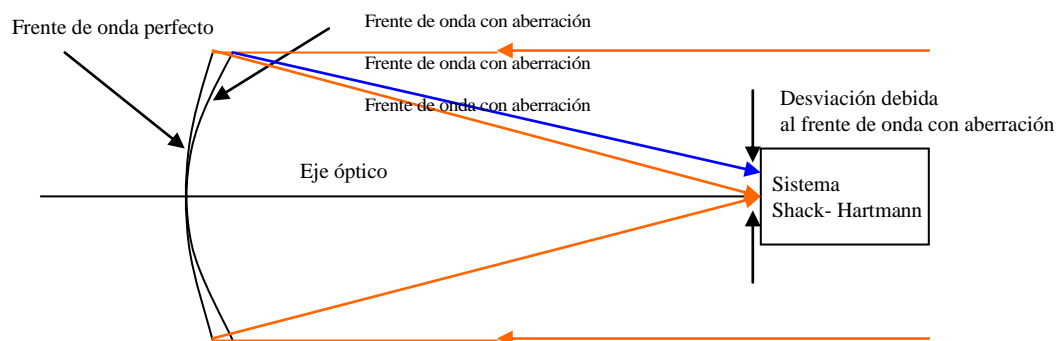


Figura 6.1: Frente de onda con aberración y el correspondiente desplazamiento en el plano focal

Las aberraciones son medidas poniendo un colimador detrás del foco para hacer los rayos paralelos, un arreglo de lentes (ver Capítulo 7), colocado en la posición de la pupila forma imágenes (manchas) para los puntos individuales (zonas) del frente de onda en un detector (CCD). Si el frente de onda no contiene aberraciones, se obtendrá una perfecta matriz de puntos. Con la presencia de aberraciones, las manchas individuales, se desvían, dichas desviaciones se miden, y se pueden ajustar a una función matemática de esas desviaciones. Esta función para la deformación en un disco son los polinomios de Zernike, entonces, los coeficientes de las aberraciones son obtenidos.

A continuación se describen algunas aberraciones ópticas:

*Coma como aberración de campo:* ésta es inherente al diseño óptico, por ejemplo en un telescopio Cassegrain clásico (como el GTC), en el cual el espejo primario es parabólico y el secundario es hiperbólico, se tiene un coma de campo (Figura 6.2) nótese en la figura que las imágenes apuntan al centro del campo.

<sup>2</sup> Spot- Optics, [www.Sopot-optics.com](http://www.Sopot-optics.com)

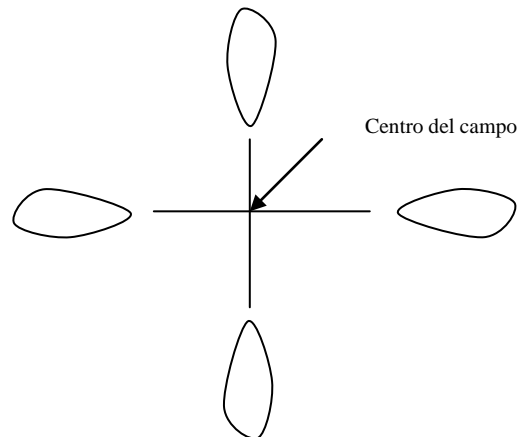


Figura 6.2: Coma como aberración de campo

*Coma debido a desalineamiento:* También llamado error de colimación, se origina en un sistema de dos espejos o lentes, cuando el espejo primario y el secundario no están alineados (uno está descentrado o inclinado con respecto al otro). En este caso, las imágenes cromáticas son del mismo tamaño, y apuntan a la misma dirección, y son formadas en todo el campo incluyendo el centro (ver Figuras 6.3 y 6.4). Aunque el coma de campo es inherente al diseño óptico, como ya se dijo en el caso del coma por desalineamiento puede ser medido y corregido con la óptica Activa.

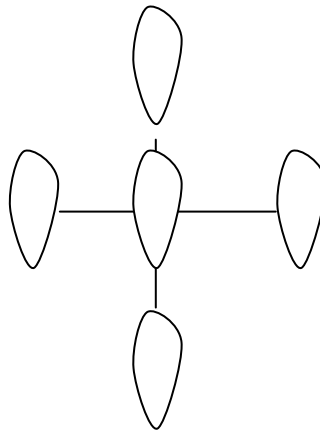


Figura 6.3: Coma debida al desalineamiento

*Aberración esférica:* La aberración esférica también es inherente al diseño óptico, (Figura 6.4), si el plano focal no está en la posición correcta. Además aunque dichas posiciones sean las correctas, debido a los cambios de temperatura la forma de los espejos primario y secundario cambian a diferentes razones, conduciendo a dichas aberraciones.



Figura 6.4: Imágenes tomadas con el Instrumento de verificación aberración esférica (izq) y coma (der)

### 6.1.3 Principio de la Óptica Adaptativa<sup>1</sup>

Por otra parte los diseñadores de sistemas de Óptica Adaptativa, deben tomar en cuenta que un frente de onda que viaja 20 Km a través de la turbulenta atmósfera, acumula, a lo largo de un gran telescopio, errores de fase de unos pocos micrómetros. Estas deben ser medidas y corregidas con un número de fotones mínimo, por cerca de 1/50 de micrómetro por cada milisegundo.

Debido al alto ancho de banda, y el pequeño campo de visión en el cual la correlación debe ser aplicada, la Óptica Adaptativa utiliza espejos deformables localizados detrás del foco del telescopio o cercanos a la imagen de la pupila.

En forma general en un sistema de Óptica Adaptativa (Figura 6.5) la turbulencia es corregida por un “espejo deformable”, localizado en un haz paralelo en la pupila de salida del telescopio. La señal que ordena al espejo deformable es obtenida de un medidor de frente de onda (Wave- Front- Sensor WFS) el cual mide en tiempo real, las aberraciones ópticas que permanecen después de las correcciones. Un servo sistema logra la aberración “cero” con el continuo ajuste de la forma del espejo deformable.

La luz utilizada para probar las aberraciones, proviene de una Estrella Guía (GS), la cual puede ser natural (por ejemplo un objeto observado), ó una artificial (un láser o fibra óptica). La luz proveniente del objeto es corregida por el espejo deformable y es dirigida al instrumento científico (por ejemplo una cámara), de la misma forma la luz es dividida por longitud de onda, la parte roja del espectro es dirigida al medidor de frente de onda (WFS) y la parte infrarroja es dirigida a un instrumento científico.

Los parámetros usuales en un sistema de Óptica Adaptativa son:

- Tiempo de respuesta: 1 milisegundo.
- Tamaño del elemento corregido: de 10 cm a 1 m
- Número de elementos corregidos: de 13 a 300, o más.
- Magnitud de la estrella guía (GS): 17



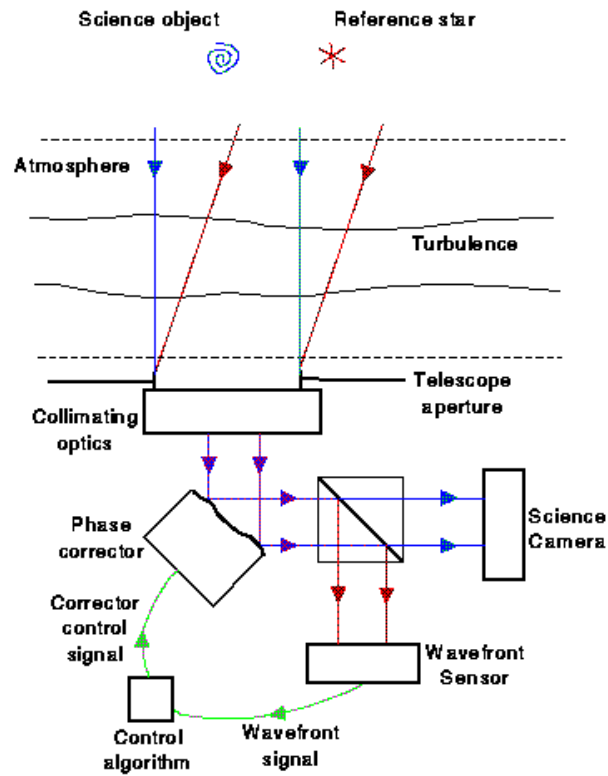


Figura 6.5: Sistema de Óptica Adaptativa.

La Figura 6.6, muestra dos imágenes estelares obtenidas del telescopio Keck con y sin corrección de la turbulencia atmosférica.

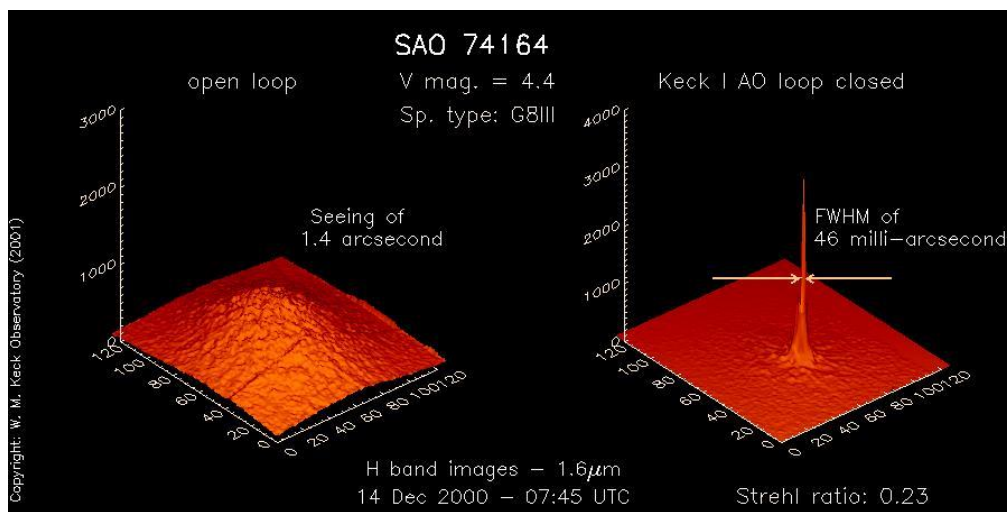


Figura 6.6: Imágenes del Keck con y sin corrección de turbulencia.

### 6.1.4 El telescopio ideal<sup>1</sup>

La imagen de una fuente puntual (estrella) ( ver Figura 6.5) en un telescopio ideal perfecto sin atmósfera (en el espacio) esta afectada únicamente por la difracción y se describe por la *función de Airy* (Respuesta a un impulso, respuesta impulsional):

$$P_0(\vec{\alpha}) = \frac{\pi D^2}{4\lambda^2} \left[ \frac{2J_1(\pi D |\vec{\alpha}| / \lambda)}{\pi D |\vec{\alpha}| / \lambda} \right]^2 \quad (6.1)$$

donde:

$P(\vec{\alpha})$  es la irradiancia de la luz en el plano focal, como función de la coordenada angular  $\vec{\alpha}$

$\lambda$  es la longitud de onda de la luz

$D$  es el diámetro de la apertura del telescopio

$J_1$  es llamada la función Bessel

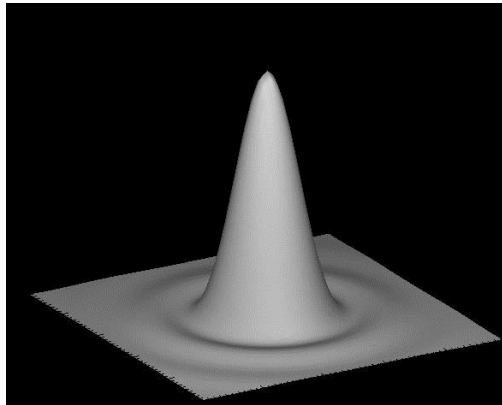


Figura 6.7: Respuesta impulsional de un sistema óptico (imagen de estrella).

En la Figura 6.7 el primer anillo oscuro está a una distancia angular de  $1.22\lambda / D$  desde el centro. Esta es a menudo tomada para medir la resolución de un telescopio ideal.

La imagen  $I(\vec{\alpha})$  de un objeto astronómico  $O(\vec{\alpha})$  puede ser considerada como una multitud de puntos, cada punto se desprende como una función de Airy, y puede ser descrita por una convolución:

$$I(\vec{\alpha}) = \int d\vec{\beta} O(\vec{\beta}) P_0(\vec{\alpha} - \vec{\beta}) = O \otimes P_0 \quad (6.2)$$

A ésta ecuación se le llama ecuación de la imagen. La imagen comparada con el objeto, es suavizada, pero su resolución degradada. Sin embargo para un telescopio de diámetro  $D$  ésta degradación es lo menor posible, y se llama a esta imagen *límite de difracción*. La Figura 6.8 muestra un ejemplo de una imagen astronómica (del centro de la Galaxia), con diferentes resoluciones. Hay que notar que las imágenes de las estrellas son muy aproximadas a un patrón de Airy.

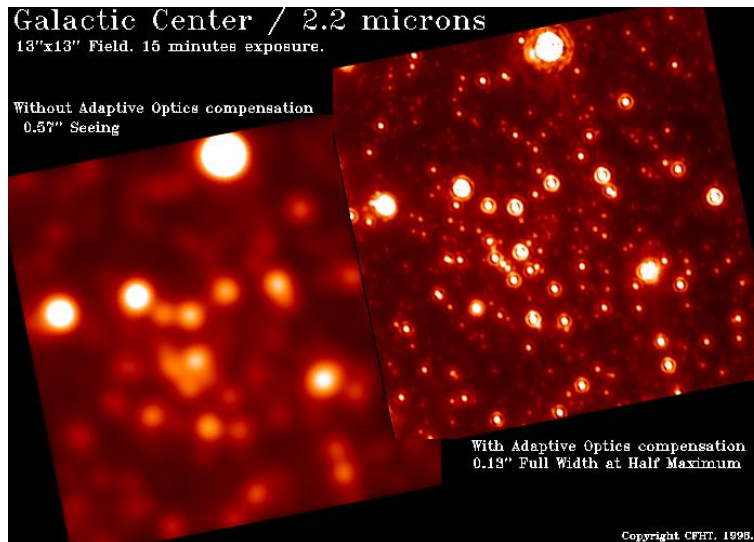


Figura 6.8: Imagen sin (izquierda) y con (derecha) compensación de Óptica Adaptativa.

### 6.1.5 Espejos segmentados deformables<sup>1</sup>

Los primeros espejos deformables consisten en segmentos discretos, cada uno controlado por 3 actuadores piezoeléctricos. En nuestros días gracias a la tecnología un espejo delgado es adherido a un arreglo de actuadores piezoeléctricos con carrera de pocos micrómetros y frecuencia de resonancia de pocos Hz (ver Figura 6.9).

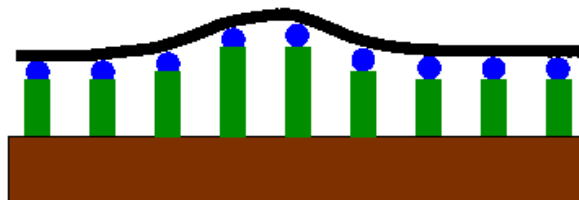


Figura 6.9: espejo deformable.

En el Caso del Gran Telescopio Canarias (GTC) el espejo segmentado de 36 piezas cuenta con actuadores en su parte inferior (Figura 6.10 inferior)<sup>3</sup>, para hacer el cofaseo de los segmentos, mediante las correcciones de pistón, tip and tilt del espejo primario, para una

<sup>3</sup> GTC PO. [www.iac.gtc.es](http://www.iac.gtc.es).

alta calidad de la imagen, el espejo secundario (Figura 6.9 superior) tiene varios grados de libertad para realizar las correcciones de los problemas provocados por el viento en el interior de la cúpula convirtiendo el sistema en un conjunto de Óptica Activa y Adaptativa. La función del Instrumento de Verificación es el de verificar la calidad de imagen de este sistema mediante la medición del frente de onda.

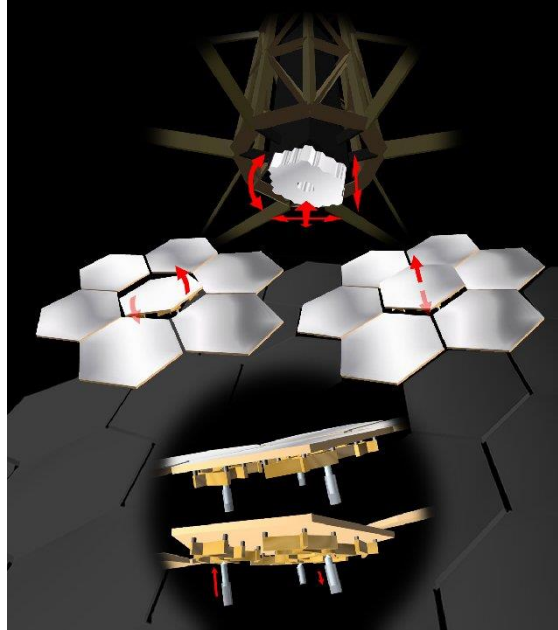


Figura 6.10: Espejos primario y secundario del GTC.

### 6.1.6 Medición del frente de onda por Shack-Hartmann<sup>1</sup>

El método de Shack- Hartmann es uno de los métodos de empleados en el Instrumento de Verificación para la medición del frente de onda. Una imagen de la pupila de salida es proyectada dentro de un arreglo de lentes (Ver Figura 6.10). Cada lente toma una pequeña parte de la apertura, llamada sub-pupila, y forma una imagen de la fuente. Todas las imágenes son formadas en el mismo detector, usualmente un CCD.

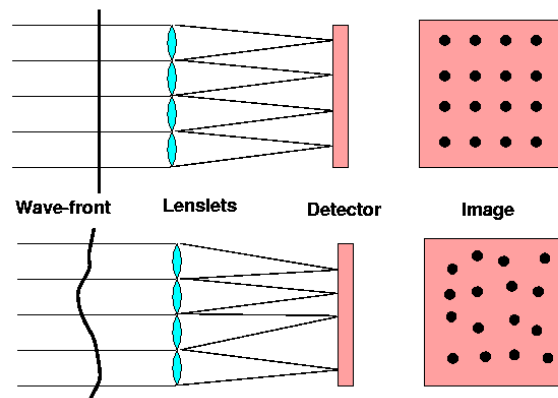


Figura 6.11.: Medición de frente de onda por Shack Hartman.

Cuando el frente de onda entrante es plano, todas las imágenes están localizadas en una rejilla regular definida por la geometría del arreglo de lentes. Tan pronto como el frente de onda se distorsiona, las imágenes se desplazan de sus posiciones nominales. Los desplazamientos en los centroides de las imágenes en dos direcciones ortogonales  $x$ ,  $y$  son proporcionales al promedio de las pendientes de frente de onda en  $x$ ,  $y$  sobre las aperturas. Por ello el Shack-Hartmann mide las pendientes del frente de onda (gradiente del frente de onda) (Figura 6.11). El frente de onda es reconstruido de los arreglos de las pendientes medidas. La resolución del método de Shack-Hartmann está determinada por el tamaño de la sub-apertura.

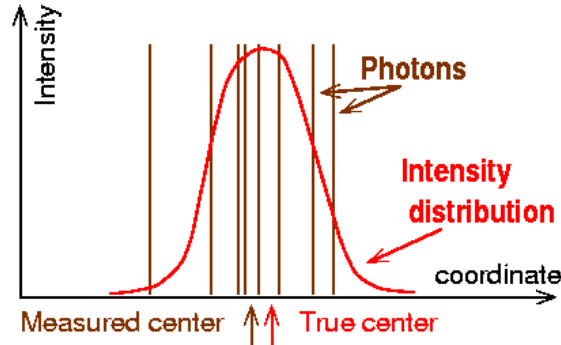


Figura 6.12: Medición de la imagen

Una buena característica del método de Shack-Hartmann es que es completamente acromático, las pendientes no dependen de la longitud de onda, Puede funcionar también en fuentes no puntuales (extendidas). Si  $\phi(\vec{r})$  es la fase del frente de onda, la pendiente en  $x$  medida por Shack-Hartmann, es calculada por:

$$x = \frac{\lambda}{2\pi S} \int_{\text{sub-apertura}} \frac{\partial \phi(\vec{r})}{\partial r_x} d\vec{r} \quad (6.3)$$

donde  $S$  es el área de la sub-apertura. Las pendientes  $x$ ,  $y$  son estimadas de los desplazamientos del centroide de la imagen (o centro de gravedad) por:

$$x = \frac{\sum_{ij} x_{ij} I_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}}, \quad y = \frac{\sum_{ij} y_{ij} I_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}} \quad (6.4)$$

donde  $I_{ij}$  son las intensidades de la luz en los pixeles del detector. Se asume que las coordenadas  $x$ ,  $y$  son expresadas en radianes (esto se conoce de la escala del detector).

### 6.1.7 Medición de frente de onda por el método de curvatura<sup>4</sup>.

La medición del frente de onda por el método de curvatura toma una aproximación diferente al método Shack- Hartmann. En el sistema de curvatura para la medición de frente de onda (WFS), se mide una imagen en la localización entre el plano de pupila y el plano de imagen. También se pueden utilizar las pupilas desenfocadas, a la imagen en el foco anterior se le llama imagen intrafocal o intrapupilar, y a la imagen en el foco posterior se le llama imagen extrafocal o extrapupilar, como se muestra en la Figura 6.12.

La imagen intrafocal será más brillante en regiones las cuales tienen una curvatura positiva, y la imagen será más oscura en las regiones con curvatura negativa. La intensidad de la imagen en el plano extrafocal será inversa en relación a la medida en el plano intrafocal. En resumen sólo una de las imágenes enfocadas es necesaria para medir la curvatura del frente de onda. Sin embargo, usando ambas hace que un sistema de curvatura funcione mejor por varias razones:

- Hay una compensación automática de los errores sistemáticos (eficiencia, ganancia electrónica, etc.)
- Hay una compensación de la titilación atmosférica.
- El algoritmo de control es simple (mover el espejo deformable hasta que la diferencia de intensidades es cero, en sistemas de óptica adaptativa, la meta es lograr que las intensidades en ambos lados del foco sean iguales, esto ocurre cuando el frente de onda es plano)

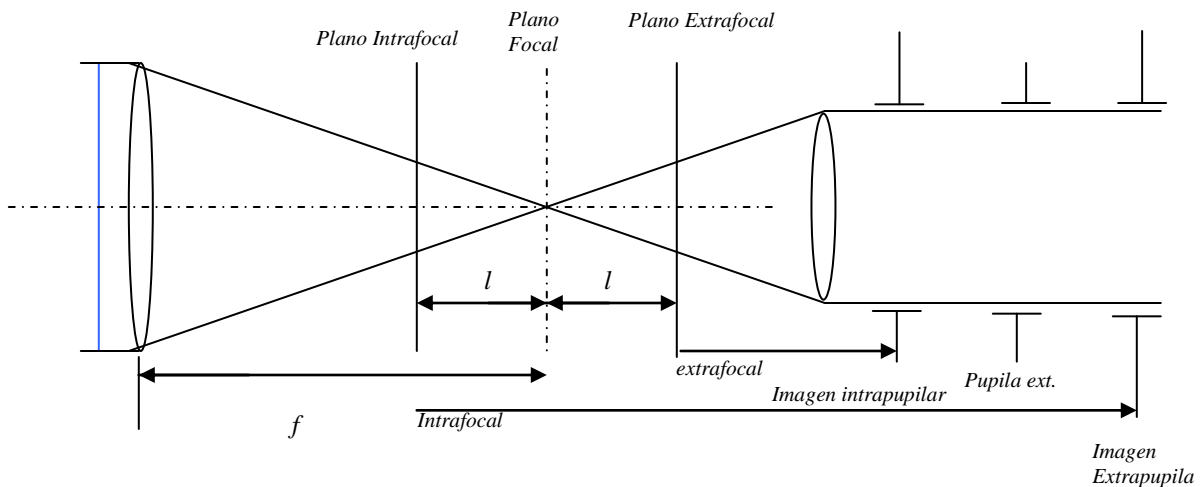


Figura 6.13: Frente de onda plano enfocado por una lente, el plano intrafocal y el extrafocal están muy cercanos al plano de imagen cerca de un 0.1 % de la distancia del plano de imagen al plano de pupila.

Con el fin de derivar la señal medida por las imágenes extrafocal e intrafocal, se debe ver la propagación del campo eléctrico en el frente de onda. Definiendo la dirección de propagación desde el plano de pupila al plano de imagen como la dirección  $z$  y a las dos

<sup>4</sup> A new CCD designed for curvature wavefront sensing. J. W. Beletic, Reinhold J. Dorn, Thomas Craven- Bartle and Barry Burke European Southern Observatory, MIT Lincoln Observatory.

direcciones ortogonales como  $x$ ,  $y$ . El complejo de amplitud  $U(x, y, z)$  en el campo en un plano  $z$  es la raíz cuadrada de la intensidad  $I(x, y, z)$  multiplicada por el complejo del fasor del frente de onda  $\phi(x, y, z)$ :

$$U(x, y, z) = \sqrt{I(x, y, z)} e^{ik\phi(x, y, z)} \quad (6.5)$$

donde  $k$  es el número de onda ( $2\pi/\lambda$ ) y  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz.

La propagación de este campo en distancias cortas, está definida por la *ecuación de transporte de irradiancia*:

$$\nabla I \cdot \nabla \phi + I \nabla^2 \phi + \frac{\partial I}{\partial z} = 0 \quad (6.6)$$

donde el gradiente  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$

y el Laplaciano  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$

El último término de la ecuación  $\frac{\partial I}{\partial z}$ , es el cambio de intensidad como una función de propagación en la dirección  $z$ .

$\nabla^2 \phi$  es la segunda derivada del frente de onda, interpretada como la curvatura local del frente de onda.

$\nabla I \cdot \nabla \phi$  es la inclinación del frente de onda, este término es solamente significativo cuando la intensidad varía rápidamente, lo cual es en el borde de la pupila.

El cambio de intensidad de los planos intrafocal y extrafocal es debido a la curvatura del frente de onda sobre la pupila y la inclinación del frente de onda en el borde de la pupila. La utilidad de esta señal, fue reconocida por Francois Roddier y presentada por el mismo como concepto de la medición del frente de onda. Usando el vector  $\vec{r}$  para la localización  $x, y$ , en un plano  $z$ ,  $I_1, I_2$  para las imágenes intrafocal y extrafocal,  $l$ , para las distancias intra y extra focales. Roddier usando una aproximación óptica geométrica derivó la señal de curvatura, para utilizarla como prueba de calidad de telescopios y para sistemas de óptica adaptativa de la forma:

$$S(\vec{r}) = \frac{I_2(\vec{r}) - I_1(\vec{r})}{I_2(\vec{r}) + I_1(\vec{r})} = \frac{\lambda f (f-1)}{2\pi d} \left[ \nabla^2 \phi \left( \frac{f(\vec{r})}{l} \right) - \frac{\partial \phi}{\partial n} \left( \frac{f(\vec{r})}{l} \right) \delta_c \right] \quad (6.7)$$

donde  $f$  es la longitud focal del telescopio

$\frac{\partial}{\partial n}$  es la derivada en la dirección radial apuntando hacia el frente

$\delta_c$  es la función de impulso lineal en el borde de la pupila ( ambas en el borde exterior del primario y en el borde exterior debido a la obscuración secundaria)

La inclinación (tilt) es solamente medida en el borde de la pupila y la señal de curvatura es medida sobre toda la pupila, esta aproximación de la medición de las distorsiones del frente de onda es llamada *medición por el método de curvatura* (Curvature Wavefront Sensing).

Una de las principales innovaciones del Instrumento de Verificación para el GTC es el uso del método de curvatura para telescopios segmentados, que se usará por primera vez para verificar la calidad de imagen del mismo, y como campo de pruebas para los ELT, (Extremely Large Telescopes).

Dicha teoría fue propuesta por S. Cuevas <sup>5</sup> proponiendo que la ecuación de Roddier para prueba óptica de telescopios con espejo monolítico, antes descrita, podría ser adaptada para telescopios segmentados equipados de óptica adaptativa. Esto permitiría a los ingenieros, tener un sistema óptico que combinase la medición del frente de onda para la corrección por aberración atmosférica, y el “cofaseo” de los segmentos del primario del telescopio (óptica activa).

La ecuación modificada para los 36 segmentos del espejo primario del GTC está dada por:

$$S(\vec{r}) = \frac{f(f-e)}{e} \left[ - \sum_{j=1}^{36} \left\{ \nabla^2 W_j(\vec{r}) \right\} - \sum_{m=1}^N \sigma'_m \delta(\vec{r} - \vec{r}_m) - \sum_{m=1}^N \sigma_m \delta'(\vec{r} - \vec{r}_m) + \frac{\partial W(\vec{r})}{\partial n_1} \delta_{gte1} + \frac{\partial W(\vec{r})}{\partial n_2} \delta_{gte2} \right] \quad (6.8)$$

Donde:

$\nabla^2 W_j(\vec{r})$  representa el Laplaciano del frente de onda dentro de cada segmento

$N$  es para el número de interfases entre segmentos,  $N=136$

$\sigma'_m$  es la gradiente del borde “salto” entre cada interfase de segmentos

$\delta(\vec{r} - \vec{r}_m)$  es la Delta de Dirac de la distribución del impulso en cada interfase de segmento

$\sigma_m$  es el “salto” del frente de onda en las interfases del segmento

$\vec{n}_1$  es el vector unitario apuntando perpendicularmente hacia fuera del borde de la pupila del telescopio

$\vec{n}_2$  representa el vector unitario apuntando al centro de la pupila y es perpendicular al obscurecimiento central de la pupila

$\delta_{gte1}, \delta_{gte2}$  son las Delta de Dirac de las distribuciones de los impulsos definidas en la pupila del telescopio y el borde central de obscurecimiento.

La Figura 6.13 ilustra en forma gráfica el significado de los términos anteriores.

Por otra parte en otras palabras, el primer término de la ecuación describe las aberraciones de cada segmento, el segundo término la información de inclinación (tip-tilt), y el tercer término representa la información de pistón.

<sup>5</sup> AO Curvature Systems for Segmented Primary Telescopes, Cuevas S. Orlov, V:G, Garfias, F, Voitsekovich, V.V, Sánchez, L. J 2000 Proc SPIE 4003, 291.



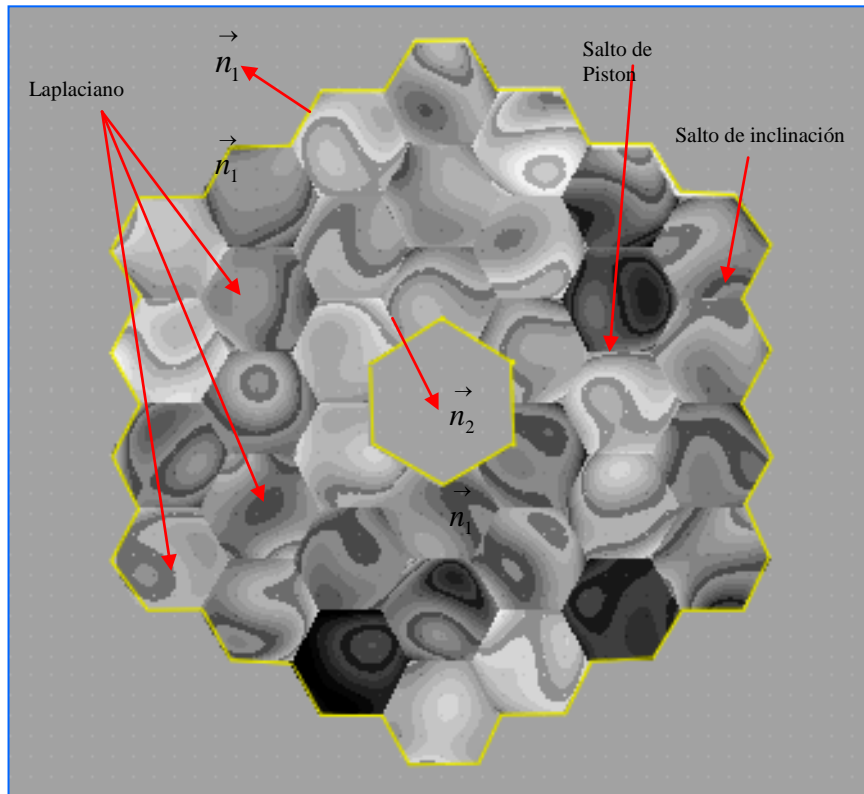
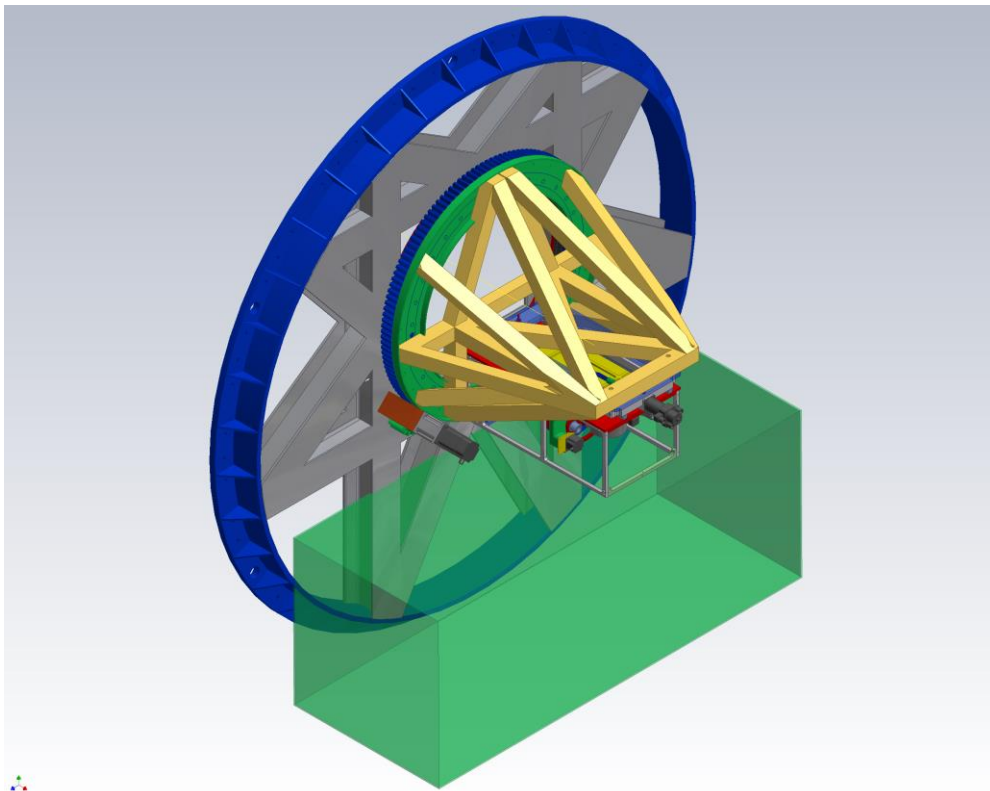


Figura 6.14: Espejo segmentado

## ***CAPÍTULO 7: ÓPTICA DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN***



## CAPÍTULO 7: ÓPTICA DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN

Este capítulo, describirá el diseño óptico del Instrumento de Verificación. La parte del diseño óptico, y la fabricación de las lentes fué realizado por el equipo de trabajo del IAUNAM. El trabajo de tesis corresponde a la colaboración en el diseño y fabricación de los barriles de la cámara y el colimador.

### 7.1 Descripción de la óptica del Instrumento de Verificación

La óptica del Instrumento de Verificación puede ser dividida en 4 unidades:

- **Unidad del colimador:** que comprende las lentes del colimador, la ventana de entrada, el posicionador de pupila, y los filtros neutros y de colores. ésta unidad, provee una imagen de pupila de alta calidad limitada de difracción.
- **La unidad de la cámara:** ésta toma el haz colimado de l a pupila de imagen y forma una imagen en el detector de CCD.
- **El arreglo de lentes (lentes):** que es usado en la medición de frente de onda Shack Hartmann.
- **El detector de CCD:** que es usado en todos los modos de observación del Instrumento de Verificación. Este es un arreglo Marconi de 1k x 1k con píxel de 13 micrones.

#### 7.1.1 Unidad del colimador

##### 7.1.1.1 Ventana de entrada

Una ventana de entrada protege al instrumento del polvo (especialmente cuando el polvo sopla desde el Sahara a las Islas Canarias). Las aberraciones de la ventana deben ser tomadas en cuenta cuando el instrumento es calibrado en el modo Shack- Hartmann. La ventana va montada detrás de la rueda de calibración y consiste en un vidrio BK7 de 3 mm de espesor con recubrimiento multicapas antirreflejante (Figura 7.1) *Verificación:* se cumple especificación 2.1.4.3.2.

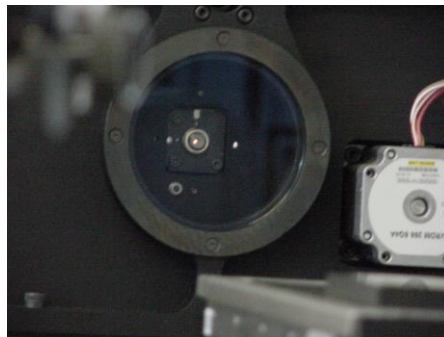


Figura 7.1: Alojamiento de la ventana de entrada

### 7.1.1.2 Colimador

El colimador (ver Figura 7.2), es la parte óptica principal del instrumento: Consiste en un barril de tres lentes (FK51, CaF2, LLF1) de 96 mm de diámetro con EFL= 185 mm, es completamente acromático y limitado en difracción para un campo de pupila de 6" y 12 mm. Los vidrios son de el fabricante Shott con calidad H3/NVS. Los lentes también están recubiertos con MgF2. El colimador toma las imágenes de la pupila de salida del telescopio y las escala 947.3 veces. Este escalamiento se lleva a cabo con una distorsión menor al 0.5% para todas las longitudes de onda dentro de los rangos de temperatura de operación del instrumento. El diseño del colimador compensa cualquier aberración de la ventana de entrada. Las lentes FK51 y CaF2, fueron pulidas en el IAUNAM (Instituto de Astronomía de UNAM): La lente de LLF1 fue pulida en el CIO (Centro de Investigación en Óptica) (ver Figura 7.3). El barril del colimador y los separadores fueron fabricados en CIDESI (Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial). **Verificación:** cumple requerimientos 2.1.4.2 y 2.1.4.3.



Figura 7.2: Colimador, soporte y separadores

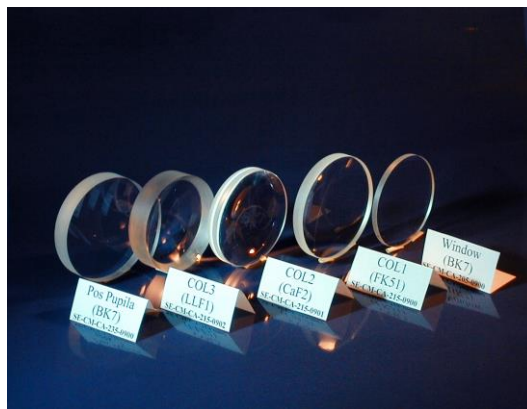


Figura 7.3: Lentes del colimador

### 7.1.1.3 Posicionador de pupila

El posicionador de pupila es un vidrio BK7 de 19 mm de espesor recubierto con MLAR, montado en una montura cinemática Newport CMA-12PP con micrómetros motorizados de inclinación en dos ejes. La inclinación causa ligeros desplazamientos de la pupila del telescopio en el arreglo de lentes ( $\pm 200 \mu\text{m}$ ). La lente es colocada en el haz colimado de luz sin ninguna aberración. Va montado en el mismo conjunto del colimador (ver Figura 7.4). **Verificación:** se cumple especificación 2.1.4.1.11.



Figura 7.4: Conjunto de colimador y posicionador de pupila ensamblados

### 7.1.1.4 Filtros

Los filtros neutros y de colores están inclinados  $5^\circ$  con respecto al haz óptico para reducir las imágenes y la luz dispersa. Los filtros están colocados en dos ruedas (ver Figura 7.5) en 7 posiciones de color y 7 posiciones neutras. Cuatro son filtros Johnson BVRI y dos son de ancho de banda de 100nm centrados en 700 y 800 nm. No introducen ninguna aberración en el plano de imagen y la pupila, ya que el haz que pasa entre ellos es un haz colimado. **Verificación:** se cumple especificación 2.1.4.1.6.



Figura 7.5: Conjunto de ruedas de filtros

### 7.1.2 Unidad de la cámara

La unidad de la cámara es un objetivo de cuatro lentes (CaF2, F2, BaK5, LLF1) de 32 mm de diámetro con  $f/4.04$ . Este objetivo es casi acromático y casi telecéntrico para longitud de onda de  $370 < \lambda < 1060$  nm. Los lentes de CaF2 fueron pulidos en el IAUNAM. El resto fueron pulidos en el CIO. La fabricación del barril y ruedas al igual que los demás componentes del instrumento fueron fabricados en CIDESI.

En combinación ambos colimador y cámara trabajan como un reductor focal de aproximadamente  $\frac{1}{4}$ . La calidad de la óptica es  $d_{80}$ , mejor que  $0.2''$  dentro de un campo de  $1' \times 1'$ . La cámara está montada en una rueda motorizada (figura 3.2.2). **Verificación:** se cumple especificación 1.5.3.2 y 1.5.3.3.



Figura 7.6: Rueda de cámara

### 7.1.3 Unidad del CCD

El CCD es un arreglo Marconi de  $1k \times 1k$  con píxel de 13 micrones adelgazado e iluminado en negro. Tanto el CCD como su controlador son proporcionados por GRANTECAN, y es similar al utilizado en el sistema de Adquisición y Guiado del telescopio. La cabeza del CCD está montada sobre una platina motorizada Newport UTM 150 para permitir el desplazamiento del CCD a lo largo del eje óptico para los diferentes modos de operación (ver Figura 7.7). **Verificación:** cumple especificaciones 2.1.4.2.

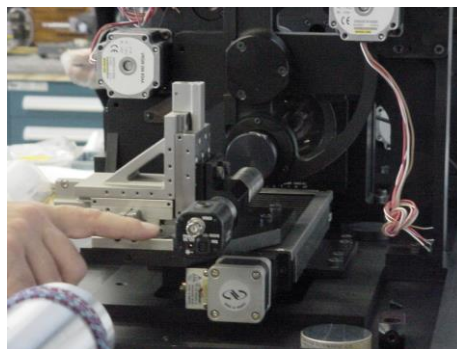


Figura 7.7: Platina de traslación del CCD con el VCCD montado

### 7.1.4 Arreglo de lentes

Un arreglo de lentes debe poder entrar y salir del haz de luz para el modo de Sensado de Frente de Onda Shack – Hartmann. Este arreglo va montado en una rueda motorizada que incluye dos aperturas de pupila (ver Figura 7.8). El arreglo de lentes tiene 9 mm EFL, y de la misma forma que el CCD éste es proporcionado por GRANTECAN, las aperturas fueron fabricadas en CIDESI. **Verificación:** cumple especificaciones 2.1.4.3.

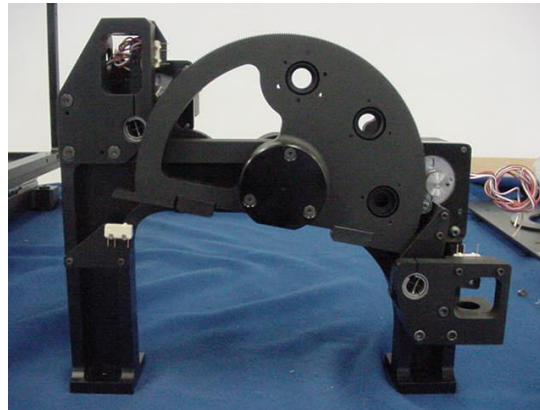


Figura 7.8: Rueda de lentes y aperturas

## 7.2 Modos de operación

### 7.2.1 Modo de imagen

EL Instrumento de Verificación funciona como un reductor focal clásico. La reducción focal es de  $\frac{1}{4}$ . El posicionador de pupila es inclinado para reducir fantasmas. El detector de CCD es posicionado en el plano focal de la cámara, el muestreo es de 0.06 segundos de arco por píxel. La Figura 7.9 muestra la configuración óptica. **Verificación:** se cumple especificación 2.1.4.1.1.

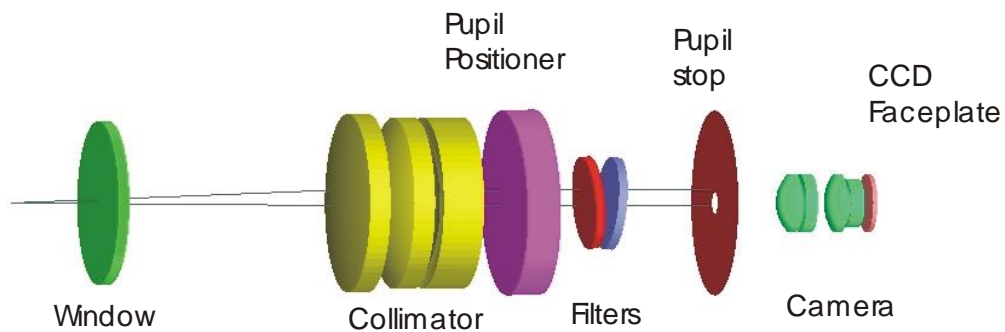


Figura 7.9: Modo de imagen con la cámara colocada ante el detector.

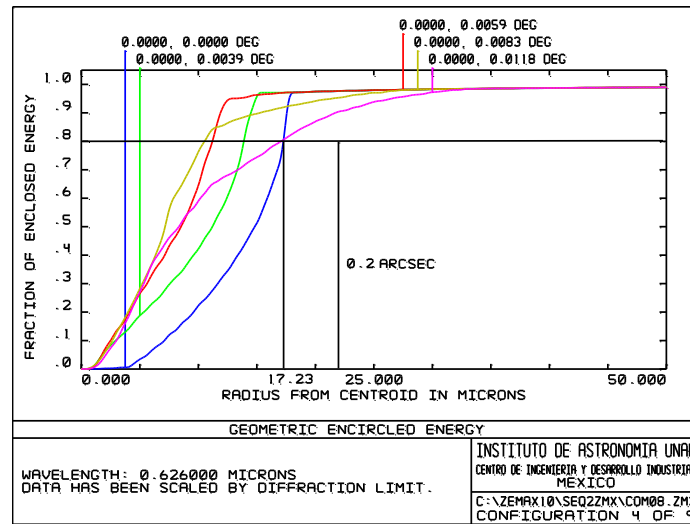


Figura 7.10: Concentración de energía en el modo imagen para una longitud de onda de 626 nm

### 7.2.2 Modos de Medición del Frente de Onda con el método de curvatura y medición de la intensidad de pupila

El modo de pupila coloca la pupila de salida del telescopio (espejo secundario M2) directamente sobre el detector de CCD. En esta posición el detector puede ser colocado en posiciones tanto intra-pupilar, como extra-pupilar. La señal de curvatura es obtenida calculando la diferencia entre las intensidades de imagen. Para el método de curvatura deben cumplirse las condiciones de aproximación geométrica<sup>1</sup>. Para una resolución de 20 cm en el espejo primario M1 del telescopio, las distancias de las imágenes desenfocadas desde la posición de la pupila deben ser menores a 48 mm. Esto corresponde a >719 mm de desenfoco en la imagen del telescopio. La Figura 7.11 muestra la configuración óptica.

**Verificación:** se cumplen especificaciones 2.1.4.1.2 y 2.1.4.1.3.

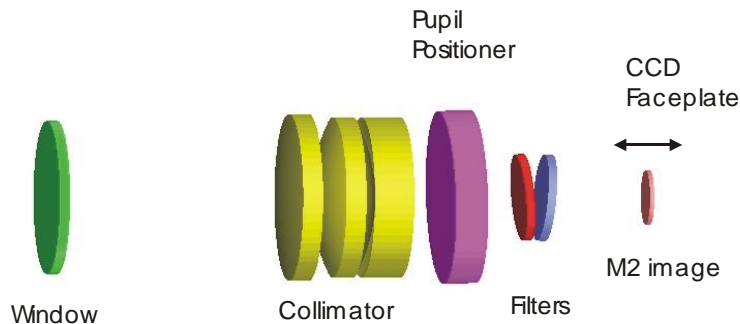


Figura 7.11: Modos de medición de Frente de Onda en pupila y curvatura. El detector puede colocarse intra-pupilar y extrapupilarmente.

<sup>1</sup>“Curvature equation for segmented telescope” : Cuevas,S., Orlov,V., Garfias,F., Voisekhovich,V.V.,Sánchez,L.JProc.SPIE Vol.4003, Astronomical Telescopes:Optical Design, Materials, Fabrication, and Maintenance,Philippe Dierickx;Ed (Bellingham, WA:Spie Press, pp 291-302, (2000)



### 7.2.3 Medición del Frente de Onda con el método Shack- Hartmann de alta resolución

Este modo consiste en insertar un arreglo de lentes en la imagen del haz colimado del espejo secundario M2 del telescopio. El detector es colocado en el plano focal de las lentes. Este modo permite una alta resolución espacial y medición de la figura de los segmentos del espejo primario M1 (ver Figura 7.12). **Verificación:** se cumple especificación 2.1.4.1.4.

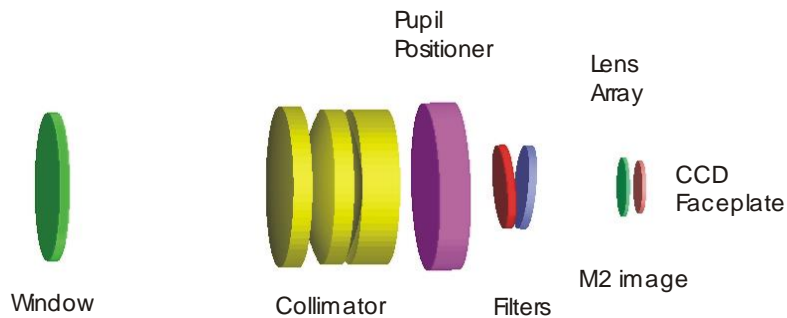
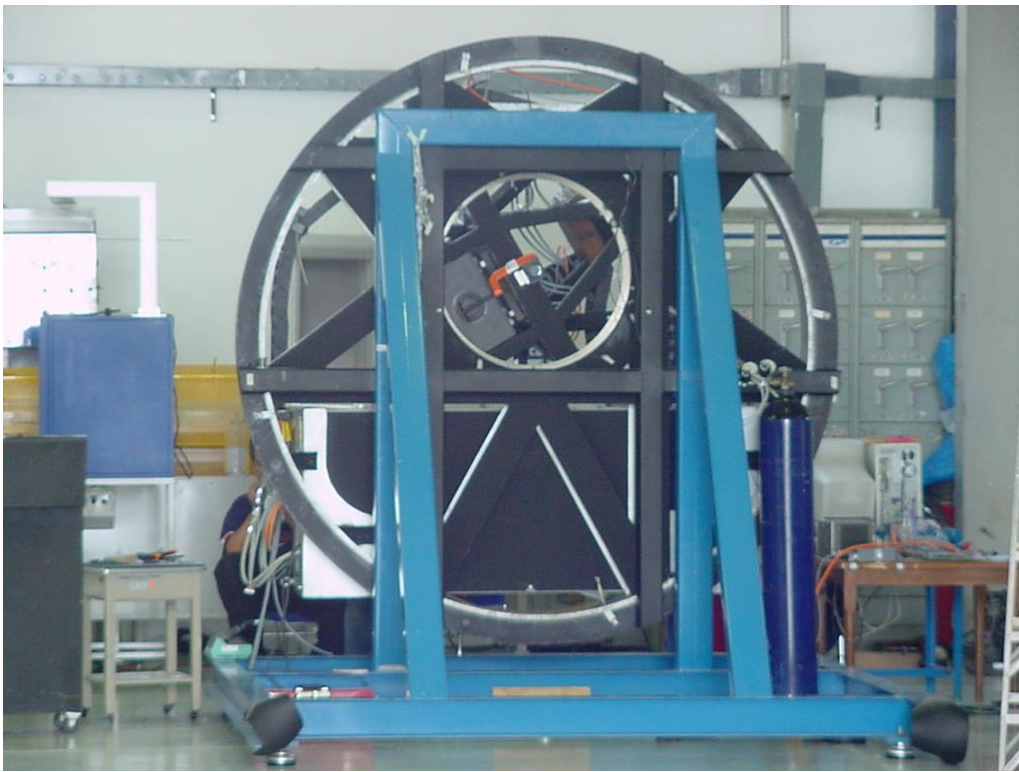


Figura 7.12: Modo Shack- Hartmann. El arreglo de lentes es colocado en el plano de la pupila y el CCD es desplazado al plano focal de los lentes.

### 7.2.4 Medición de la intensidad de la pupila

Este método sirve para analizar la luz parásita del telescopio, y se realiza colocando el detector de CCD en la imagen de la pupila.

## ***CAPÍTULO 8: DISEÑO DE LOS BARRILES DEL COLIMADOR Y LA CÁMARA***



## CAPÍTULO 8: DISEÑO DE LOS BARRILES DEL COLIMADOR Y LA CÁMARA

Este capítulo describe una de las partes más importantes del trabajo de tesis el del diseño y construcción de los barriles de la cámara y el colimador realizado por un servidor con el experto en óptica del IAUNAM. La aportación consiste en utilizar los datos, resultado del diseño óptico y con ellos diseñar la mecánica de los barriles para que se adecuen a las especificaciones y a los cambios de temperatura.

### 8.1 Diseño de los barriles

#### 8.1.1 Configuración final de la óptica

Con el fin de diseñar los barriles y determinar la posición final de los componentes, las opciones fueron evaluadas en sus diferentes configuraciones en el software ZEMAX. Obteniendo el diseño final de la óptica como muestra la Figura 8.1.

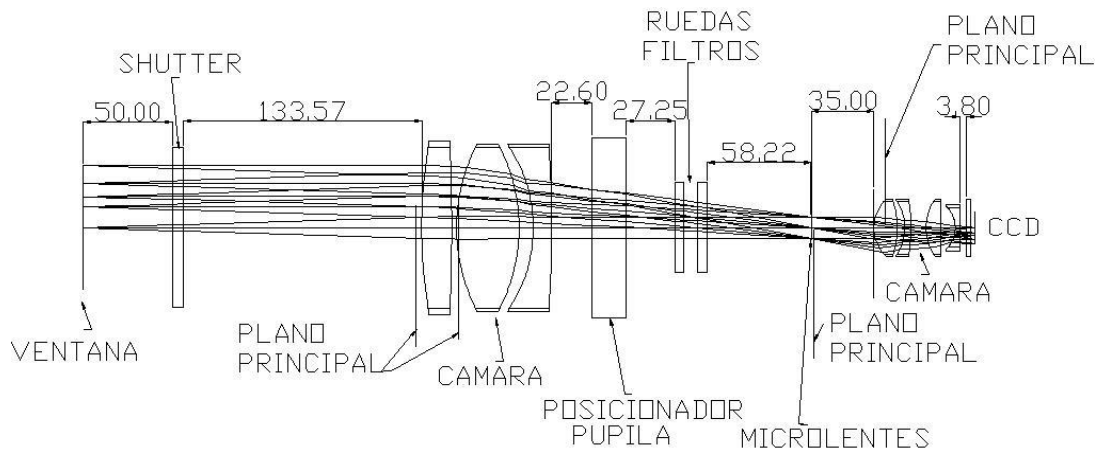


Figura 8.1: Configuración final de la óptica del instrumento

#### 8.1.2 Montaje de las lentes

El diseño del colimador y de la cámara es del tipo sujeción axial por medio de las líneas de apoyo de las lentes (ver Figuras 8.2 y 8.3). Las lentes son sujetas en estos puntos y apretadas firmemente por separadores. Ningún contacto existe entre el barril y la periferia de la lente. Aplicando una fuerza de sujeción adecuada, las lentes se autocentran. Las tolerancias de autocentrado son adecuadas para los requerimientos del diseño óptico.

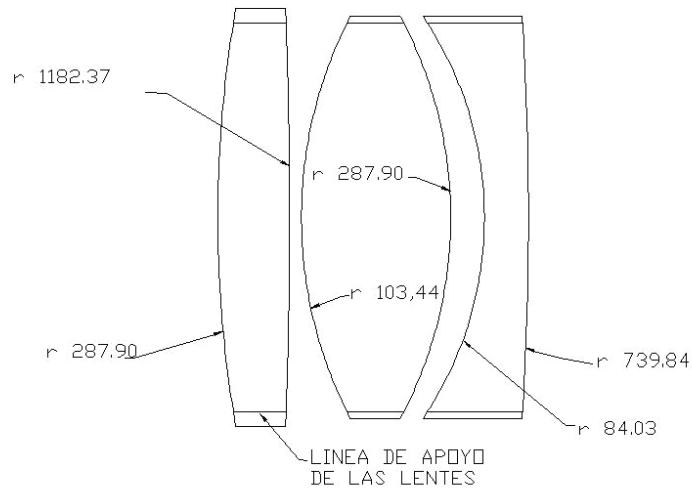


Figura 8.2: Lentes del colimador con sus líneas de apoyo de montaje

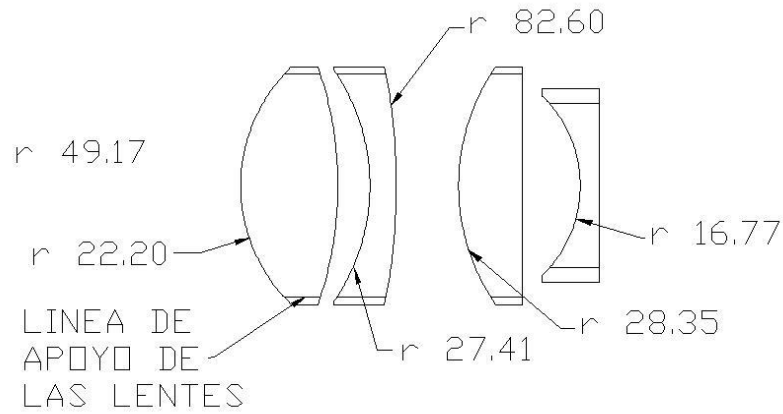


Figura 8.3: Lentes de la cámara con sus líneas de apoyo de montaje

Las tolerancias de posición axial de las lentes del colimador es de  $\pm 200 \mu\text{m}$ . Las tolerancias de centrado lateral son de  $\pm 100 \mu\text{m}$  y de  $\pm 3'$  para inclinación (ver Figura 8.4).

CAPITULO 8: DISEÑO DE LOS BARRILES DEL COLIMADOR Y LA CÁMARA

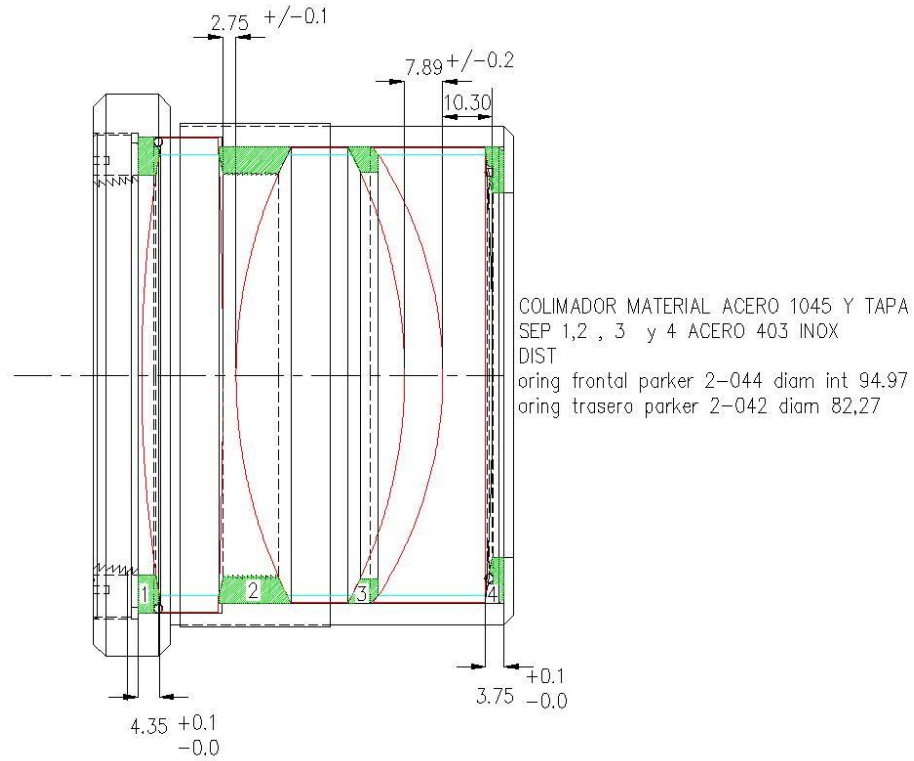


Figura 8.4 : Barril del colimador ensamblado con sus tolerancias de posición

Las tolerancias de la cámara son más cerradas:  $\pm 50 \mu\text{m}$  para la posición axial, y  $\pm 20 \mu\text{m}$  para la lateral y una inclinación de  $\pm 3'$  (ver Figura 8.5).

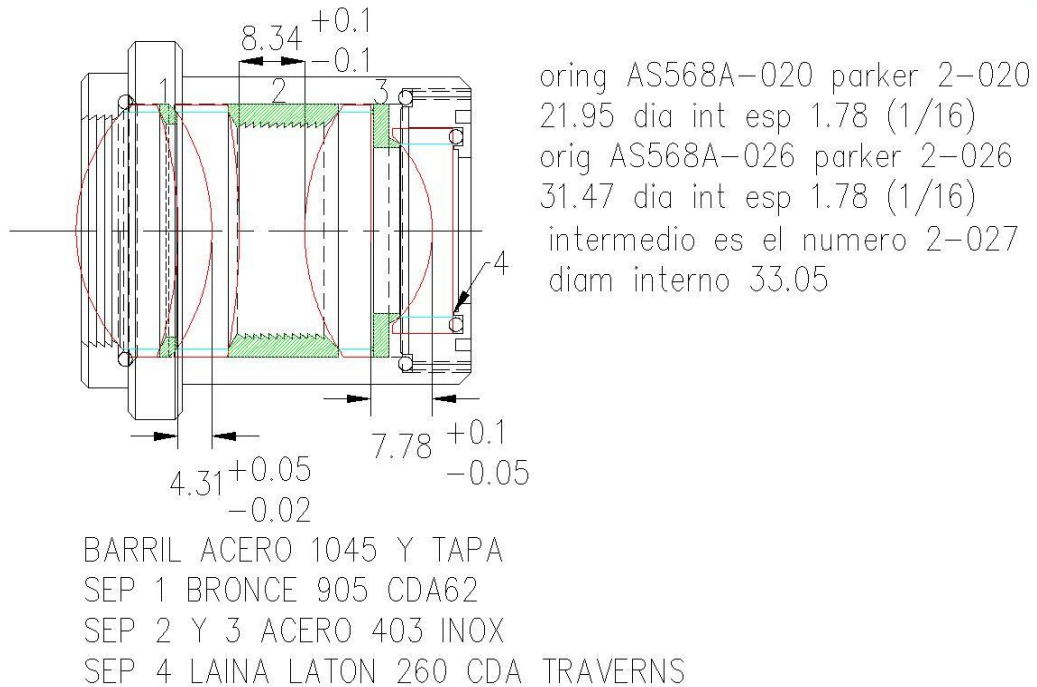


Figura 8.5: Barril de la cámara ensamblado con sus tolerancias de posición

Las tolerancias en el espesor central de las lentes son de +/- 200  $\mu\text{m}$  para el colimador y de +/- 100  $\mu\text{m}$  para la cámara. Este último valor es más grande que la tolerancia axial. Una optimización final del diseño de la cámara y el colimador fue requerida usando el espesor final de los lentes después de su fabricación, ya que ésta es más difícil de controlar que el maquinado de los barriles y los separadores las figuras anteriores muestran el diseño final. El centro de los separadores con respecto al barril fue realizado utilizando el método de doble sujeción propuesto por Yoder<sup>1</sup> y Zschommler<sup>2</sup>. Las tolerancias de los montajes dentro del barril son de H8h y de H6h5 para la cámara, para permitir a las lentes lograr las tolerancias ante mencionadas. Las tolerancias de ensamble para el colimador y la cámara son de +/- 100  $\mu\text{m}$  para la posición lateral y de 5' de inclinación tanto para el colimador como para la cámara.

### Compensación térmica de las lentes

Para compensar las diferencias de expansión y contracción térmica de las lentes de vidrio, separadores y barriles, éstos últimos fueron construidos de diferentes metales. Los barriles del colimado y de la cámara fueron construidos de acero 1045 (ver Figuras 8.4 y 8.5). Los cambios térmicos entre los vidrios y los separadores son compensados por el barril. Esto significa + 0.13nm/°K para el colimador y 0.8 nm/°K para la cámara. Se verificaron varios cambios dimensionales entre lentes y separadores a varias temperaturas dentro del rango de supervivencia del instrumento de acuerdo a la especificación 2.1.2.10 de -15°C a 35°C. También el índice de refracción cambia con la temperatura, pero ninguno de esos cambios afecta el rendimiento del instrumento. La concentración de la imagen cambia solo el 5% mientras que la imagen de la pupila de salida del espejo secundario M2 cambia sólo un 2% en diámetro.

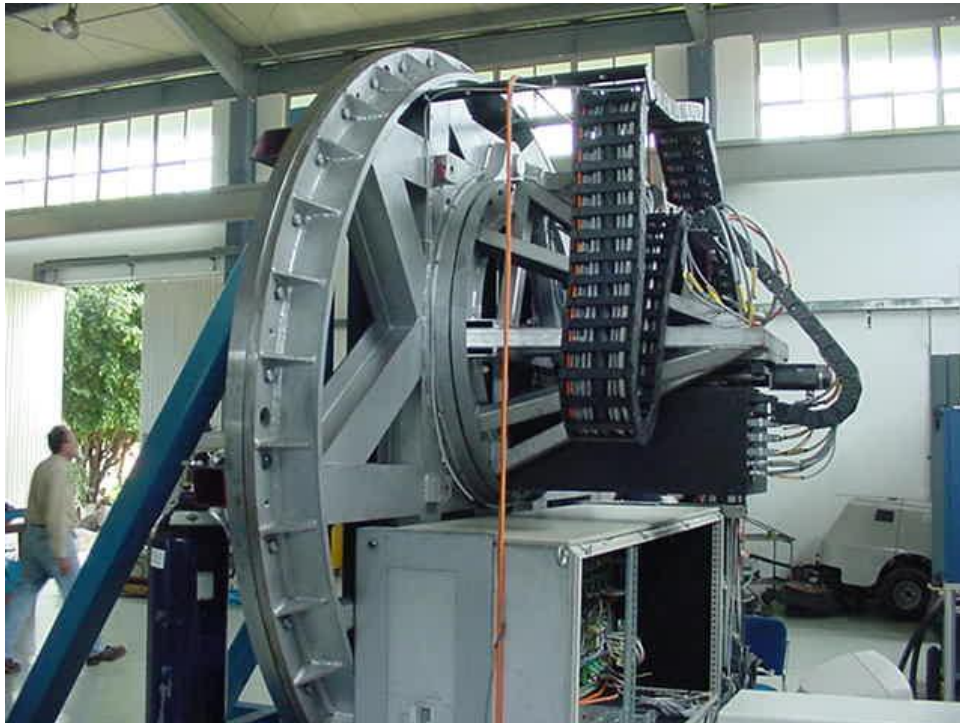
Los lentes deben soportar aceleraciones de 10 g's dentro del rango de supervivencia de acuerdo a especificación 2.1.2.13.4. Al valor más alto de temperatura, los lentes requieren una precarga axial de 0,6 N-m para el colimador y de 0,007 N –m para la cámara.

---

<sup>1</sup> Opto-mechanical System Design, Yoder, Paul R. Jr, 2nd Ed. Marcel Dekker, New York 1992

<sup>2</sup> Precision Glassworking, Zschommler W, SPIE Vol 472 SPIE press, Bellinhamm WA 1984

## ***CAPÍTULO 9: ALINEACIÓN Y MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA CAJA DEL INSTRUMENTO***



## CAPÍTULO 9: ALINEACIÓN Y MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA CAJA DEL INSTRUMENTO

Este capítulo describe el montaje y alineación de los componentes de la caja del Instrumento de Verificación.

### 9.1 Alineación y montaje de los componentes de la caja del instrumento

Esta sección describe brevemente el proceso de alineación de los componentes dentro de la caja del instrumento una vez ensamblados tanto colimador y cámara. Para ello se coloca la caja del instrumento en un mármol o mesa óptica, y se acondicionan los sistemas de control de los motores para poder realizar los movimientos necesarios durante la alineación. Previo a lo anterior, se limpian todas las componentes y se registran con pernos la platina de traslación y la de enfoque una vez alineadas.

#### 9.1.1 Alineación de la platina del CCD

La platina de traslación se alinea con un indicador de carátula con respecto a la base de la caja del instrumento con un paralelismo de al menos 0.5 mm con respecto ala misma para definir el eje focal. El eje óptico del instrumento está definido por el centro del CCD y el colimador. Se monta el telescopio de alineación en este caso un Keuffel and Esser 71 2022, como indica la Figura 9.1.

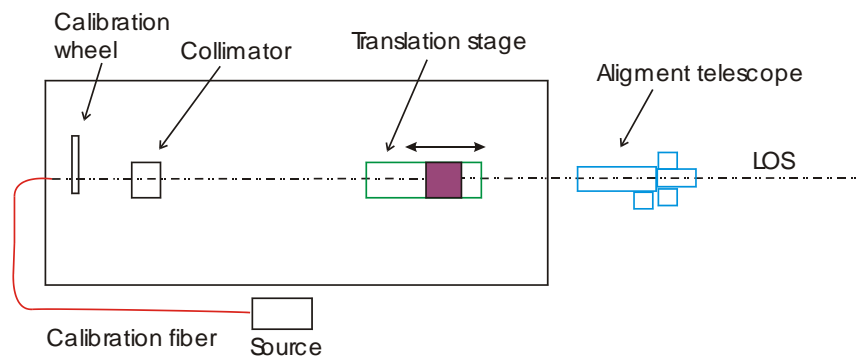


Figura 9.1: Montaje de telescopio de alineación

El telescopio es inicialmente alineado con la platina de traslación verificando dicha alineación con el total de la carrera de la platina. La sensibilidad del telescopio es de 1'' angular cuando es enfocado al infinito y de 25 micrómetros lateralmente enfocado a 250 mm. La referencia para lo anterior es un punto en una pantalla blanca montado en la platina en la posición del centro del CCD. (Figura 9.2)

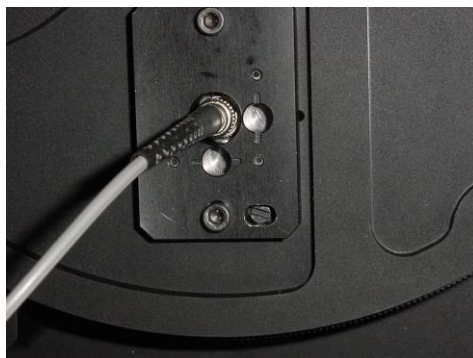




*Figura 9.2: Platina del CCD montada en caja del instrumento*

### 9.1.2 Instalación la fibra de calibración

A continuación se monta la rueda con la fibra de calibración activando también la fuente de luz de la fibra para poder alinear posteriormente el colimador (Figura 9.3)



*Figura 9.3: Rueda de fibra de calibración con fibra instalada*

### 9.1.3 Instalación de la ventana

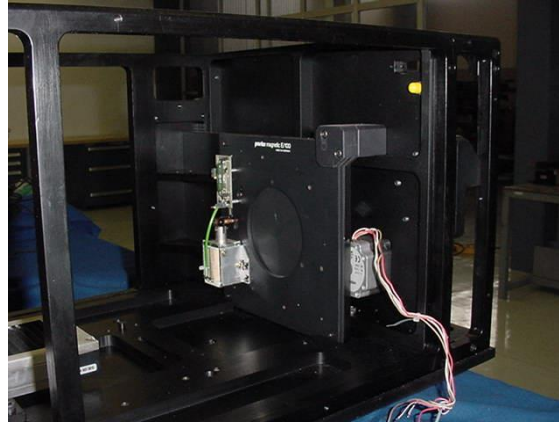
Después de colocar la rueda de fibra de calibración se coloca la ventana en su alojamiento sujetándola con su anillo de retención. Esta no requiere ningún ajuste, ver Figura 9.4.



*Figura 9.4: Instalación de la ventana*

#### 9.1.4 Instalación del Obturador

Se instala el Obturador en su posición el cual debe permanecer en posición de apertura total para poder continuar la alineación (ver Figura 9.5).



*Figura 9.5: Obturador instalado en su posición*

#### 9.1.5 Alineación de la fibra óptica

Una vez localizada la línea de visión (LOS) (ver Figura 9.10) por el telescopio de alineación, y después de haber colocado rueda de fibra, ventana y Obturador, la fibra debe ser posicionada. La mancha de luz emitida por la fibra debe ser centrada en la retícula del telescopio de alineación. La precisión de posicionamiento debe ser mejor de 100 micrómetros. El eje de movimiento de la platina de traslación y el eje de la fibra deben coincidir. La alineación de la fibra es importante para poder alinear los demás componentes ópticos.



*Figura 9.10: Alineación de la fibra con el telescopio de alineación*

### 9.1.6 Montaje de posicionador de pupila

El posicionador de pupila es colocado en su montura cinemática, no requiere ninguna alineación y está montado integralmente a la base del colimador como se aprecia en la Figura 9.11.

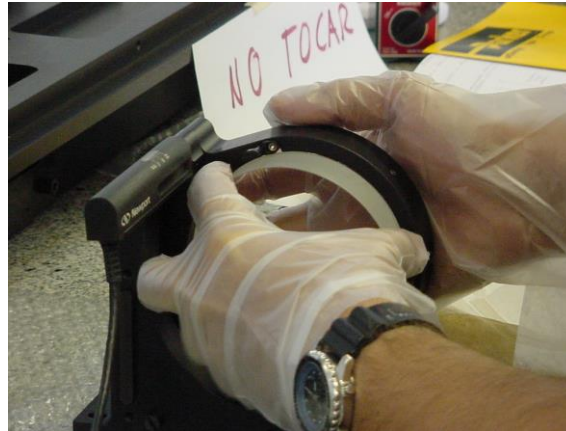


Figura 9.11: Montaje del posicionador de pupila

### 9.1.7 Alineación del colimador

Después de colocarlo en la base el colimador debe ser ajustado y centrado, por medio de la imagen de la fibra óptica en la retícula del telescopio de alineación. El centrado debe ser mejor de  $\pm 100 \mu\text{m}$  en la posición lateral y  $\pm 5'$  en la posición angular. Esto es fácil de conseguir con el telescopio de alineación. Ajustando el telescopio de alineación a infinito, la posición en el eje z de la fibra puede ser ajustada cuando el borde de la cara de la fibra esta enfocado a la retícula del telescopio de alineación. Para los movimientos el colimador tiene unos excéntricos de ajuste que le permiten el movimiento en los ejes. El sistema montado puede verse en la Figura 9.12.



Figura 9.12: Colimador montado incluyendo posicionador de pupila

### 9.1.8 Alineación de la cámara

La cámara (ver Figura 9.13) debe ser alineada a  $\pm 100 \mu\text{m}$  en posición lateral, y a  $\pm 5'$  en la angular. Esto se realiza por medio del telescopio de alineación.

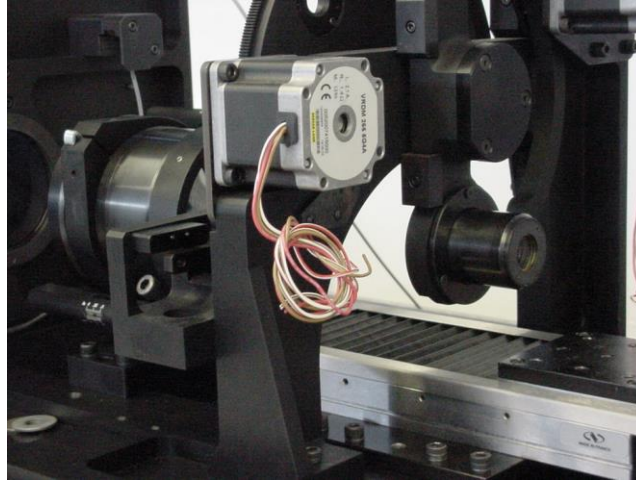


Figura 9.13: Conjunto de ruedas de cámara y arreglo de lentes montadas en posición

### 9.1.9 Montaje de las ruedas de filtros

Como se comentó con anterioridad los filtros en las ruedas tienen una inclinación de  $5^\circ$ , en la rueda de filtros 1 y de  $-5^\circ$  en la rueda de filtros 2. Esta inclinación ya está dada por fabricación en los alojamientos de los filtros, por lo que no requiere alineación alguna. Sin embargo las desviaciones en los filtros deben ser canceladas por lo que una verificación posterior con el CCD colocado debe verificar si existe presencia de fantasmas en la imagen. La Figura 9.14 muestra las ruedas de filtros montadas en su posición.



Figura 9.14: Ruedas de filtros montadas en la caja del instrumento

### 9.1.9.1 Alineación de la cámara usando una V-CCD y una pantalla de calibración en fábrica (FCAS)

Se coloca la V-CCD (CCD de Verificación) en la platina del CCD sin desmontar el telescopio de alineación. La V-CCD tiene su propia platina de traslación lateral permitiendo un movimiento lateral de  $\pm 7$  mm. La pantalla de calibración en fábrica (FCAS) (ver figura 9.15) es una pantalla con unas fibras ópticas a diferentes distancias en el campo. La FCAS debe ser montada en la apertura de  $1' \times 1'$  de la rueda de fibra (ver figura 3.4.2). La V-CCD usando un microscopio objetivo de 5x el píxel proyectado es de  $4 \mu\text{m}$  y el campo de visión de  $2.4048 \times 2.048 \text{ mm}$  ( $8.9'' \times 8.9''$ ) en el cielo ó  $0.00248^\circ \times 0.00248^\circ$ . Una prueba de estrella puede ser realizada para verificar la calidad de imagen del Instrumento de verificación, al centro del campo de visión para verificar la alineación de la cámara. Las Figuras 9.16 y 9.17 muestran una imagen simulada del modo imagen del Instrumento de Verificación en el modo de Prueba de Estrella.

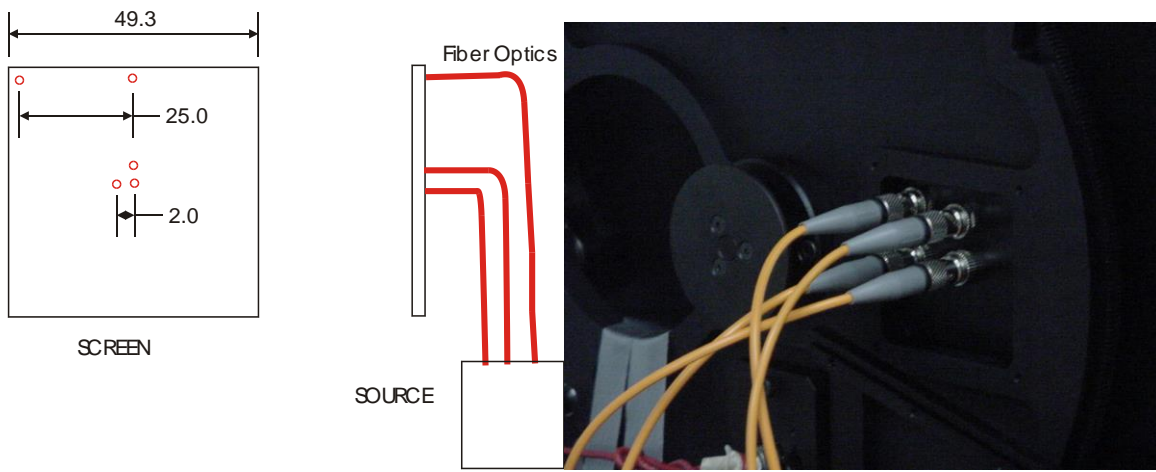


Figura 9.15: Pantalla de prueba de alineación y fibras de verificación del V-CCD montadas.

CAPITULO 9: ALINEACIÓN Y MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA CAJA DEL INSTRUMENTO

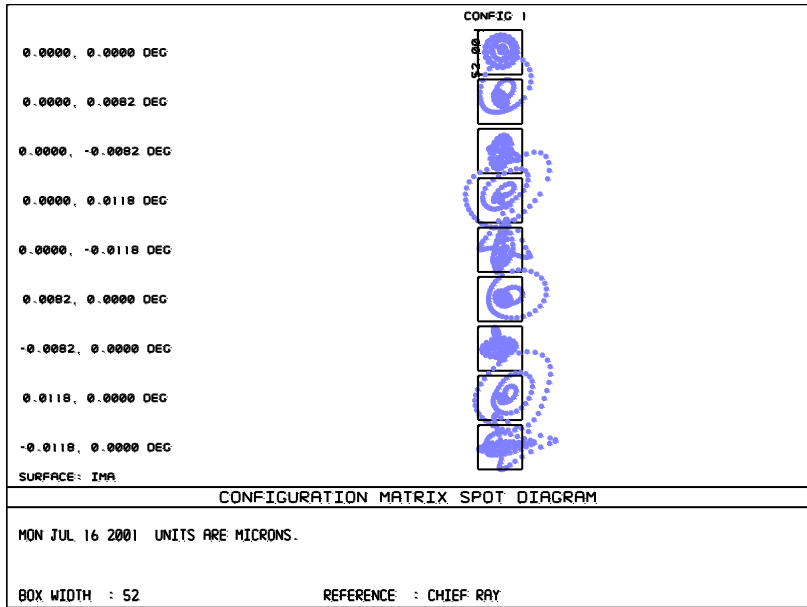


Figura 9.16: Diagrama de manchas para las diferentes posiciones de campo del instrumento el error de centrado de la primera lente de la cámara es de +/- 20  $\mu\text{m}$ .

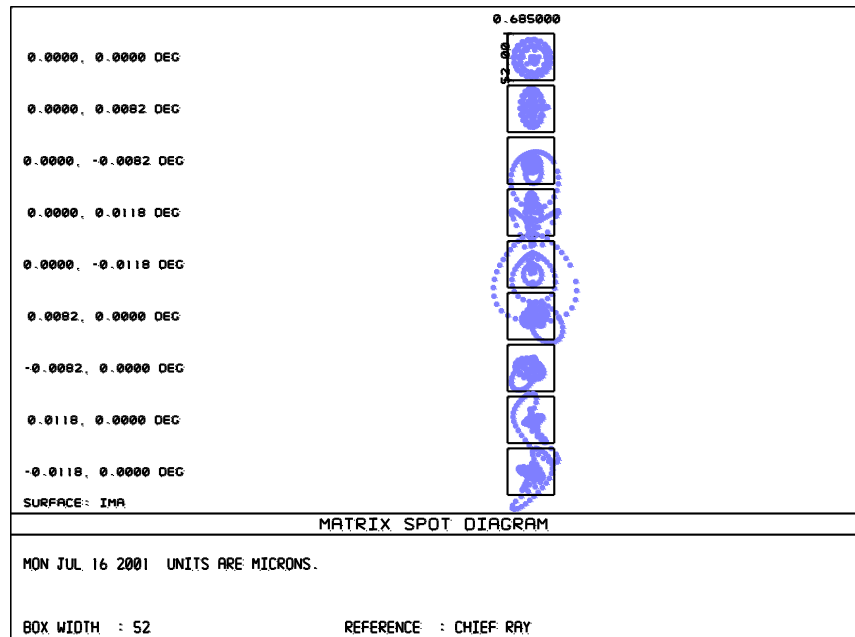


Figura 9.17: Diagrama de manchas para las diferentes posiciones de campo del instrumento el error de centrado de la primera lente de la cámara es de +/- 10  $\mu\text{m}$ .

### 9.1.10 Alineación del CCD

Verificar la perpendicularidad del CCD al eje óptico del instrumento es difícil de verificar usando la Prueba de la Estrella porque la profundidad de foco de la cámara es aproximadamente  $90\ \mu\text{m}$ . El ángulo entre la cara del CCD y el eje óptico del instrumento debe ser de  $\pm 25'$ .

Un mejor procedimiento es rotar la rueda de cámara y mover el CCD cercano a la posición de la pupila. Una apertura de pupila debe ser colocada. La luz colimada proveniente de la fibra de calibración forma un disco de luz en el CCD. Este disco debe ser perfecto si el CCD es perpendicular al eje óptico. De lo contrario la luz colimada forma una elipse. La precisión de este procedimiento es de  $\pm 1$  pixel en 900 que es menor a  $4'$ .

### 9.1.11 Alineación del arreglo de lentes

El arreglo de lentes es suministrado por GRANTECAN antes de las pruebas de aceptación. Este arreglo debe ser alineado antes de poner el CCD definitivo en su lugar. Todas las imágenes deben estar en foco. El foco del arreglo de lentes es apenas de 1 mm para el tamaño de píxel del CCD. No hay restricciones particulares en su perpendicularidad con el eje óptico.

### 9.1.12 Alineación de la caja del instrumento y la platina de enfoque.

Después de haber completado las alineaciones de los componentes internos de la caja del instrumento, se monta la caja del instrumento y la platina de enfoque en la estructura de soporte. Se alinea la platina de enfoque paralela al soporte con un indicador de carátula con un paralelismo de mejor de 0.5 mm (ver Figura 9.18).

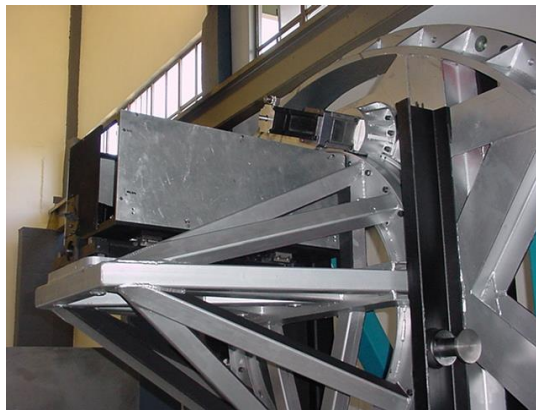


Figura 9.18: Caja del instrumento montada en la estructura

El vector de movimiento de la caja del instrumento debe ser paralelo al eje de rotación de la mesa giratoria de la estructura de soporte. El ángulo entre la mesa giratoria debe ser tal que el eje óptico de la caja del instrumento apunte al centro del espejo secundario M2 del telescopio aproximadamente  $57'$ . Este ángulo está dado por fabricación, pero si requiere

## CAPITULO 9: ALINEACIÓN Y MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA CAJA DEL INSTRUMENTO

algún ajuste la base de la platina de enfoque lo permite por medio de sus patas de nivelación.

Con el CCD montado el instrumento se convierte por sí mismo en un instrumento de alineación muy sensible. La longitud focal efectiva del colimador es de 185 mm y el tamaño de píxel del CCD es de 13  $\mu\text{m}$  ( el V-CCD es de 4  $\mu\text{m}$ ) teniendo un tamaño proyectado en el M2 del telescopio de 1.28 mm (0.4 mm para el V-CCD). Por lo que la alineación de la alineación de la platina de enfoque y la caja se lleva a cabo como sigue:

Colocando un simulador de espejo secundario M2 (FM2S) a 18 139.41 mm y usando el V-CCD en la posición de pupila se realizan los siguientes pasos:

Se gira la mesa giratoria para colocar la caja boca abajo.

Se instala el FM2S a 18 139.41 mm y se alinea su centro con el centro del V-CCD.

La caja del instrumento es rotada por medio de la mesa giratoria 180°. El centro del FM2S no debe moverse. Se desplaza la caja del instrumento con la platina de enfoque a lo largo de su carrera y el punto no debe moverse. Si se desplaza, se ajusta la posición hacia donde lo requiera y se repite el procedimiento hasta que el punto no se desplace.

Después de realizar los pasos anteriores la mesa giratoria y la estructura de soporte generan un cono cuyo vértice es el centro del FM2S. (Figura 9.19)

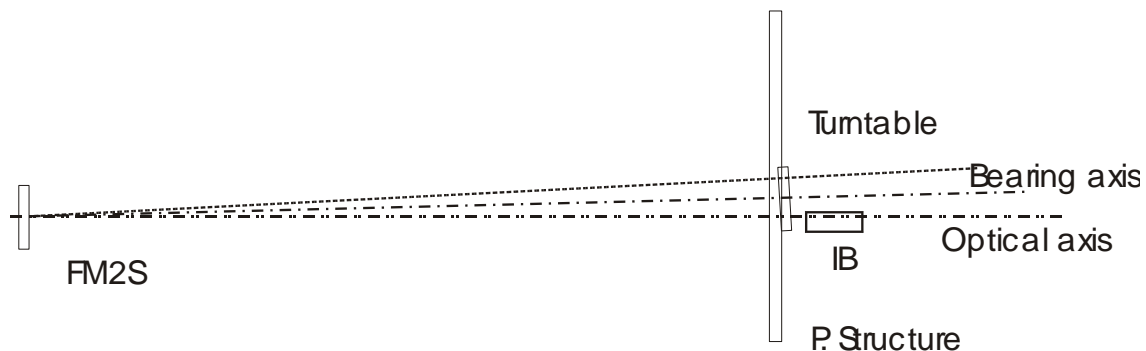


Figura 9.19: Alineación de la caja del instrumento y la platina de enfoque

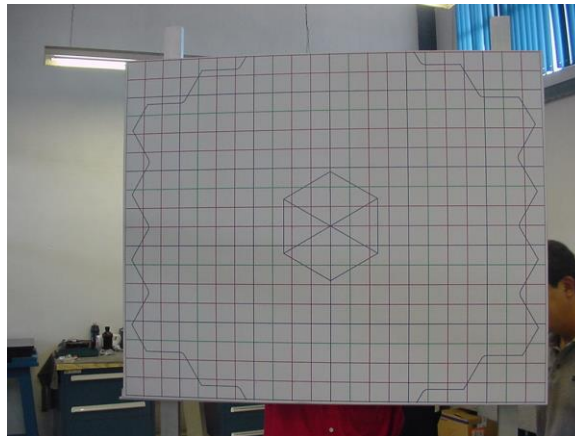


Figura 9.20: Simulador del secundario M2 (FM2S)



## ***CAPÍTULO 10: DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD DEL INSTRUMENTO***



## **CAPITULO 10: DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD DEL INSTRUMENTO.**

Este capítulo describirá el análisis RAMS realizado por un servidor para el Instrumento de verificación, con la finalidad de obtener su fiabilidad. Es parte sustancial de las aportaciones de la presente tesis. Vale la pena mencionar que es la primera vez en México que se realiza un análisis de éste tipo a un Instrumento Astronómico y por consiguiente en el IAUNAM y el CIDESI.

### **10.1 Introducción**

El análisis RAMS<sup>1</sup> (Confiabilidad, Disponibilidad, Manteneabilidad y Seguridad) por sus siglas en inglés (Reliability, Availability, Maintainability and Safety), permite verificar la vida esperada de los componentes del sistema, además de proporcionar la información necesaria para la planeación de las actividades de mantenimiento del instrumento. Consta de las siguientes partes importantes:

Los tiempos medios entre fallas de los componentes (MTBF) y el tiempo medio de reparación de los mismos (MTTR).

El análisis de modos de falla, efectos y análisis de efecto crítico (FMCEA).

El análisis de seguridad para operación y mantenimiento de los componentes. Este consiste en:

Identificación de riesgos: la cual describe brevemente el riesgo su severidad y su probabilidad.

El análisis de riesgo: el cual describe la solución adoptada para prevenir accidentes.

De los datos obtenidos del análisis de pueden definir:

Las refacciones para los próximos diez años de vida del equipo.

La información necesaria para las actividades de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, así como su frecuencia y el personal y perfil necesarios para la realización de dichas actividades.

### **10.2 Definiciones<sup>2</sup>**

#### **Tiempo medio de reparación diurno (MTTR<sub>d</sub>)**

Es el tiempo medio de reparación que es empleado durante el día en dichas actividades.

#### **Tiempo medio de mantenimiento preventivo nocturno (MPMNT)**

Es el tiempo empleado en el mantenimiento preventivo por año de las labores nocturnas debidas a esta actividad.

---

<sup>1</sup> GTC Availability Model, Ana Pérez, J. Carlos González, PO, GTC, RPT/STMA/0067-R, I.C, 16/10/00,

<sup>2</sup> Baseline of the GTC Operation and Maintenance Plan Ana Pérez, J. Carlos González, PUB/STMA/ 0026-L I.C, 29/02/00.

### **Tiempo medio entre falla (MTBF)**

Es el tiempo medio entre dos fallas consecutivas de un sistema. Dicho tiempo es obtenido de las especificaciones técnicas del fabricante, pruebas o historial precedente de partes similares.

### **Tiempo medio de reparación (MTTR)**

Es el tiempo medio a emplear en una labor de mantenimiento correctivo no planeado para reparar el sistema.

### **Tiempo medio de reparación nocturno (MTTR<sub>n</sub>).**

Es el tiempo medio de reparación nocturno de un sistema.

### **Falla de sistema**

Es cualquier falla de un sistema que impida al Gran Telescopio Canarias poder realizar sus funciones de observación científica.

### **Tiempo de calibración total (TCT)**

Es el tiempo de calibración nocturno requerido por un sistema durante el cual el Telescopio no está disponible para la observación.

### **Tiempo útil de observación**

El tiempo útil de observación es aquel en que las condiciones para la observación astronómica no son impedidas por condiciones atmosféricas. Asumiendo un tiempo medio de observación diario de 11 horas, 365 días del año, y asumiendo una pérdida del 21% debido a condiciones atmosféricas. El tiempo útil de observación del Observatorio del Roque de los muchachos es de 3172 horas por año.

### **Tiempo de operación total (TOT)**

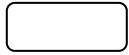
Asumiendo que el Instrumento de Verificación será usado durante el primer año para calibración el 30 % del tiempo útil de observación su TOT será de 952 horas, y los años subsecuentes (11 en total) será usado el 2% del tiempo útil de observación, esto es 698 horas. Por lo tanto para el cálculo RAMS el tiempo de 1650 horas es considerado.

### **Diagrama funcional de bloques.**

El diagrama funcional de bloques muestra la interacción funcional entre los diferentes componentes y subsistemas del Instrumento de Verificación, y es una herramienta útil para el análisis de confiabilidad del instrumento así como para determinar las rutas de mantenimiento.

### Árbol de Fallas

El árbol de fallas es un diagrama detallado de las posibles fallas de los componentes, y como éstas afectan a los subsistemas u otros componentes vinculados a ellos. Esta relación se muestra en forma gráfica por medio de compuertas lógicas. Las siguientes figuras muestran el símbolo y su significado.



Indica el modo de falla



Indica un evento



Conector.



Compuerta lógica OR



Compuerta lógica and



Evento no evaluado



Evento terminal

### Riesgo

Un riesgo es una condición prerequisite para un evento o serie de eventos no planeados que resultan en un daño, muerte, incapacidad a personas o en un daño o pérdida de equipo, propiedad o daño al medio ambiente.

### Análisis de riesgo

El análisis de riesgo es un proceso para identificar y evaluar el riesgo y daños asociados con un elemento o subsistema.

**Lesión menor**

Una lesión puede ser considerada menor, cuando la persona afectada puede ser curada con el equipo médico disponible en las instalaciones del Telescopio.

**Daño menor de un sistema**

Un daño es considerado menor cuando es necesario utilizar tres veces o menos el MTTR del componente o subsistema afectado.

**Lesión mayor**

Una lesión es considerada mayor, cuando la persona afectada tiene que ser trasladada a un hospital.

**Daño mayor de un sistema**

Un daño al sistema es considerado mayor, cuando es necesario utilizar mas de tres veces el MTTR del componente o subsistema afectado.

**10.3 Consideraciones matemáticas del RAMS**

El índice de falla es el número total de fallas dentro de una población, dividido entre el tiempo total de duración de la población, durante un determinado intervalo de medición, bajo mismas condiciones. Para un sistema compuesto de  $n$  subsistemas en configuración en serie el índice de falla está dado por:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (10.1)$$

Asumiendo un índice de falla constante para un sistema, el MTBF es el inverso del índice de falla. Para un sistema compuesto de  $n$  subsistemas con índice de falla constante, arreglados en serie el MTBF está dado por:

$$MTBF = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTBF_i}} \quad (10.2)$$

Para un sistema compuesto de  $n$  subsistemas arreglados en serie el MTTR es:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i MTTR_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = MTBF \sum_{i=1}^n \frac{MTTR_i}{MTBF_i} \quad (10.3)$$

Para un sistema compuesto de n subsistemas, el MPMNT será:

$$MPMNT = \sum_{i=1}^n MPMNT_i \quad (10.4)$$

Esta ecuación no considera el mantenimiento preventivo realizado en paralelo.

Cuando el Telescopio es calibrado todos los sistemas entran en función por lo tanto la probabilidad de defectos (DP) en porcentaje es la división entre el tiempo total de operación y el tiempo medio entre fallas:

$$DP = TOT / MTBF \quad (10.5)$$

#### Modelo de confiabilidad

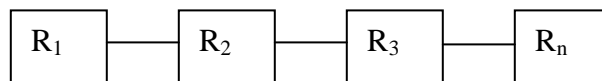
Si asumimos un índice de falla constante ( $\lambda$ ) para un componente, la confiabilidad exponencial instantánea será:

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (10.6)$$

En el caso del Instrumento de verificación la configuración de los sistemas es en serie, no existen sistemas paralelos. Por lo tanto la confiabilidad total de un sistema  $R_s$  configurado en serie será:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (10.7)$$

Esto es en forma esquemática:



El MTBF será:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (10.8)$$

Si el índice de reparación ( $\mu$ ) es constante la disponibilidad instantánea será:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t] \quad (10.9)$$

En un sistema estable la disponibilidad será:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (10.10)$$

#### 10.4 Análisis FMCEA

El propósito del FMCEA es estudiar los resultados o efectos debidos a la falla de un elemento o subsistema y clasificarlos de acuerdo a su efecto crítico en el sistema global. Para ello los resultados son desplegados en forma de una matriz de los subsistemas y sistemas que consta de los siguientes elementos:

**Elemento y número de parte (*Element and part number*):** esta columna indica la referencia y nombre del elemento analizado para una identificación clara en el momento de toma de decisiones durante el mantenimiento, facilitando su localización.

**Modo de falla (*Failure Mode*):** Indica la forma en que se presenta la falla o fallas en el componente, describiendo brevemente dicha condición. La determinación de este modo se realiza por medio de los árboles de falla, los diagramas de bloques, datos de fabricante y experiencia de fallas anteriores en esta clase de componente.

**Efecto local (*Local Effect*):** Describe el efecto posible a nivel local del subsistema o componente. Esto es de extrema utilidad en el momento de localización de la falla cuando el sistema está en operación.

**Efecto en el siguiente nivel (*Next Level Effect*):** Describe el efecto de la falla del componente o subsistema dentro del funcionamiento global del sistema. Esto ayuda al igual que el anterior a determinar más fácilmente la localización de la falla, así como los posibles daños menores y mayores al sistema.

**Probabilidad de defecto (*Defect Probability*):** este es el dato de la probabilidad de que ocurra la falla durante TOT tiempo total de operación del sistema. Para el caso del Instrumento de Verificación es de 1650 horas como se definió en 4.2.

**Detección (*Detection*):** Esta describe la posible forma de detección del sistema disminuyendo con ello el tiempo de identificación de la falla y su corrección.

**Acciones correctivas ( Corrective Task):** Indica las acciones correctivas a realizar para la solución del problema.

**Prevención y observaciones (Prevention and Remarks):** Indica las posibles acciones preventivas a tomar en cuenta para prevenir la falla durante las actividades de mantenimiento.

**Clasificación Crítica (Critical Classification) :**Esta indica el número crítico dentro de los modos de falla, y su objetivo es clasificar al modo de falla potencial indicando su importancia. Se obtiene del producto de la probabilidad de la falla ( porcentaje que representa la probabilidad de defecto contra el tiempo total de operación ) y su severidad de acuerdo a las Tablas 10.1 y 10.2.

**Clasificación crítica =  $P \times S$**

Descripción	Categoría	Definición
Sin importancia	1	No existe daño al sistema No existe lesión
Marginal	2	Una parte del sistema está inoperable , no hay ningún otro daño al sistema o el daño es más bajo que el daño menor. No existe lesión
Severa	3	Daño menor al sistema , el sistema está inoperable Lesión menor,
Crítica	4	Daño mayor al sistema, el sistema será reparado dentro de un rango de seis meses. Lesión mayor.
Catastrófica	5	Daño al sistema que no puede ser reparado en seis meses. Invalidez o muerte

Tabla 10.1: Clasificación de severidad S

Descripción	Categoría	Definición
Improbable	1	Entre 0 % y 5 %
Infrecuente	2	Entre 5 % y 15 %
Probable	3	Entre 15 % y 50 %
Frecuente	4	Entre 50 % y 100 %

Tabla 10.2: Clasificación de probabilidad P



## 10.5 Análisis de seguridad

El análisis de seguridad se realiza con la finalidad de determinar los posibles riesgos durante la operación y funcionamiento del instrumento. Dicho análisis se expresa en forma de una matriz de seguridad, la cual sirve para toma de decisiones para la instalación de protecciones, calcomanías de advertencia, o reconsideraciones en el diseño de ser necesario, si dicho diseño causa un alto riesgo potencial. La matriz consta de las siguientes partes:

**Nivel de ensamble (*Assembly Level*)** : Indica el nivel en el cual las actividades de mantenimiento serán realizadas. Para el caso el nivel 1 indica que serán realizadas en las instalaciones del telescopio. El número 2 indica si son realizadas fuera de las instalaciones, esto es taller especializado.

**Interacción de elementos (*Elements Interaction*)**: Indica los elementos que están interaccionando durante el riesgo, por ejemplo un sistema de transmisión motor-engranes que pudiese ser fuente de riesgo para el personal (lesión o mutilación).

**Descripción del riesgo (*Hazard Description*)**: Este describe la fuente del posible riesgo por ejemplo alto voltaje o movimiento mecánico.

**Consecuencias (*Consequences*)**: Indica las consecuencias el riesgo potencial como son descargas eléctricas, o captura de miembros.

**Actividades asociadas al riesgo ( *Task Activities Associated to Hazard* )** : Indica si el riesgo existe en las actividades de operación, mantenimiento o ensamble. Si este riesgo existe su valor es 1, de lo contrario es 0.

**Factor de seguridad (*Safety Factor*)**: Indica el factor de seguridad utilizado durante el diseño o selección del componente, para evitar o prever riesgos por diseño.

**Nivel de riesgo (*Risk Level*)**: Este es el producto de la severidad (***Hazard Severity***) del riesgo y la probabilidad (***Hazard Probability***) del mismo. Este valor se obtiene de las tablas 4.4 a y 4.4 b. Va estrechamente ligado en el momento de operación a la clasificación crítica ya que proviene de un modo de falla del sistema. En los casos de mantenimiento y ensamble no aplica, ya que la probabilidad de ocurrencia de dicho riesgo, depende del individuo que realiza dichas labores. En este caso sólo puede reducirse con capacitación, equipo de seguridad, señalamientos y advertencias (llamadas pasivas), tanto en equipos como en manuales.

**Prevención del riesgo (*Hazard prevention*)**: Indica las acciones a tomar por el individuo en forma de advertencia, para la prevención del riesgo.

**Señalamientos y advertencias (*Warnings and signs*):** Indica las leyendas con las que deben diseñarse las etiquetas de advertencia o señalamiento que se colocarán en el instrumento.

**Localización y emplazamiento (*Localization and placement*):** Indica la localización en los componentes donde se pegará la etiqueta de advertencia o señalamiento.

**Equipo de seguridad (*Safety equipment*):** Recomienda el equipo de seguridad a indicar en los manuales de mantenimiento e instrucciones de trabajo por los individuos que realicen las actividades de operación, mantenimiento y ensamble.

**Medidas de seguridad activa (*Active Warning Remarks*):** Indica las consideraciones de seguridad activa por diseño de los elementos del instrumento, con el fin de prevenir riesgos.

## 10.6 Prueba de verificación del RAMS

Entre los componentes optomecánicos de la caja del instrumento, se pueden destacar las ruedas de filtros, cámara, arreglo de lentes y fibra de calibración. Estas ruedas integran un sistema optomecánico que consta de motor, rodamientos, retentores y pivotes flexurales, como se describe en el capítulo I sección 6. Con el fin de verificar la confiabilidad de dichos elementos, que se encuentran sometidos a las mismas condiciones de funcionamiento, se seleccionó el conjunto de rueda de filtros 1 como sujeto de prueba de durabilidad, de acuerdo a las condiciones de operación especificadas en 1.5.1.8.1.

A continuación se describe la prueba y los resultados obtenidos.

### 10.6.1 Descripción de la prueba

Se construyó un sistema de rueda de filtros extra con los materiales y características del original adecuándolo a una base especial (ver Figura 10.1) para poder ser montado dentro de una cámara climática (Figura 10.2), sometiendo el conjunto a las temperaturas y humedad extremas de la especificación 2.1.2.10.1.

Las condiciones de temperatura y humedad fueron:

Temperatura: -6°C a 30°C humedad del 10 al 100 % con condensación

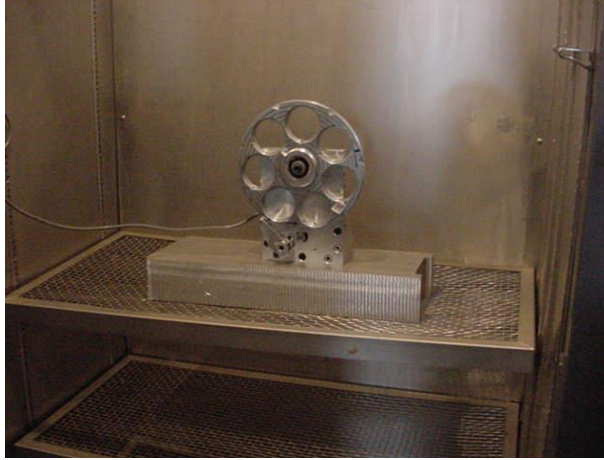
Tiempo de ciclo:

estable -6 °C estable, 2 horas

rampa de calentamiento -6 °C a 35°C, 2 horas

estable 30°C, 2 horas

rampa de enfriamiento 30°C a -6°C, 2 horas



*Figura 10.1: Sistema de prueba de rueda de filtros*



*Figura 10.2 Sistema de prueba en cámara climática*

Las partes a evaluar en durabilidad fueron:

- Superficie de contacto de rodamiento del retentor sobre la rueda de filtros
- Superficie de contacto engrane piñón
- Rodamiento central de la rueda de filtros
- Rodamiento del retentor
- Motor de pasos
- Pivote flexural

El material de la rueda de filtros fue aluminio ALUMEC 89 con dureza 180 vickers, y el del piñón acero inoxidable SUS 303 con dureza 240 vickers.

El tiempo de ciclo fue de 2.6 segundos por ciclo

La prueba duro 14 días con un número de horas total de 338 horas.

La Tabla 10.3 muestra los resultados en ciclos efectuados por los componentes en su totalidad.

Componente	Número de ciclos totales
Pivote flexural	1 377 498
Rodamiento del retentor	3 214 163
Superficie engrane rueda	459 166
Rodamiento central de la rueda	459 166
Engrane piñón	2 295 831

Tabla 10.3: Resultados totales en ciclos de prueba

### 10.6.2 Resultados obtenidos

El MTBF de la rueda por cálculos RAMS (ver Tabla de apartado 10.7.1) es de 3 444 horas, por lo que al tiempo total de operación del instrumento de TOT= 1650 horas tenemos una disponibilidad del 61% es decir existen un 39% de posibilidad de que falle en operación continua.

Debido a los altos costos que significaría mantener la rueda las 1650 horas de operación, se realizó como ya se mencionó una prueba continua de 338 horas es decir el 20 % del tiempo total, y verificar el desgaste de los componentes como una forma de proyección de la posible falla.

Los resultados fueron favorables no apreciándose ningún desgaste en las superficies de contacto del piñón-rueda, y de la superficie rodamiento retentor-rueda (Figura 10.3). De la misma forma tanto el pivote flexural como el rodamiento central no sufrieron daño apreciable. El motor no sufrió variaciones en amperaje ni desgastes apreciables. De lo anterior se concluye que el MTBF calculado en el RAMS es muy cercano a la vida esperada del sistema, esto sin considerar ningún evento no esperado como golpes, ensambles inadecuados, mal uso o temperaturas y condiciones fuera de lo especificado.

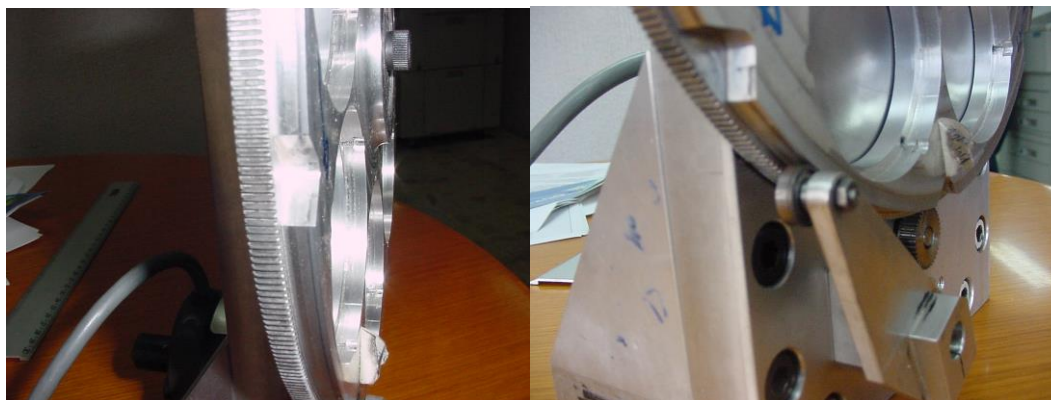


Figura 10.3: Condiciones del sistema después de la prueba

### 10.7 Resultados del análisis RAMS

A continuación se muestran las tablas de resumen del RAMS<sup>3</sup> del Instrumento de verificación. En el caso de los árboles de falla, diagrama de bloques y FMCEA sólo se muestra un ejemplo de cada uno, correspondiente a un subsistema en particular en el anexo 2.

<sup>3</sup> Commissioning Instrument RAMS Analysis, Vicente Bringas, Gustavo Anguiano, EXT/UNAM, 22/07/02.

**10.7.1 Resumen RAMS para los componentes del Instrumento de Verificación**

<i>Component</i>	<i>INSTRUMENT BOX</i>						
<i>Subsystem</i>	<i>MTBF</i>	<i>Used time in hours based on 1650 hours</i>	<i>Reliability</i>	<i>Unreliability</i>	<i>MTR</i>	<i>Availability</i>	<i>Unavailability</i>
CALIBRATION FIBER SE-CM-CA-245	4,633.896	0	1.000000	0.000000	1.26	0.999727	0.000273
		330	0.931262	0.068738			
		660	0.867249	0.132751			
		990	0.807637	0.192363			
		1320	0.752121	0.247879			
		1650	0.700422	0.299578			
CAMERA WHEEL SE-CM-CA-230	5,577.032	0	1.000000	0.000000	1.35	0.999758	0.000242
		330	0.942545	0.057455			
		660	0.888392	0.111608			
		990	0.837349	0.162651			
		1320	0.789240	0.210760			
		1650	0.743894	0.256106			
CCD CONTROLLER SE-CM-CA-265	5,120.963	0	1.000000	0.000000	1.71	0.999666	0.000334
		330	0.937591	0.062409			
		660	0.879078	0.120922			
		990	0.824216	0.175784			
		1320	0.772778	0.227222			
		1650	0.724550	0.275450			
DETECTOR TRANSLATION STAGE SE-CM-CA-240	7,215.665	0	1.000000	0.000000	1.39	0.999807	0.000193
		330	0.955296	0.044704			
		660	0.912591	0.087409			
		990	0.871795	0.128205			
		1320	0.832822	0.167178			
		1650	0.795592	0.204408			
FILTER WHEELS SE-CM-CA-220	3,444.407	0	1.000000	0.000000	1.42	0.999589	0.000411
		330	0.908639	0.091361			
		660	0.825625	0.174375			
		990	0.750195	0.249805			
		1320	0.681656	0.318344			
		1650	0.619379	0.380621			
PUPIL POSITIONER SE-CM-CA-235	855.513	0	1.000000	0.000000	2.32	0.997295	0.002705
		330	0.679952	0.320048			
		660	0.462334	0.537666			
		990	0.314365	0.685635			
		1320	0.213753	0.786247			
		1650	0.145342	0.854658			
PUPIL STOPS AND MICROLENS WHEEL SE-CM-CA-225	5,577.032	0	1.000000	0.000000	1.35	0.999758	0.000242
		330	0.942545	0.057455			
		660	0.888392	0.111608			
		990	0.837349	0.162651			
		1320	0.789240	0.210760			
		1650	0.743894	0.256106			

CAPITULO 10: DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD DEL INSTRUMENTO

<i>Component</i>	<i>INSTRUMENT POSITIONER</i>						
<i>Subsystem</i>	<i>MTBF</i>	<i>Used time in hours based on 1650 hours</i>	<i>Reliability</i>	<i>Unreliability</i>	<i>MTRR</i>	<i>Availability</i>	<i>Unavailability</i>

FOCUSING STAGE SE-CM-CA-140	2,633.637	0	1.000000	0.000000	1.31	0.999502	0.000498
		330	0.882230	0.117770			
660		0.778331	0.221669				
		990	0.686667	0.313333			
		1320	0.605798	0.394202			
		1650	0.534454	0.465546			
TURNTABLE SE-CM-CA-120	2,026.621	0	1.000000	0.000000	1.15	0.999433	0.000567
		330	0.849733	0.150267			
		660	0.722047	0.277953			
		990	0.613547	0.386453			
		1320	0.521352	0.478648			
1650	0.443010	0.556990					

<i>Component</i>	<i>POWER SYSTEM</i>						
<i>Subsystem</i>	<i>MTBF</i>	<i>Used time in hours based on 1650 hours</i>	<i>Reliability</i>	<i>Unreliability</i>	<i>MTRR</i>	<i>Availability</i>	<i>Unavailability</i>

POWER SE-CM-CA-400	28,691.125	0	1.000000	0.000000	1.04	0.999964	0.000036
		330	0.988564	0.011436			
		660	0.977259	0.022741			
		990	0.966083	0.033917			
		1320	0.955035	0.044965			
		1650	0.944113	0.055887			

<i>Component</i>	<i>TEMPERATURE SYSTEM</i>						
<i>Subsystem</i>	<i>MTBF</i>	<i>Used time in hours based on 1650 hours</i>	<i>Reliability</i>	<i>Unreliability</i>	<i>MTRR</i>	<i>Availability</i>	<i>Unavailability</i>

TEMPERATURE SE-CM-CA-300	5,232.687	0	1.000000	0.000000	1.57	0.999701	0.000299
		330	0.938882	0.061118			
		660	0.881500	0.118500			
		990	0.827625	0.172375			
		1320	0.777042	0.222958			
		1650	0.729551	0.270449			

<i>Component</i>	<i>MTBFt</i>	<i>Used time in hours based on 1650 hours</i>	<i>Reliability</i>	<i>Unreliability</i>	<i>MTRR</i>	<i>Availability</i>	<i>Unavailability</i>
------------------	--------------	-----------------------------------------------	--------------------	----------------------	-------------	---------------------	-----------------------

INSTRUMENT BOX	422.388	0	1.000000	0.000000	1.86	0.995611	0.004389
		330	0.457823	0.542177			
		660	0.209602	0.790398			
		990	0.095961	0.904039			
		1320	0.043933	0.956067			
		1650	0.020114	0.979886			
INSTRUMENT POSITIONER	1,145.298	0	1.000000	0.000000	1.22	0.998936	0.001064
		330	0.749661	0.250339			
		660	0.561991	0.438009			
		990	0.421303	0.578697			
		1320	0.315834	0.684166			
		1650	0.236768	0.763232			

CAPITULO 10: DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD DEL INSTRUMENTO

POWER SYSTEM	28,691.125	0	1.000000	0.000000	1.04	0.999964	0.000036
		330	0.988564	0.011436			
		660	0.977259	0.022741			
		990	0.966083	0.033917			
		1320	0.955035	0.044965			
		1650	0.944113	0.055887			
TEMPERATURE SYSTEM	5,232.687	0	1.000000	0.000000	1.57	0.999701	0.000299
		330	0.938882	0.061118			
		660	0.881500	0.118500			
		990	0.827625	0.172375			
		1320	0.777042	0.222958			
		1650	0.729551	0.270449			
<b>Component</b>	<b>MTBF</b>	<b>Used time in</b>	<b>Reliability</b>	<b>Unreliability</b>	<b>MTTR</b>	<b>Availability</b>	<b>Unavailability</b>
			<b>hours based on</b>				
			<b>1650 hours</b>				
COMMISSIONING INSTRUMENT SE-CM-CA	<b>288.468</b>	0	1.000000	0.000000	1.676	0.994225	0.005775
		330	0.318551	0.681449			
		660	0.101474	0.898526			
		990	0.032325	0.967675			
		1320	0.010297	0.989703			
		1650	0.003280	0.996720			

**10.7.2 Resumen RAMS total del Instrumento de Verificación**

<i>Component</i>	<i>INSTRUMENT BOX</i>	
	<i>Subsystem</i>	<i>MTBF</i>
	PUPIL STOPS AND MICROLENS WHEEL SE-CM-CA-225	5,577.032
	PUPIL POSITIONER SE-CM-CA-235	855.513
	FILTER WHEELS SE-CM-CA-220	3,444.407
	DETECTOR TRANSLATION STAGE SE-CM-CA-240	7,215.665
	CCD CONTROLLER SE-CM-CA-265	5,120.963
	CAMERA WHEEL SE-CM-CA-230	5,577.032
	CALIBRATION FIBER SE-CM-CA-245	4,633.896
	<b>MTBF</b>	<b>422.388</b>
<i>Component</i>	<i>INSTRUMENT POSITIONER</i>	
	<i>Subsystem</i>	<i>MTBF</i>
	TURNTABLE SE-CM-CA-120	2,026.621
	FOCUSING STAGE SE-CM-CA-140	2,633.637
	<b>MTBF</b>	<b>1,145.298</b>
<i>Component</i>	<i>POWER SYSTEM</i>	
	<i>Subsystem</i>	<i>MTBF</i>
	POWER SE-CM-CA-400	28,691.125
	<b>MTBF</b>	<b>28,691.125</b>
<i>Component</i>	<i>TEMPERATURE SYSTEM</i>	
	<i>Subsystem</i>	<i>MTBF</i>
	TEMPERATURE SE-CM-CA-300	5,232.687
	<b>MTBF</b>	<b>5,232.687</b>
	<b>Total MTBF</b>	<b>288.468</b>

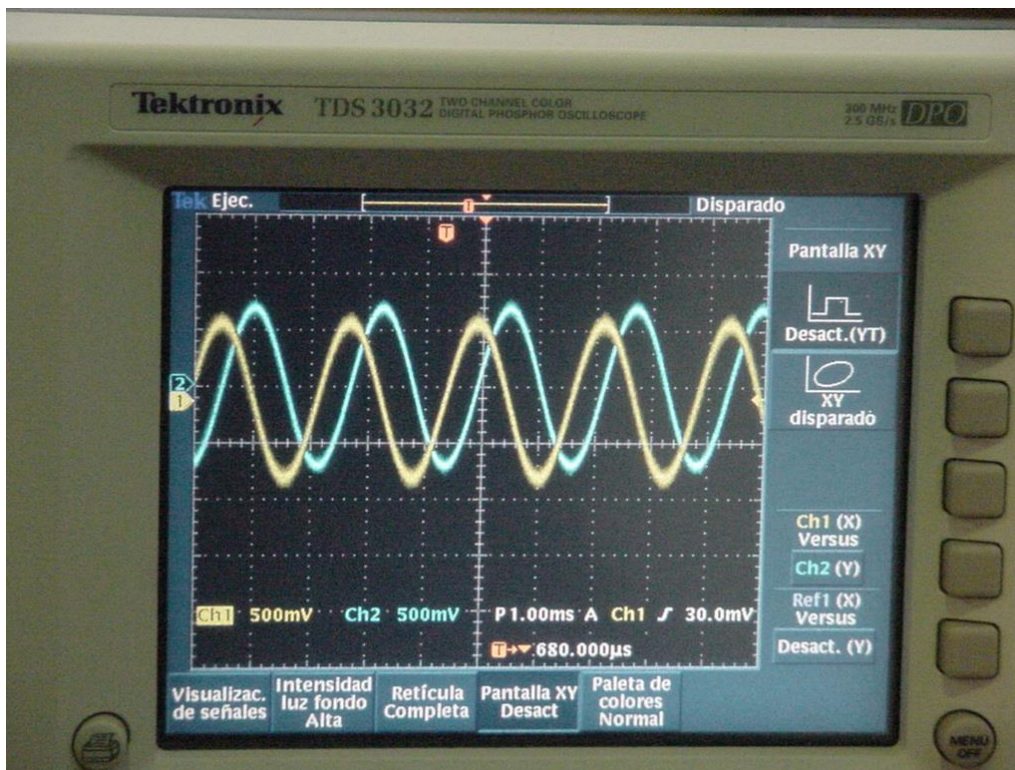
El número 288.468 indica el MTBF del instrumento a un 100% de operación continua. Debido a que el Instrumento será utilizado solo el 33% del tiempo útil el MTBF efectivo del Instrumento de Verificación será

**MTBF = 874.14 horas.**

**Verificación:** Por lo anterior la especificación 2.1.2.11.1 de al menos 700 horas se cumple.



# ***CAPÍTULO 11: SISTEMA DE CONTROL DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN***



## CAPITULO 11: SISTEMA DE CONTROL DEL INSTRUMENTO DE VERIFICACIÓN

En este capítulo se describirá brevemente el sistema de control del Instrumento de Verificación en su parte de configuración de hardware, éste sistema fue desarrollado en conjunto por el equipo IAUNAM-CIDESI<sup>1</sup>, solo se describe como manera informativa y su relación con el cumplimiento de especificaciones.

### 11.1 El sistema de control

El hardware de control del Instrumento de Verificación (CI), está compuesto por dos Unidades de Control Local (LCU): la unidad de adquisición de datos, y la unidad de control de mecanismos.

La finalidad de la unidad de adquisición de datos (CI IDAS LCU) es adquirir los datos de la imagen y procesarlos. La otra unidad de control de mecanismos (CI IMCS LCU), es controlar y monitorear los dispositivos electromecánicos del Instrumento. La primera unidad será proporcionada por la Oficina de Proyectos de GTC, y la segunda es la diseñada y proporcionada por el equipo de trabajo IAUNAM- CIDESI (ver Figura 11.1).

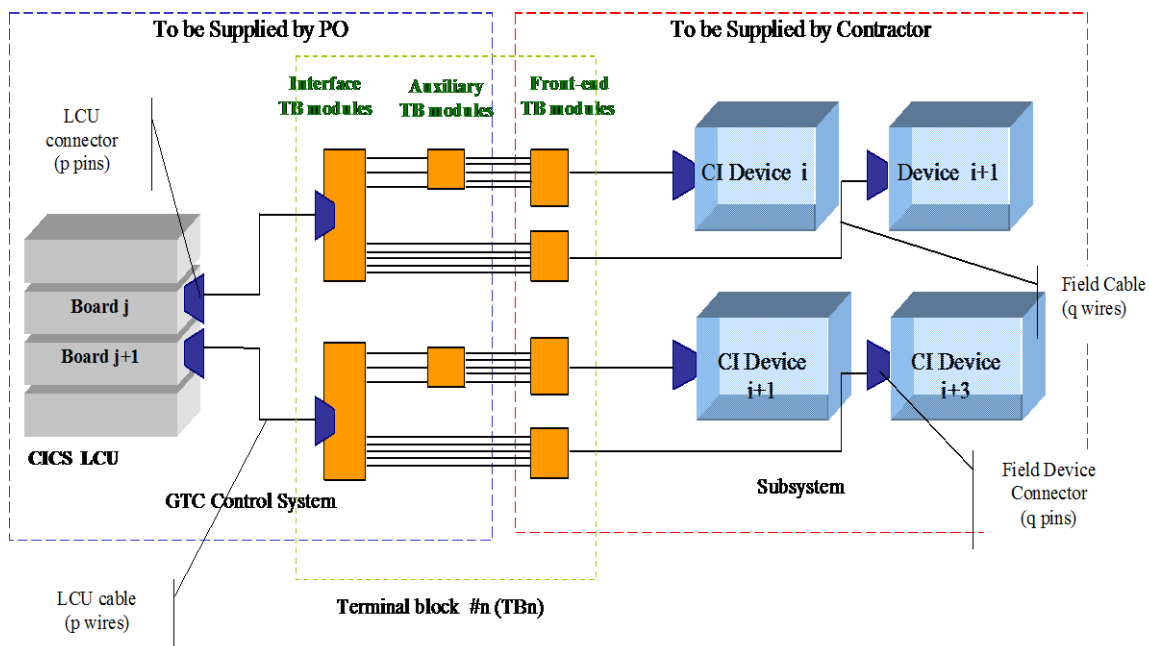


Figura 11.1: Ruta de señales desde la LCU a los dispositivos del Instrumento

Durante las pruebas de aceptación del instrumento tanto en CIDESI, como en el Telescopio, el equipo de trabajo realizará las pruebas de la unidad de control de mecanismos (CI IMCS LCU), con el VCCD realizando las pruebas de imagen descritas en el Capítulo 9, y realizará los movimientos de control requeridos, simulando la operación en la plataforma Nasmyth, posteriormente, una vez instalado el telescopio, La Oficina de Proyectos de GTC instalará la unidad de adquisición de datos.

<sup>1</sup> Electronics and Acceptance Control System for the Gran Telescopio Canarias, Rubén Flores, Gerardo Lara, Sadot Arciniega, Beatriz Sánchez, Carlos Espejo, Salvador Cuevas, Vicente Bringas. SPIE Vol. 4837-60, 2002.

Las unidades de control (LCUs) del sistema de control del Instrumento de Verificación (CICS ver Figura 11.2), serán instaladas dentro del gabinete de la electrónica del Instrumento (ver Figura 11.3), con su interfase electrónica. La interfase electrónica es un conjunto de comandos y señales entre las unidades de control del Instrumento así como también los dispositivos electromagnéticos necesarios para la operación del instrumento en conjunto con el sistema completo del telescopio.

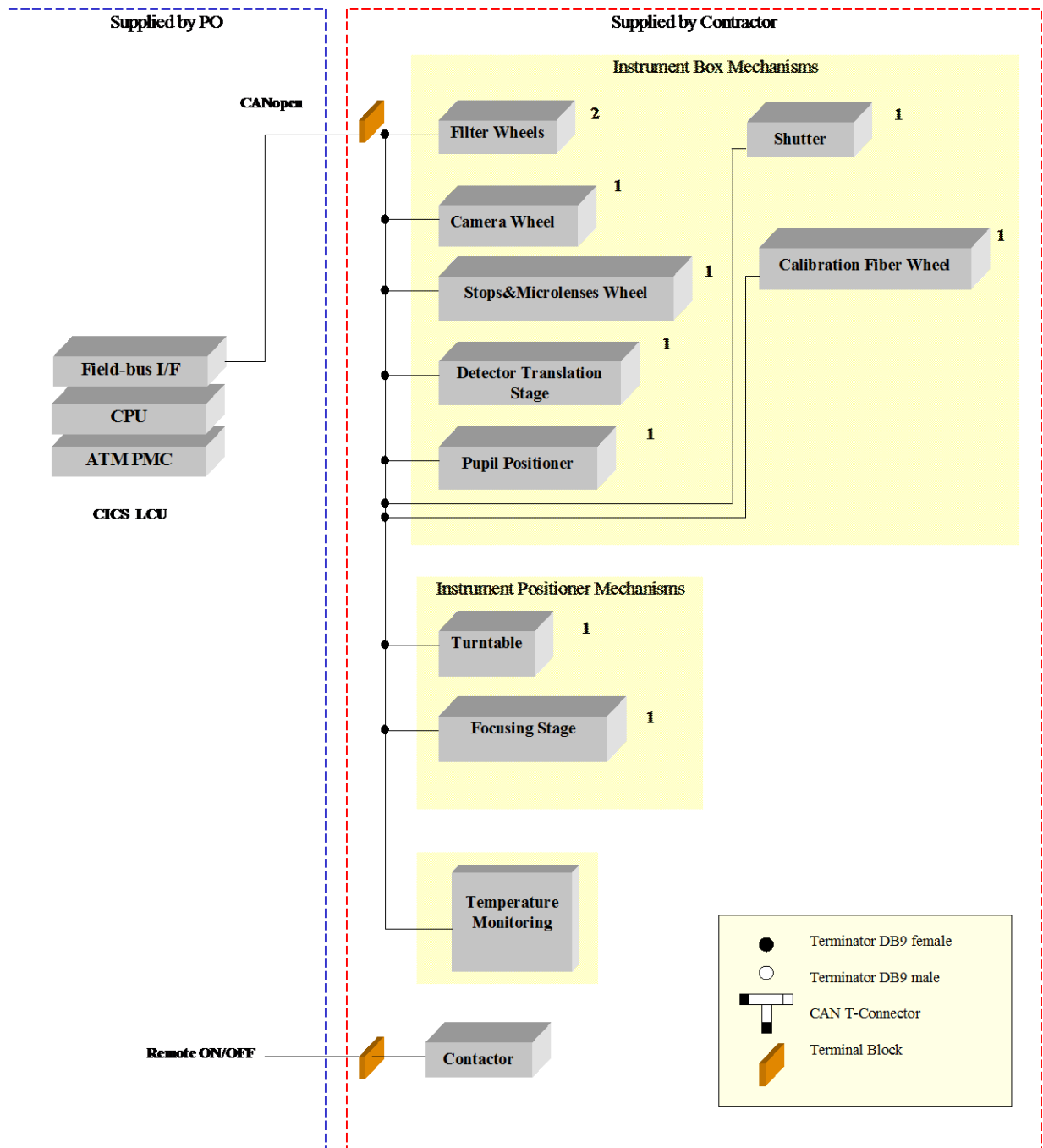


Figura 11.2: Layout de interfase entre las unidades LCUs del sistema de control (CICS)



Figura 11.3: Instrumento de verificación con gabinete de la electrónica instalado

## 11.2 Definiciones

### 11.2.1 Backplane

El backplane es un bus dentro de una computadora en el cual las diferentes tarjetas son conectadas. Existen varios backplane estándar en la industria por ejemplo: VME, PCI, Compact PCI, STD, etc. En el caso del Instrumento será utilizado un VME. El backplane de control VME, es la parte principal de la LCU y conecta las diferentes tarjetas de control. En la Figura 11.4 se muestra el diagrama de conexión del VME con los módulos de CAN y demás componentes de la electrónica.

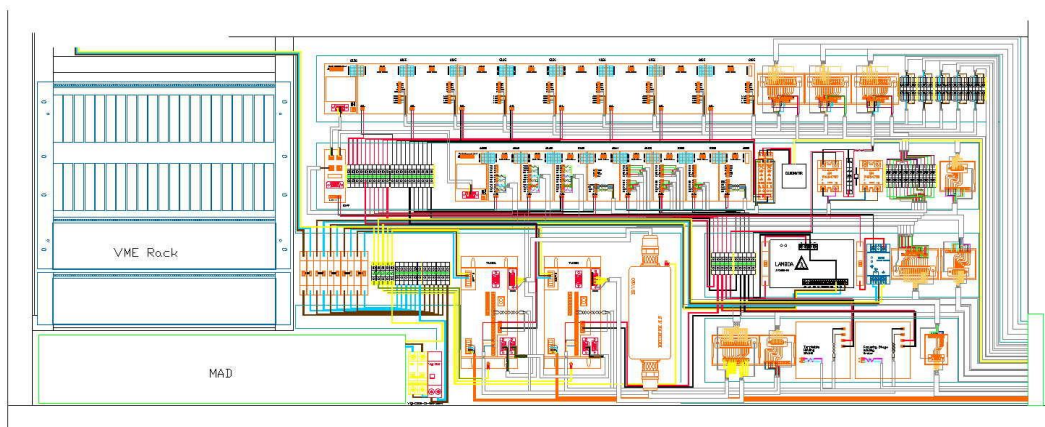


Figura 11.4: Diagrama de conexión del VME con los demás elementos del sistema

### 11.2.2 CAN

El CAN (Controller Area Network)<sup>2</sup> es un sistema de bus serial con capacidades de multi-funciones, esto es, todos los nodos de CAN son capaces de transmitir varios datos, y varios nodos CAN pueden comunicarse con el bus simultáneamente. El bus serial con capacidad de tiempo real, esta sujeto al estándar ISO 11898, En las redes CAN no hay direcciones, suscripciones o estaciones en el sentido convencional, en su lugar, mensajes priorizados son transmitidos. Un transmisor envía un mensaje a todos los nodos CAN (broadcasting), cada nodo decide en base al identificador recibido si debe procesar el mensaje o no. El identificador determina la prioridad en la que el mensaje es transmitido y accedido por el bus.

### 11.2.3 CANopen.

El CANopen es un sistema de red basado en el bus serial CAN (Controller Area Network). El perfil de comunicación del CANopen (CiA DS-301) soporta tanto el acceso directo a los parámetros del dispositivo, como la comunicación de datos en tiempo crítico. Los perfiles de dispositivo CANopen (CiA DS-40x) definen estándares para la funcionalidad básica mientras proveen amplia flexibilidad para características especiales de los dispositivos. CANopen incluye el poder completo del CAN, y permite el intercambio de datos paso a paso entre los nodos en forma organizada y si es necesario en forma determinística. Las funciones de administración de la red especificadas en CAN, simplifican el diseño de proyectos, la implementación y el diagnóstico, proporcionando un mecanismo estándar en el arranque de la red y la administración de los errores.

En el anexo 3 se incluyen algunas de las hojas de datos de los dispositivos utilizados en el diseño del Instrumento de Verificación compatibles con CAN.

### 11.2.4 Perfiles de dispositivos CANopen

El CANopen utiliza un concepto de perfiles de dispositivos, el cual ayuda a la integración de sistemas y la estandarización de dispositivos. Conforme a los lineamientos contenidos en un perfil de dispositivo CANopen (ver Figura 11.5), dos fabricantes independientes uno del otro pueden producir dispositivos estandarizados. Las ventajas de esto son muy numerosas, pero quizá la más importante es que permite al integrador del sistema no tener que depender de un solo fabricante. Esta permite instalar e integrar redes de dispositivos de diferentes fabricantes, sin necesidad de escribir programas diferentes o diseñar software especial. Dichos dispositivos pueden ser módulos I/O digitales ó analógicos, drivers, controladores de movimiento, encoders, o pantallas de despliegue. Un ejemplo es el Perfil de Dispositivos para Drivers y Control de Movimiento (CiA DSP402).

---

<sup>2</sup> Control System for Commissioning Instrument, Rafael de la Calle Andrés, PO, GTC, DCI/CTRL./0041-R,21/10/02.

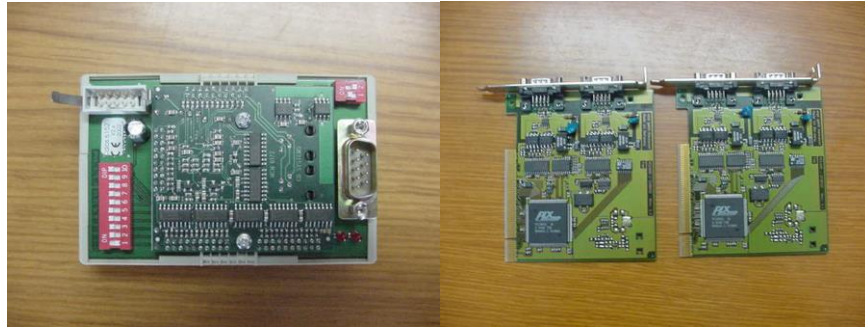


Figura 11.5: Módulo y Tarjetas de control CAN de CD Systems para el Instrumento..

### 11.2.5 Módulos de bloques terminales

Los bloques terminales son módulos de conexión, ya sean pasivos o activos, estos realizan la interfase de señales o la conexión eléctrica. Algunos ejemplos de sus funciones son los siguientes:

- Adaptación física entre los diferentes tipos de conectores
- Adaptación física entre los diferentes tipos de cables
- Aislamiento galvánico para señales analógicas y digitales
- Acondicionamiento de señales de entrada de contacto flotante
- Acondicionamiento de señales de salida de relevadores
- Acondicionamiento de señal de sensores analógicos
- Interfase entre el bus de campo y los sensores y actuadores distribuidos

La Tabla 11.1 muestra el despliegue de los bloques terminales para el control del Instrumento de Verificación.

Name	Type	Electromechanical Devices Control Signal Subset	Terminal Block
CICS LCU	VME	Filter Wheels motion commands	FIELD BUS I/F
		Filter Wheels limit switch signals	FIELD BUS I/F
		Camera Wheel motion commands	FIELD BUS I/F
		Camera Wheel limit switch signals	FIELD BUS I/F
		Stops & Microlens Wheel motion commands	FIELD BUS I/F
		Stops & Microlens Wheel limit switch signals	FIELD BUS I/F
		Shutter commands	FIELD BUS I/F
		Calibration Fiber Wheel motion commands	FIELD BUS I/F
		Pupil Positioner motion commands	FIELD BUS I/F
		Pupil Positioner limit switch signals	FIELD BUS I/F
		Detector Translation Stage motion commands	FIELD BUS I/F
		Detector Translation Stage limit switch signals	FIELD BUS I/F

	Detector Translation Stage linear encoder signals	FIELD BUS I/F
	Turntable motion commands	FIELD BUS I/F
	Turntable limit switch signals	FIELD BUS I/F
	Turntable angular encoder signals	FIELD BUS I/F
	Turntable brake commands	FIELD BUS I/F
	Focusing Stage motion commands	FIELD BUS I/F
	Focusing Stage limit switch signals	FIELD BUS I/F
	Focusing Stage encoder signals	FIELD BUS I/F
	Focusing Stage brake commands	FIELD BUS I/F
	Temperature Sensors signals	FIELD BUS I/F
	CCD controller signals	CI:TB4

*Tabla 11.1: Despliegue de bloques terminales para el Instrumento de Verificación*

### 11.3 Configuración de la unidad de control de mecanismos (CI IMS LCU)

La Tabla 11.2 muestra los diferentes elementos que se utilizarán en la LCU del Instrumento de verificación

Elemento	Model
VME backplane	Wiener
CPU	Motorola MVME2432
Network	Cetia CPMC-ATM-155EMF
Field-bus Interface	ESD CAN4

*Tabla 11.2: Elementos de la unidad de control de mecanismos (CI IMS LCU)*

## 11.4 Dispositivos CANopen

Cada dispositivo de control de posición debe incluir las siguientes etapas.

- Etapa de control (drive del motor): con el fin de comandar los motores de pasos
- Etapa de posicionamiento: con el fin de controlar la posición del motor de pasos
- Interfase con encoder: Con el fin de leer la posición del encoder para no perder pasos
- Interfase I/O: con el fin de conectar el switch referenciado
- Interfase CANopen : con el fin de enviar y recibir mensajes de la LCU

Todos los controladores de posición son conectados vía CAN bus a la LCU. La interfase es un conector macho de 9-pines D-sub las asignaciones se muestran en la Figura 11.6.

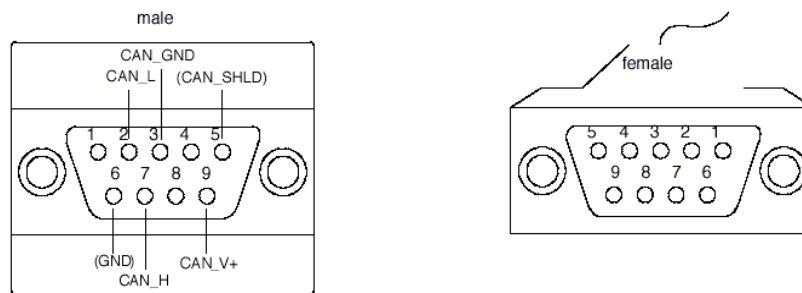


Figura 11.6: Conectores macho y hembra de 9-pines D-sub para el CAN

Los comandos de los controladores de posición son acorde con el estándar de Perfil de Dispositivos para Drivers y Control de Movimiento DSP 402, los comandos usados son:

- Movimiento incremental (relativo a la posición actual)
- Leer posición actual de encoder
- Buscar posición de home (definida por el switch de referencia)
- Habilitar amplificador de drive de motor ( permitiendo pasar la corriente a través de los devanados del motor)
- Deshabilitar amplificador de drive de motor (evitando que la corriente fluya a través de los devanados del motor)
- Sujeción de freno
- Leer entradas digitales
- Movimiento absoluto (relativo al switch de referencia definido por el usuario)

## 11.5 Configuración de control de los elementos del Instrumento

Para describir la configuración del control de los diferentes mecanismos del Instrumento de Verificación tomaremos como ejemplo el conjunto de las ruedas de filtros.

Como ya se describió en el Capítulo 3, el conjunto consta de dos ruedas de filtros a las cuales se proporciona movimiento por medio de un engrane dentado acoplado a un motor Berger Lahr VRDM 266 por rueda, con una posición de home activada por un switch Saia-Burgues V4DT85/3113 en cada una, y otro switch de la misma especificación para



determinar la posición de los filtros acoplado al retentor de la rueda, que la posiciona en el filtro o claro correspondiente (ver Figura 11.7).



Figura 11.7: Conjunto de ruedas de filtros con motores y switches instalados

La Figura 11.8, muestra el lay-out de la interfase de control para las ruedas de filtros y su comunicación con la LCU. La parte de la izquierda es la diseñada y proporcionada por el equipo de trabajo IAUNAM-CIDESI, y la derecha por la Oficina de Proyectos de GTC. Durante las pruebas de aceptación del Instrumento, como ya se mencionó se realizarán con el software de aceptación y la comunicación definitiva después de instalado el Instrumento en el telescopio la realizara el personal de GTC.

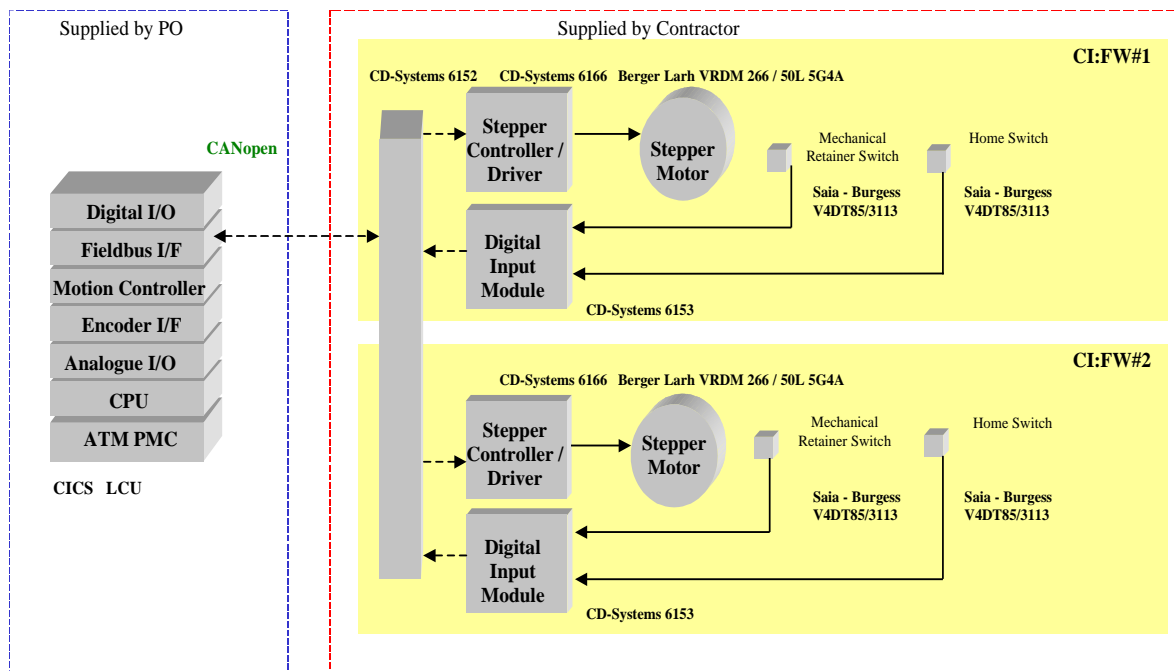
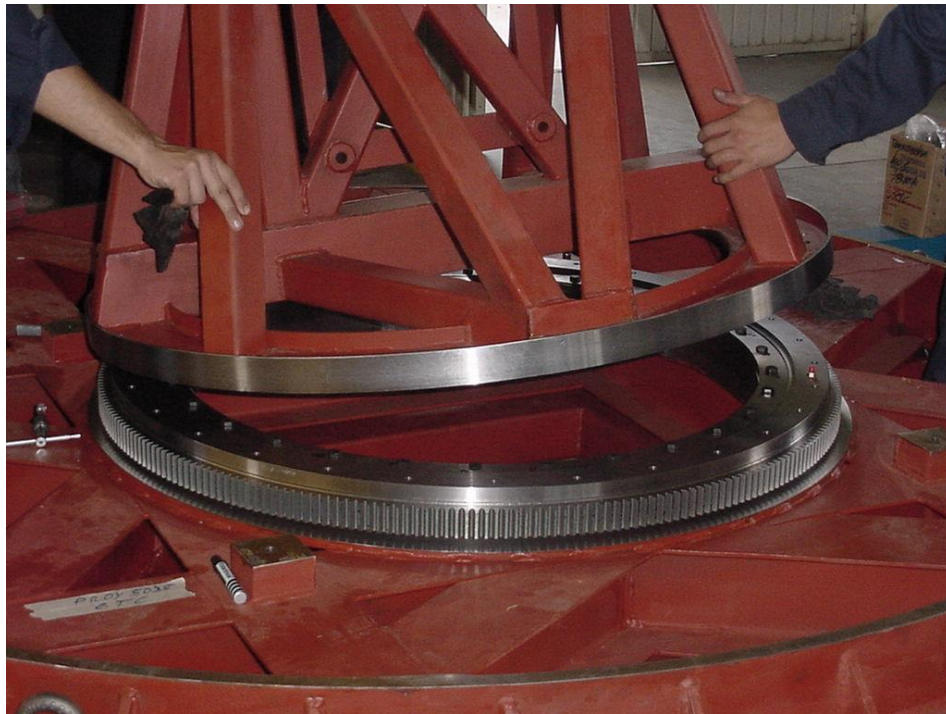


Figura 11.8: Lay- out de interfase con la LCU y los mecanismos de las ruedas de filtros

## ***CAPÍTULO 12: CONSTRUCCIÓN DEL INSTRUMENTO***



## CAPITULO 12: CONSTRUCCIÓN DEL INSTRUMENTO

En este capítulo se hará una breve descripción de la etapa de construcción e integración del Instrumento de verificación. Se describirán la forma en que se realizó el ensamble de la mecánica y optomecánica del Instrumento, así como la alineación y primeras imágenes resultado de las pruebas realizadas con el grupo de óptica del IAUNAM. También se describe el proceso de Gestión del Diseño que al ser aplicado en la planeación inicial del proyecto, condujo a una integración exitosa del instrumento

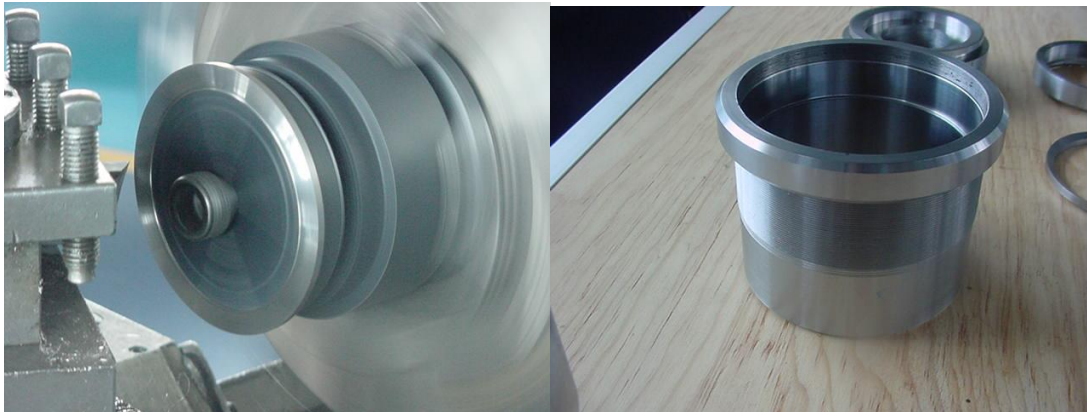
### 12.1 Construcción, ensamble e integración de la mecánica del Instrumento de Verificación.

#### 12.1.1 Construcción de los barriles de cámara y colimador

Tras haber concluido la etapa de construcción y evaluación de las lentes de la cámara y el colimador por parte del IAUNAM, se procedió al ajuste del diseño inicial de los barriles para su construcción final.

Como ya se describió en el Capítulo 8, se calcularon los barriles tomando en consideración las expansiones y contracciones varios materiales, para el diseño final de los mismos. Dicho diseño realizado por un servidor tomando en cuenta la posibilidad de fabricación, dadas las restricciones de nuestros equipos, y las tolerancias requeridas.

Se procedió a fabricar los barriles en CIDESI el torno fresador CNC Hyundai modelo Hit 20M con precisión de  $0,5 \mu\text{m}$  en cilindrado (Figura 12.1)



*Figura 12.1: Construcción de los barriles*

Después de construir los barriles se verificaron sus dimensiones y se procedió al grabado de sus códigos de parte para, su tratamiento superficial para prepararlos para el ensamble final en los bancos de ensamble del IAUNAM (Figura 12.2).

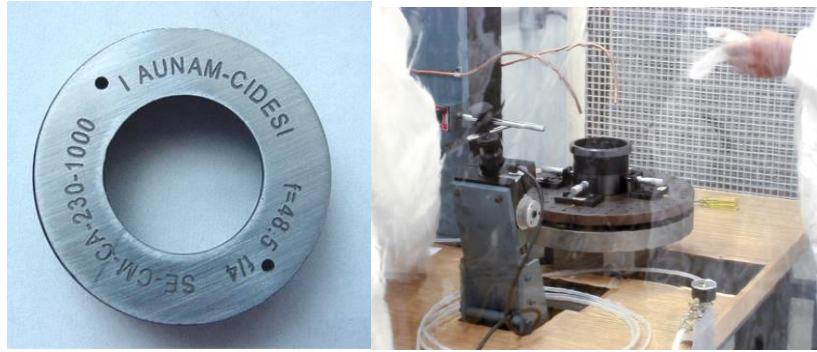


Figura 12.2: Tapa de la cámara grabada y ensamble colimador

### 12.1.2 Ensamble del Posicionador del Instrumento.

El posicionador del instrumento fue maquinado en la compañía Vatech, bajo estricta supervisión de CIDESI, ya que por sus dimensiones y tolerancias, sólo podía ser maquinada por dicha compañía en México. La estructura está construida en acero A36, y fue sometida al proceso de relevado de esfuerzos, por medio de tratamiento en horno. Las soldaduras fueron inspeccionadas por radiografía.

Una vez construida, fue ensamblada con el rodamiento de la mesa giratoria colocado entre la estructura principal y la de soporte (Figura 12.3).



Figura 12.3: Colocación de rodamiento sobre estructura principal (izq) y colocación de estructura de soporte (der)

Una vez concluido el proceso se preparó la estructura de transporte y pruebas para poder colocar el conjunto del posicionador del instrumento sobre la misma (Figura 12.4).



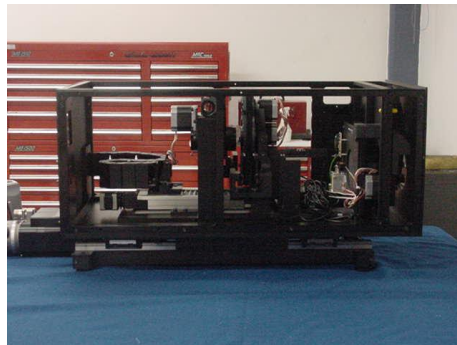
Figura 12.4: Preparación de la estructura de transporte y pruebas

Una vez pintado y terminado, el posicionador del instrumento, se colocó en la estructura con la ayuda del columpio de montaje especialmente diseñado para su montaje en la plataforma Nasmyth del Telescopio (Figura 12.5)



*Figura 12.5: Montaje del posicionador en la estructura de transporte y pruebas con el columpio*

La caja del instrumento fue construida en su totalidad en CIDESI e integrada con la óptica construida por el IAUNAM (Figura 12.6). Una vez, alineada y verificada como se describió en el capítulo 3, se colocan las cubiertas de protección de la misma.



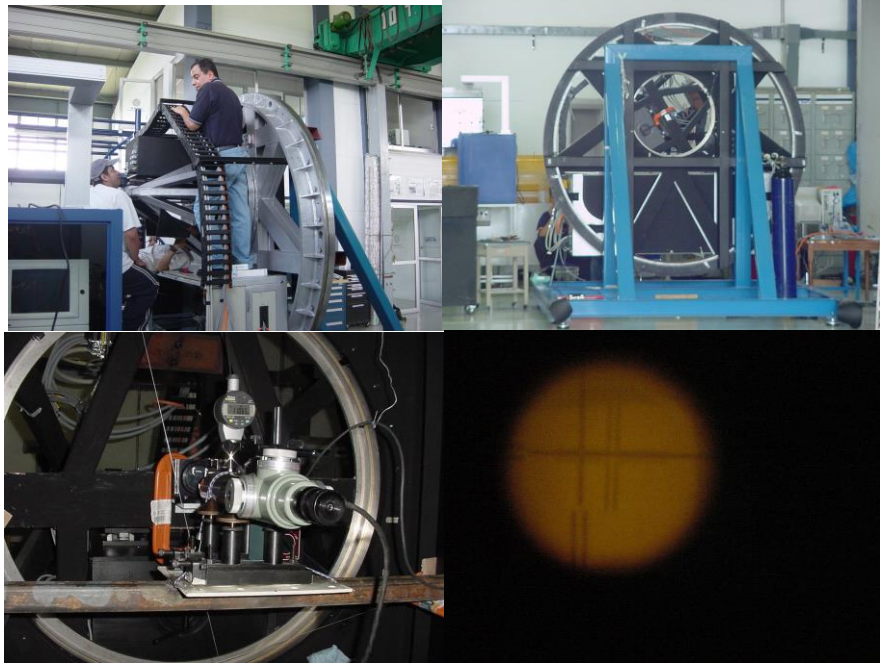
*Figura 12.6: Caja del instrumento alineada y terminada lista para ser cubierta y montada*

Se montó la caja del instrumento sobre el posicionador del instrumento (Figura 12.7) por medio de eslingas. La caja del instrumento y el posicionador del instrumento tienen diseño modular, lo que permite el desmontaje y montaje de la misma sin perder la alineación con el eje óptico del telescopio.



*Figura 12.7: Montaje de la caja del instrumento*

Una vez, concluido el montaje se alineó la caja del instrumento con el posicionador (Figura 12.8) apuntando al eje óptico del telescopio utilizando entre otros métodos un telescopio de alineación.



*Figura 12.8: Alineación de la caja del instrumento*

Una vez listo el instrumento se procedió a las pruebas funcionales y de control de los mecanismos (Figura 12.9), tanto de la mesa giratoria como de los componentes internos de la caja del instrumento.



*Figura 12.9: Pruebas de control de Instrumento de verificación.*

Durante el mes de septiembre la gente del GTC incluido el responsable científico del instrumento Nicholas Devaney, (Figuras 12.10 y 12.11) realizaron las pruebas de aceptación del instrumento en CIDESI, con el fin de verificar el rendimiento del instrumento así como el cumplimiento de especificaciones. Las pruebas fueron satisfactorias restando así sólo el transporte del instrumento y la entrega en sitio en la Isla de la Palma en Canarias.

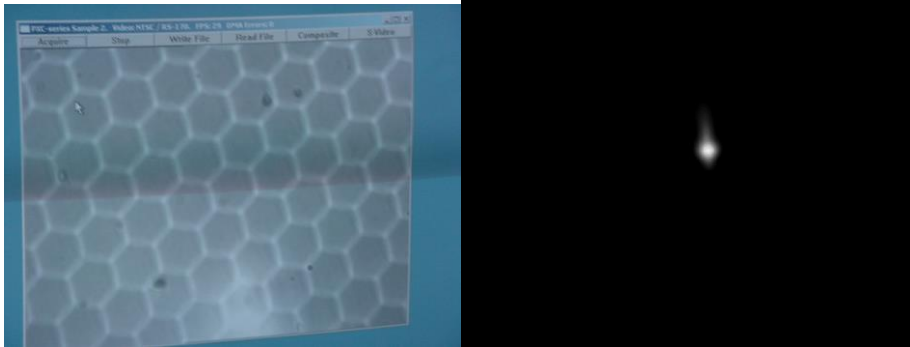


Figura 12.10: Imágenes tomadas durante las pruebas de aceptación del instrumento.



Figura 12 11: Personal de GTC durante las pruebas de aceptación del instrumento.

## 12.2 Validación del proceso del diseño en la construcción

La principal experiencia adquirida construcción del Instrumento de Verificación para el GTC, es la validación del diseño durante la fabricación e integración del mismo. Lo anterior debido al estricto proceso de “Gestión del Diseño”. Dicho proceso descrito a continuación, surge además, de la experiencia de un servidor durante el desarrollo de proyectos a cargo de la Dirección de Líneas de Proceso en CIDESI. Revisando literatura, no existe una metodología total integrada basada en la experiencia de la generación de Desarrollo Tecnológico en centros como el CIDESI, y en particular en México.

Este planteamiento de “Gestión del Diseño” está siendo aplicado por un servidor en la Dirección de Líneas de Proceso con buenos resultados, aunque resta mucho trabajo por hacer. A continuación se describe dicha metodología.

## 12.3 El proceso de diseño en el Instrumento de Verificación.

### 12.3.1 Enfoque tradicional del diseño.

El enfoque del tradicional del diseño en México, es el de que personal técnico altamente capacitado, es suficiente para lograr diseños exitosos. Lo anterior, en la actualidad, es totalmente falso. El enfoque actual del diseño, es el de un complejo conjunto de actividades. Estas van desde la el entendimiento de los requerimientos del diseño, la planeación, y el control de todas las etapas que conducen al producto final, así como su rendimiento, mantenimiento y fiabilidad durante su vida útil.

Este enfoque lleva a la conclusión de que el diseño de equipos y sistemas, para la continua operación bajo las estrictas condiciones de producción de las empresas modernas, o instrumentos de alto rendimiento como El Instrumento de Verificación para el GTC; es un proceso de gestión y administración, de un conjunto de etapas, cuidadosamente planeadas.

### 12.3.2 Gestión del diseño

A continuación se describirá, la forma de planear y ejecutar dicho proceso de gestión del diseño.

### 12.3.3 Entendiendo el diseño

Esta etapa es la etapa de entrada “crucial” para el inicio de un buen proceso de gestión del diseño. Durante ésta, se determinan las variables de entrada que definen las características principales de rendimiento del equipo. Pueden ser definidas como Lineamientos de Trabajo SOW (Statement of Work) y Especificaciones, como en el caso del Instrumento de Verificación, o por “Cuadernos de Carga” o Especificaciones de Suministro de Equipos, para la industria Automotriz o de Autopartes.

En el caso de no existir la Tabla 12.1 muestra los requerimientos mínimos necesarios a considerar para llevar a cabo una buena recopilación de especificaciones para el entendimiento del diseño.

REQUERIMIENTOS	DESCRIPCION
1.- Función u objetivo	Es una descripción del funcionamiento o requerimiento principal del equipo el cual debe plantearse en la forma más clara posible de forma que cualquier miembro del equipo de trabajo pueda entender.
2.- Requerimientos funcionales detallados	Es una descripción de los requerimientos funcionales detallados, enumerados, considerando todas las etapas del proceso de operación las cuales describen entre otras: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Operaciones paso a paso</li> <li>- Tiempos de cada ciclo del proceso</li> <li>- Resoluciones</li> <li>- Repetibilidad y reproducibilidad (para el caso de equipo de medición)</li> <li>- Posicionamientos</li> <li>- Carga y descarga (para el caso de equipo de proceso)</li> <li>- Calidad y restricciones del producto a procesar (para caso de equipo de</li> </ul>



CAPITULO 12: CONSTRUCCIÓN DEL INSTRUMENTO

	<p>proceso)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de subdivisiones o módulos requeridos y sus interfases detalladas</li> <li>- Cantidad de números de parte (modelos diferentes) a ensamblar (caso de equipo de proceso)</li> <li>- Tiempos de cambio de modelo (caso de equipo de proceso)</li> <li>- Escalamientos posteriores o requerimientos de reconversión</li> <li>- Componentes de especificación estándar del usuario final</li> <li>- Aceleraciones</li> <li>- Altas velocidades</li> <li>- Impactos</li> <li>- Fatiga</li> <li>- Alta carga</li> </ul>
3.- Restricciones de operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suministros (Energía eléctrica, aire, agua, gases especiales, etc.)</li> <li>- Procedimientos de operación (carga, descarga, proceso, nivel de automatización)</li> <li>- Capacidad y habilidad del equipo (caso de equipo de proceso)</li> <li>- Manteneabilidad</li> <li>- Confiabilidad</li> <li>- Seguridad</li> <li>- Usabilidad</li> <li>- Disponibilidad</li> <li>- Restricciones de operación adicionales o particulares del usuario final</li> <li>- Dispositivos a prueba de tontos Poka-Yoques (caso de equipo de proceso)</li> <li>- Cambios rápidos de herramientas (caso de equipo de proceso)</li> <li>- Restricciones de tiempo de paro en caso de falla</li> <li>- Durabilidad esperada</li> <li>- Tiempos de operación continua</li> <li>- Partes de desgaste y refaccionamiento requerido</li> </ul>
4.- Medio ambiente de operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura ambiente de operación</li> <li>- Presión atmosférica (muy importante en equipo de medición o con manejo de flujo o presión de gases)</li> <li>- Partículas suspendidas de polvos, arenas u otros abrasivos</li> <li>- Humedad</li> <li>- Clima (en el caso de equipo exterior)</li> <li>- Contaminantes y corrosivos</li> <li>- Aceleración, impacto y fatiga (en el caso de ser un subcomponente de otro sistema)</li> <li>- Limitaciones de espacio e instalación</li> <li>- Habilidad de los operadores</li> <li>- Efectos a otros sistemas y de otros sistemas</li> <li>- Vibración</li> <li>- Ruido (dB)</li> <li>- Interferencias eléctricas y electromagnéticas</li> <li>- Emisiones</li> <li>- Otras posibles fuentes de perturbación</li> </ul>
5.- Restricciones de Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procesos de fabricación disponibles</li> <li>- Instalaciones disponibles</li> <li>- Limitaciones en costos de fabricación</li> <li>- Mano de obra disponible</li> <li>- Programa de suministros</li> <li>- Número de equipos requeridos (cantidad a producir)</li> <li>- Logística de transporte</li> <li>- Otras restricciones de fabricación</li> </ul>

6.- Otras restricciones	- Regulaciones de gobierno aplicables - Requerimientos legales (patentes, derechos, confidencialidad, etc) - Estándares internacionales y locales aplicables - Litigios
7.- Soporte post-venta	- Garantía , servicio y sus costos - Refaccionamiento, logística y sus costos - Capacitación al usuario y las cuadrillas de servicio

*Tabla 12.1: Requerimientos para el entendimiento del diseño*

De la tabla anterior puede fácilmente distinguirse que por el gran número de requerimientos a involucrar durante la generación del concepto del diseño y la posterior construcción, liberación y soporte post-venta. Por ello la necesidad de un sistema eficiente de gestión y administración del proceso es requerido. Todo ello implica un profundo conocimiento y un despliegue de acciones interdepartamentales dentro de una organización, para el soporte de dicho proceso.

#### **12.3.4 Preparación de la propuesta de ejecución del proyecto.**

Una vez considerados todos los puntos del apartado anterior, deben ser claramente planteados en una propuesta escrita, la cual cubra todas las posibles fuentes de desviación. Lo anterior es sumamente importante ya que de ella depende tanto la obtención del contrato, como los resultados económicos esperados por ambas partes. Para una propuesta exitosa, además de la información anterior, para el entendimiento del diseño, deben considerarse los siguientes puntos importantes:

- **Un bosquejo de solución o pre-concepto, lo más claro posible:** Este debe estar acompañado de bosquejos, aunque es una inversión preliminar alta, cuando posteriormente se va adquiriendo experiencia, y bases de datos de diseño confiables, minimiza la inversión. En el caso de proyectos altamente complejos y novedosos, como el Instrumento de Verificación, esta etapa es de alto riesgo, sobre todo si no se identifican adecuadamente los puntos de alta complejidad.
- **Determinación de los sub-sistemas complejos y de alto riesgo:** Esto se refiere a la distinción de los posibles problemas en sub-sistemas, en cuanto a diseño, construcción y suministro. Esto es los que nunca han sido desarrollados por el equipo de trabajo, y pudiesen ser fuentes de riesgo, por su complejidad, reto tecnológico, o que no existen experiencias previas. Estos son por ejemplo, tolerancias extremas, condiciones extremas de operación, altas resoluciones de indexado, posicionamiento, o repetibilidad. Otra posible fuente de riesgo son componentes de difícil adquisición o de proveedores únicos, con tiempos de entrega largos o fabricaciones especiales. La desviación máxima de incertidumbre debe ser del 20 al 30% de los sub-sistemas del proyecto. Si los riesgos están identificados se puede prever en la planeación del proyecto las posibles soluciones, y el tiempo en el que deban ser atacados, para evitar retrasos por situaciones sorpresivas. Si éstas fuentes de riesgo no son identificadas lo más certeramente posible, por experiencia los problemas durante el proyecto son graves y conducen a fuertes

demandas, pérdidas económicas y desgaste del equipo de trabajo. Cuando estos “retos tecnológicos” son identificados, se determina la inversión y la futura ventaja tecnológica del grupo de trabajo con respecto al mercado.

- **Uso de bases de datos de soluciones estandarizadas:** Las bases de datos producto de la estandarización de los diseños, tienen una alta ventaja, en cuanto a costos y tiempos de realización, conduciendo a un buen beneficio económico, y permitiendo dedicar el mayor tiempo de diseño a los sub-sistemas de alto complejos de alto riesgo. La experiencia ha demostrado que una gran parte de un proyecto o equipo por diferente que éste sea de otros tiene, componentes que puede compartir con diseños previos. Es un error común pensar que nuestro diseño es “único e irreplicable”, y conduce a que el diseñador quiera inventar todo pensando que no existe o por el mal entendido “ahorro de dinero”. Ejemplos de estandarización para diferentes equipos son: estructuras, elementos mecánicos como bujes, correderas, guías, rodamientos, etc; elementos de traslación, indexación, actuadores, cabezales, husillos, gabinetes de control, entre otros. Como se mencionó con anterioridad tener el costo y el tiempo de realización, de los componentes estándar, limita a sumarlos y sólo quedan como fuentes de desviación en costo y tiempo, los sub-sistemas complejos. Esto también como ya se dijo, hace que el retraso en tiempos de entrega y pérdidas económicas se disminuyan.
- **Definición clara de los requisitos y limitaciones legales contractuales:** Debe plantearse la propuesta con las respectivas consideraciones legales de inclusiones y exclusiones, garantías penalizaciones, derechos de propiedad, confidencialidad, seguros y fianzas etc. La experiencia ha demostrado que el contar con estas consideraciones bien delimitadas, evita problemas o pérdidas a ambas partes, ya que el contrato es la referencia legal de protección de los compromisos adquiridos, y genera relaciones de cliente – proveedor largas y de confianza.
- **Determinación clara de tiempos y costos:** Una vez consideradas todas las anteriores es más fácil la determinación del plazo de entrega y el costo total. Esto debido a que se tienen consideradas todas las posibles fuentes de desviación, su costo y estrategias de solución. Recordando que esto es un previo sujeto a negociación y aceptación. El contar con ello facilita ese proceso de negociación, ya que se evita comprometerse a problemas sin solución o con solución de alto costo. El entendimiento del problema hace que el cliente esté dispuesto a pagar o dar el tiempo suficiente de realización, ya que hay que recordar que él tiene una necesidad, pero no tiene idea en la mayoría de las ocasiones, de que la satisfacción de dicha necesidad es costosa y difícil de realizar.

### 12.3.5 Planeación del proyecto.

Una vez que el proyecto es aceptado se debe proceder nuevamente a verificar la planeación del proyecto, recordando que la planeación presentada durante el proceso de negociación es preliminar y aproximada. La planeación debe estar acompañada de los métodos de verificación y control de las etapas del proceso, y de las características a comprobar, en los hitos de inspección y revisión determinados. La Tabla 12.2 muestra un despliegue propuesto por la experiencia adquirida con el Instrumento de Verificación, y los proyectos

realizados para industria Automotriz y de Autopartes la cual debe ser plasmada en el cronograma de seguimiento y control del proyecto.

ETAPA DEL PROCESO	DATOS O REQUERIMIENTOS DE ENTRADA	METODO DE VERIFICACION ENTRADA SALIDA (de acuerdo a la complejidad del proyecto)
Diseño conceptual	Datos resultado del entendimiento del diseño entre otros: -Cuaderno de especificaciones de diseño -Bases de datos de diseño -Normas y regulaciones	- Listas de verificación (checklist) de diseño - Arbol de desglose de sub-sistemas (Brakedown Structure) - Descripción funcional por sub-sistema - Identificación de sub-sistemas críticos - Diagramas de correlación de sub-sistemas - Matrices de decisión - Interfases de control - Interfases hombre-máquina - Reportes de cálculo
Revisión de Avance de Diseño (ADR)	Documentación producto de diseño conceptual con listas y reportes. Esta verificación debe hacerse con el cliente.	- Reporte de cambios de diseño - Lista de liberación de sub-sistemas - Resumen de acuerdos
Diseño Definitivo	- Resumen de acuerdos del ADR - Reporte de cambios de diseño	- Lay out de diseño definitivo en modelo de CAD - Reporte de cálculos definitivos - Lista de componentes y partes comerciales - Resumen de interfases mecánicas - Diagramas de control definitivos y bosquejo de programación - Análisis RAMS o FMCEA - Resumen para inicio de manuales de usuario y servicio
Diseño de detalle	- Información de reportes de diseño definitivo	- Lay out final del equipo o línea - Planos de detalle - Planos de ensamble - Listas de partes - Análisis RAMS o FMCEA definitivo - Lay out de control definitivo y lista de partes - Programa de control detallado y documentado - Lista final de verificación del diseño - Listas de inspección de fabricación y ensamble - Instrucciones especiales de taller - Descripción preliminar de pruebas de aceptación y liberación. - Documento de reportes de cálculo - Instrucciones detalladas de servicio y operación para manual de usuario y servicio. - Diagramas neumáticos hidráulicos de transferencia etc.
Revisión de	Información de reportes de diseño de	- Documento de liberación a fabricación

CAPITULO 12: CONSTRUCCIÓN DEL INSTRUMENTO

Diseño Crítico CDR	detalle Esta verificación debe hacerse con el cliente	- Documento de liberación de pruebas de aceptación
Fabricación y suministros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planos de detalle</li> <li>- Planos de ensamble</li> <li>- Listas de partes de compra</li> <li>- Listas de inspección y liberación de componentes y partes</li> <li>- Información para pruebas de materiales, e inspecciones espaciales</li> <li>- Pruebas especiales de sub-ensambles de acuerdo a RAMS</li> <li>- Hojas de control de productos no conformes</li> <li>- Áreas de almacén de productos y partes en espera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Partes liberadas con certificados de inspección</li> <li>- Reporte de pruebas espaciales</li> <li>- Resúmenes de acciones correctivas y preventivas realizadas</li> <li>- Lista de acciones e instrucciones finales de ensamble e integración</li> <li>- Programa de control definitivo</li> <li>- Reportes de avance de manufactura y costos generados</li> </ul>
Ensamble e integración	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instrucciones de ensamble</li> <li>- Listas de partes</li> <li>- Diagramas de ensamble</li> <li>- Diagramas de cableado y control</li> <li>- Diagramas de integración neumática, hidráulica etc.</li> <li>- Instrucciones especiales de seguridad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reportes de inspección de ensamble</li> <li>- Lista de verificación de ensamble con cumplimiento de especificaciones.</li> <li>- Resultados de pruebas parciales de sub-sistemas.</li> <li>- Reporte de acciones correctivas y preventivas durante ensamble.</li> </ul>
Pruebas preliminares	- Información de reportes de ensamble	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informe de resultados de pruebas preliminares</li> <li>- Resumen de acciones preventivas y correctivas durante pruebas</li> <li>- Informe de cumplimiento definitivo de especificaciones.</li> </ul>
Liberación en planta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Información de pruebas preliminares</li> <li>- Reporte de cumplimiento de especificaciones</li> <li>- Documentación total del proyecto entregable de acuerdo a contrato</li> <li>- Manuales de mantenimiento y usuario</li> <li>- Plan de pruebas de liberación con lista de verificación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lista de verificación de especificaciones autorizada</li> <li>- Acta de aceptación</li> <li>- Entrega de condiciones de garantía</li> </ul>
Integración en sitio o liberación en planta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Actas de pruebas de liberación en planta</li> <li>- Hojas de integración y puesta en marcha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acta de liberación de satisfacción final</li> <li>- Firma de aceptación de garantía</li> <li>- Entrega de documentación final de acuerdo a contrato</li> </ul>

Tabla 12.2 Hoja de requerimientos para la planeación de proyecto

### **12.3.6 Verificación y generación de bases de datos.**

Una vez determinado todo lo anterior, se deben definir los medios y formas de almacenamiento y administración de los resultados de las verificaciones parciales y finales del proyecto.

La generación de bases de datos con costos, memorias de diseño, y demás productos del proyecto estructuradas para una fácil consulta, se convierten en el patrimonio de los Centros. Dichas bases de datos son referencia para futuros proyectos y conducen como resultado a un mejor aprovechamiento de los recursos enfocados al desarrollo tecnológico.

Como ya se mencionó la utilización de este concepto en la planeación inicial del proyecto del Diseño y Construcción del Instrumento de Verificación, dio un excelente resultado. Durante las etapas posteriores de fabricación e integración, los componentes fabricados por distintos proveedores tanto nacionales como extranjeros, fueron integrados exitosamente cumpliendo especificaciones. Por otra parte las verificaciones continuas, y la determinación de los posibles puntos críticos, llevo en su momento a que los problemas técnicos y logísticos fuesen solucionados con prontitud.

## ***CAPÍTULO 13: CONCLUSIONES***



## CAPITULO 13: CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del Proyecto “Análisis del Cumplimiento de Especificaciones en el Diseño del Instrumento de Verificación para el Gran Telescopio Canarias”, se pudo constatar la utilidad de las herramientas adquiridas durante los estudios de Maestría.

Entre éstas herramientas se pueden destacar las siguientes:

- El análisis de Elementos Finitos.
- El concepto estadístico como herramienta de modelado y verificación de la confiabilidad de los elementos.
- El concepto de la mecánica avanzada, para el diseño de barriles de lentes contemplando el comportamiento térmico de los materiales durante su vida funcional.
- La instrumentación y cuidado durante los procesos de medición y verificación de las especificaciones del diseño.
- El concepto dinámico e importancia de las frecuencias naturales de la estructura que aunado a las deformaciones gravitatorias, residuales y térmicas, modifican la posición relativa de las coordenadas del eje óptico del Instrumento, durante las variaciones térmicas y de posición del instrumento en operación.

Lo anterior siempre recordando, que el Instrumento es una herramienta de medición y verificación de calidad del telescopio. Esto implica que el concepto de repetibilidad e incertidumbre como se describió en el Capítulo 5 “Diseño Mecánico, presupuestos de error y pruebas en el sistema mecánico” tome gran importancia. En los estudios formales de Licenciatura en Ingeniería en México, esto no se le da la importancia requerida. Sin embargo, su utilidad es tal que en los estudios de Maestría en el PICYT toma una gran importancia la materia de Instrumentación y Procesos de Medición, que trata acerca de estos conceptos tan importantes.

Por otra parte una de las experiencias más importantes adquiridas durante el desarrollo del proyecto, es la necesidad de una planeación, y desarrollo de procedimientos estrictos de verificación y control. Esto ya que como se menciona en el Capítulo 12 “Construcción del Instrumento”, el éxito en la integración y pruebas del Instrumento radica en ello. El estricto control de las etapas de desarrollo y la verificación de su cumplimiento, garantiza el éxito al término del proyecto. Es importante destacar que esta planeación y control de proyectos, se está implantando en la Unidad de Mecatrónica División Líneas de Proceso en CIDESI con mucho éxito, y también es resultado de las experiencias derivadas del proyecto.

Es importante destacar que la mejora continua y la actualización constante del nivel educativo y de capacitación de los grupos de trabajo es una herramienta muy poderosa en el trabajo del Desarrollo Tecnológico, el cual por su naturaleza implica cambios constantes del entorno tecnológico.

Entre las aportaciones más importantes de este trabajo es la de el estudio RAMS, descrito en el Capítulo 10 “Determinación de la fiabilidad del instrumento”. Vale la pena mencionar que este estudio es la primera ocasión que se realiza en México a un Instrumento astronómico, y también la primera vez que se realiza en IAUNAM y CIDESI.



Este estudio requirió de una investigación, documentación y recopilación exhaustivas realizadas por un servidor, para el diseño del estudio en la forma más adecuada para que cumpliera con las expectativas del grupo de Canarias. Este tipo de estudio sólo se realiza por agencias espaciales, aeronáuticas y militares tanto en Estados Unidos como en Europa. Ahora el grupo del IAUNAM y del CIDESI cuenta con una herramienta poderosa para la evaluación de la fiabilidad de máquinas e instrumentos. Lo cual a su vez es una buena fuente de ingresos ya que este estudio significó un ingreso de \$400, 000.00 pesos. Costo cobrado por el mismo a GTC.

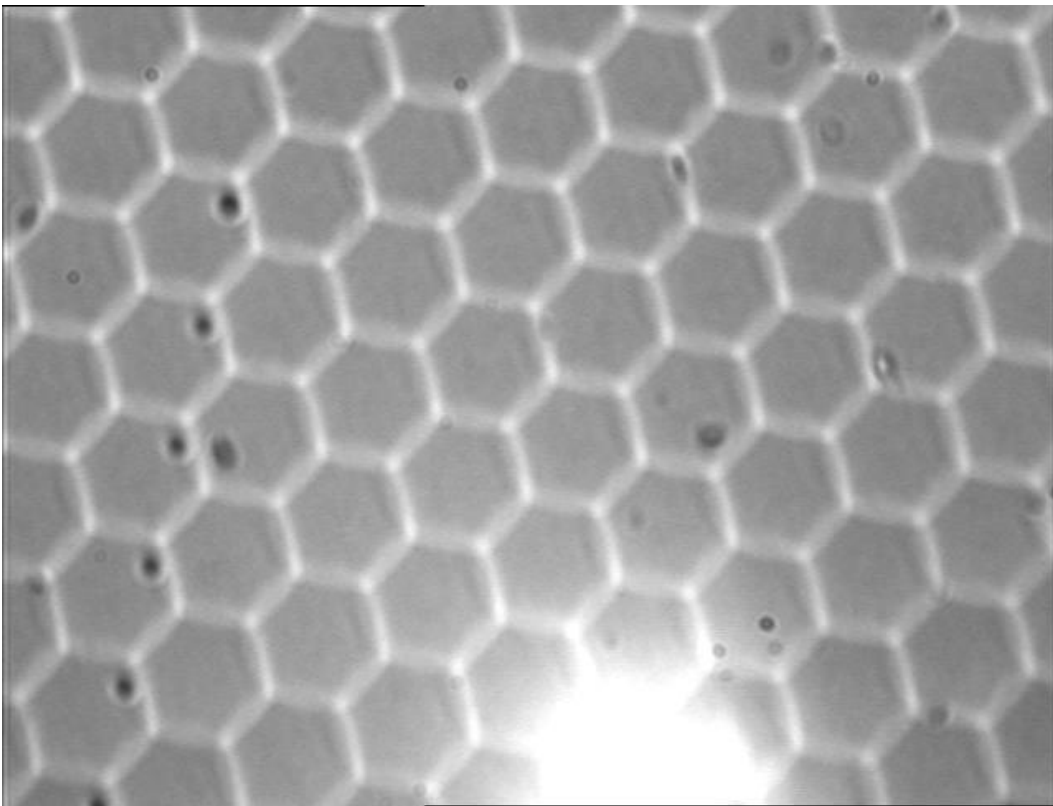
Otra aportación importante fue el diseño de los barriles de la cámara y el colimador, los cuales son de los primeros en su tipo que México exporta a un telescopio extranjero. Este diseño requirió de cuidadosos análisis de diseño y métodos de fabricación, con el fin de que cumplieran con los requerimientos tan estrictos solicitados por GTC. Dicho diseño es brevemente descrito en el Capítulo 8 “Diseño de los barriles del colimador y la cámara”.

Una cosa que vale la pena comentar es la gran experiencia que significa ver una ecuación teórica, convertida en una aplicación en un instrumento para un gran telescopio, como lo es la ecuación de curvatura del Capítulo 6 “Óptica astronómica”. Esta ecuación y sistema de medición derivado de ella es la primera ocasión que se probará en un telescopio real segmentado de gran tamaño. Y significa una aportación importante a la astronomía internacional.

Por último es un orgullo el que éste sea el primer instrumento para un gran telescopio, exportado por México a Europa. Lo que significa que la ingeniería y la ciencia mexicana se encuentran en posibilidades de competir con el extranjero, ya que como se mencionó al inicio de éste trabajo, se compitió con empresas europeas de primer nivel para la obtención del contrato.

Espero que este trabajo sea de utilidad para aquellos involucrados en el Desarrollo Tecnológico, como lo fue para los miembros del equipo IAUNAM- CIDESI, grupo, para el cual éste proyecto significó una revolución en el concepto de cómo deben planearse y ejecutarse los proyectos de alto nivel.

*ANEXO 1*



## ANEXO 1

---

**ROTEK FINAL INSPECTION REPORT**


---

19-Apr-02

Model Number

R839E1

Assembly Serial Number

MI58470-1F

ORDER	Inspection Requirement	Measured Value
1	REVISION LEVEL 0	0
2	REVISION DATE 1/2/02	1/2/02
3	INSPECTED BY	F9
4	INSPECTION DATE	04/18/02
5	ASSEMBLY HEIGHT 2.87"	2.867
6	OUTER HEIGHT 2.52"	2.523
7	OUTER O.D. 44.232"/44.252"	44.232
8	OUTER PILOT 42.678" +.000"/-.0035"	42.678
9	OUTER PILOT RUNOUT .0008"	.0004
10	OUTER MTG. FACE RUNOUT .0008"	.0003
11	OUTER GEAR 44.2348"/44.2135" (.250" BALLS)	44.228
12	OUTER BOLT CIRCLE 41.181"	41.176
13	OUTER (30) HOLES TAPPED M10 X 1.5	FTG 5113
14	OUTER (30) HOLES TAPPED .79" DEEP	.79
15	OUTER GREASE HOLES SPACED AS SHOWN	OK
16	INNER HEIGHT 2.52"	2.522
17	INNER I.D. 34.567" +.0035"/-.0000" (2 PLACES)	34.567/34.567
18	INNER PILOT 34.6216"/34.6224"	34.6216
19	INNER PILOT RUNOUT .0008"	.0002
20	INNER MTG. FACE FLATNESS .0008"	.0005
21	INNER PILOT WIDTH .5197"/.5236"	.520
22	INNER BOLT CIRCLE 35.984"	35.978
23	INNER (30) HOLES .453" THRU	.454
24	STAMPING	OK

RELEASED BY           F10          

1

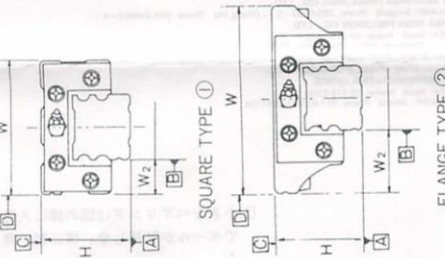
Figura A1.1 Certificado del rodamiento de la mesa giratoria

リニアガイド  
Linear Guides  
検査成績証  
INSPECTION DATA

**NSK**

和文

標準取付状態略図  
Standard Installation



検査年月日  
DATE: '02/06/27

NSK 名番  
REF. NO. LS250684FLC2K01P53

製品番号  
SERIAL NO. Rail NO. I 26-001KL

Rail NO. II 26-002

All dimensions are within specifications.

検査員  
Inspector J. Yamahata

精度等級  
Accuracy Class: P5 TYPE NO. ②

Units:  $\mu\text{m}$

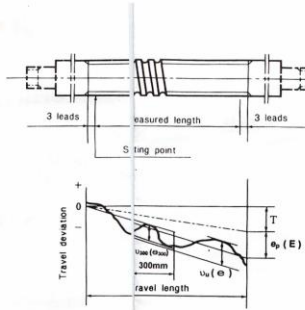
検査項目 Inspection items	許容値 Permissible Value	Measured result					
		Rail NO. I (Reference Side) Ball Slide NO.		Rail NO. II (Adjust. Side) Ball Slide NO.			
		1	2	3	1	2	3
組立高さH Mounting height H	$\pm 20$	11	12	12	15	17	
組立高さHの相互差 Variation of mounting height H	7			6			
溝方向寸法W2 Lateral Width W2	$\pm 25$	-4		-6			
溝方向寸法W2の相互差 Variation of lateral width W2	10			2			
A面に対するC面の平行度 Running parallelism face A to C	8.0/ 684mm			1.6		2.4	2.4
B面に対するD面の平行度 Running parallelism face B to D	8.0/ 684mm			1.6		4.3	4.3
ベアリング圧あてりの静摩擦力 Friction force / bearing	MIN 3.4 MAX 7.8 N			4.2 4.8		4.2 4.7	4.3 4.9

NSK Ltd. TOKYO, JAPAN

Figura A1.2 Certificado de guías lineales de platina de enfoque

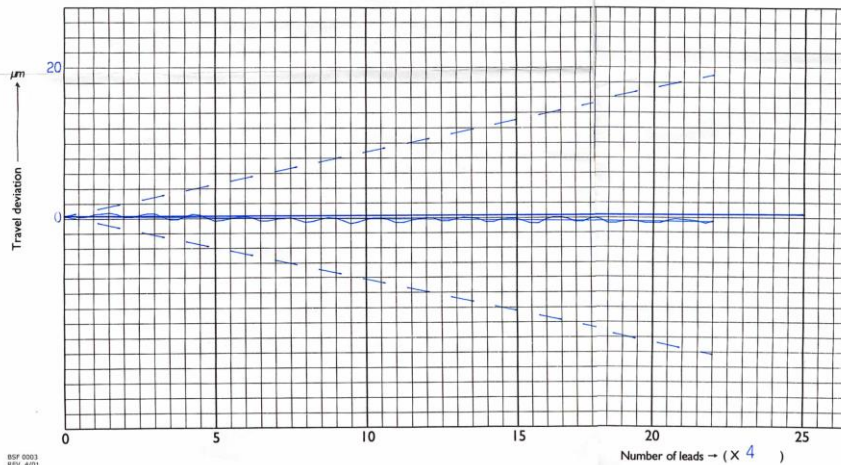
**NSK**  
BALL SCREW INSPECTION DATA

NSK BALL SCREW NO. W1601WF-21DJY-C5Z2  
CUSTOMER PART NO.  
SERIAL NO. 02F5-0001  
SHAFT NO. F5-1



Nominal lead:	: $l$	2.0000	mm
Specified travel deviation for compensation	: T	0.0	$\mu\text{m}$
	Permissible Value	Measured Result	
Mean Travel Deviation : $\epsilon_p(E)$	$\pm 20.0$	$\mu\text{m}$	$\epsilon_p: -1.0$
			$(E): -1.0$
Variation over the travel length : $\epsilon_s(E)$	18.0	$\mu\text{m}$	$(T+E): 1.6$
Variation within 300mm of travel : $\epsilon_{300}$		$\mu\text{m}$	
Preload drag torque	0.10~0.12		dANm
Axial play	12~15		$\mu\text{m}$

MEASURING INSTRUMENT: Automatic Laser Lead Measuring Machine.



All dimensions are within specifications.

INSPECTOR: S. P. Ser  
DATE: 5-31-00  
NSK PRECISION AMERICA, INC.

Figura A1.3 Certificado de husillo de platina de enfoque

<b>Jergens</b> Cleveland, Ohio		<b>Certificate of Proof Test</b>			
(1) Distinguishing Mark	(2) Description of Item Tested	(3) Quantity Tested	(4) Date Tested	(5) Load Applied	(6) Rated Load
AK	115-023415 HOIST RING	1	01/31/03	8,000 LBS	4,000 LBS
(7) Name and address of supplier		Jergens, Inc., 15700 S. Waterloo Rd., Cleveland, OH 44110			
(8) Name and address of Company performing test:		Jergens, Inc., 15700 S. Waterloo Rd., Cleveland, OH 44110			
(9) Position of signatory in company:		Quality Assurance Manager			
We hereby certify that Jergens, Inc. Test Procedure 1001 requires all hoist rings to be proof tested and examined; and that this form is evidence that the test operator completed all procedures as required.					
FS		(Signature) <i>James Bligenburg</i>			
In substantial agreement with (OSHA) 29 CFR 1918 & 1919 Form NO. 4					

Figura A1.4 Certificado del anillo de carga del columpio del Instrumento



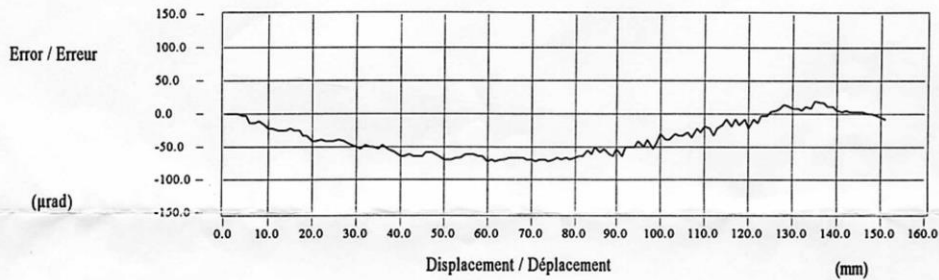
LACET / TANGAGE

INFORMATIONS / DATA

Nom du Produit <i>Product name</i>	UTM150	Nom opérateur <i>Operator name</i>	p;a
Nom du fichier <i>File name</i>	L13815A.PRN	Instrument de mesure <i>Measure tool</i>	LAE500
N° de série <i>Serial number</i>	01 3815	Identifiant <i>Identifier</i>	29 42 103

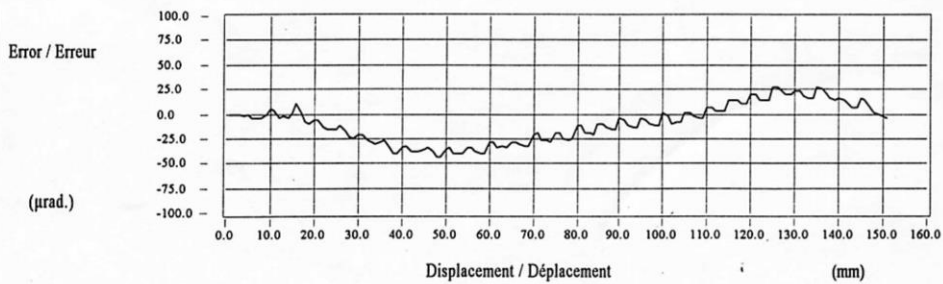
Pitch/Tangage

Critère d'acceptation catalogue <i>Catalogue acceptance criterion</i>	140.0000	Min - Max (A / F)	89.7000	Aller / Forward	
		Min - Max (R / B)	0.0000	Retour / Backward	
		Min - Max (A-R / F-B)	0.0000	Moyenne / Average	



Yaw/Lacet

Critère d'acceptation catalogue <i>Catalogue acceptance criterion</i>	90.0000	Min - Max (A / F)	72.5000	Aller / Forward	
		Min - Max (R / B)	0.0000	Retour / Backward	
		Min - Max (A-R / F-B)	0.0000	Moyenne / Average	



COMMENTAIRE

Figura A1.5 Certificado de platina del CCD

# BAYSIDE<sup>®</sup> Motion Group

## INSPECTION REPORT

**Congratulations on your purchase of an authentic Stealth Planetary ...  
the World's Most Advanced Servo Gearhead!**

*For more information, visit [www.baysidemotion.com](http://www.baysidemotion.com)  
or call 1-800-305-4555.*



Sales Order:	102931	Date of Birth:	10/21/2002
Gearhead P/N:	PS115-030-SH	Adapter/MTG P/N:	MT115-030-060
S/N:	24362	Prepared by:	Stealth Cell
Authorized By:	Jeevan Sooklall	Authorization Date:	10/21/2002

DIMENSIONAL units: mm				
	Max	Min	Actual	Comments
Shaft Diameter	32.0110	31.9950	32.0010	Pass
Pilot Diameter (Output)	109.9880	109.9660	109.9790	Pass
Pilot Diameter (Input)	78.0340	78.0120	78.0270	Pass
Pinion Bore Diameter	14.0190	14.0080	14.0140	Pass
Pinion Depth			36	

PERFORMANCE units: Metric			
	Specification	Actual	Comments
Max. Backlash	5 arc min	1.20 arc min	Pass
Start-up Torque	0.50 Nm	0.13 Nm	Pass

**METRIC CONVERSION:** Torque: (in-lb) x 0.113 = Nm      Temp: (°F - 32) x 0.556 = °C

OTHER		
	Specification	Actual
Visual	Check	OK
Labeling	Check	OK
Access Plug	Check	OK
Mounting Kit	Check	OK
Tapped Holes	Check	OK

NON STANDARD FEATURES				
	Nominal	Max Tolerance	Min Tolerance	Actual
				dbA
				dbA

27 Seaview Boulevard, Port Washington, NY 11050 \*Phone: (516) 484-5353 \* Fax: (516) 484-5496 \* [www.baysidemotion.com](http://www.baysidemotion.com)

*Figura A1.6 Certificado del reductor de la mesa giratoria*

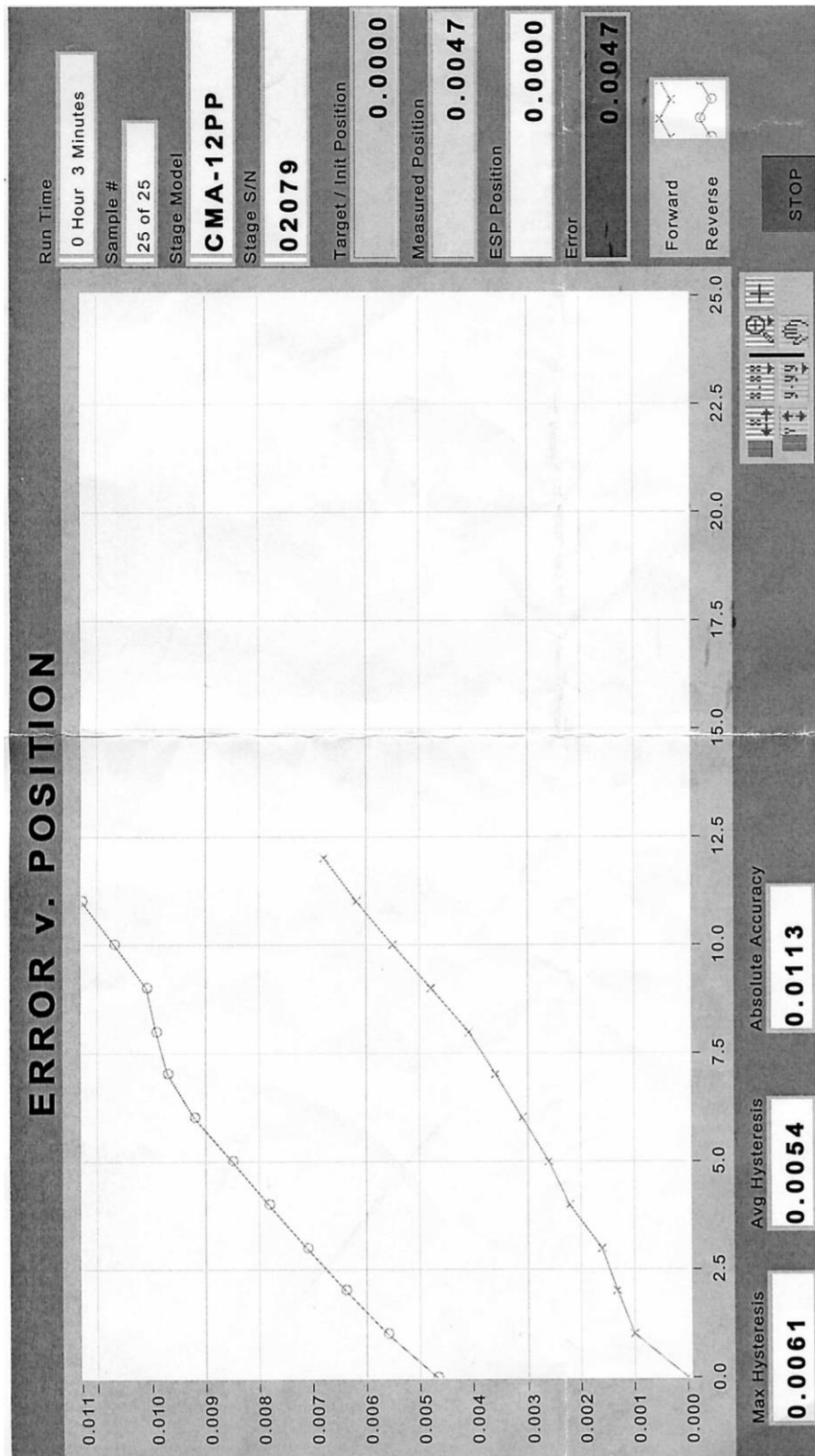


Figura A1.7 Certificado del posicionador de pupila



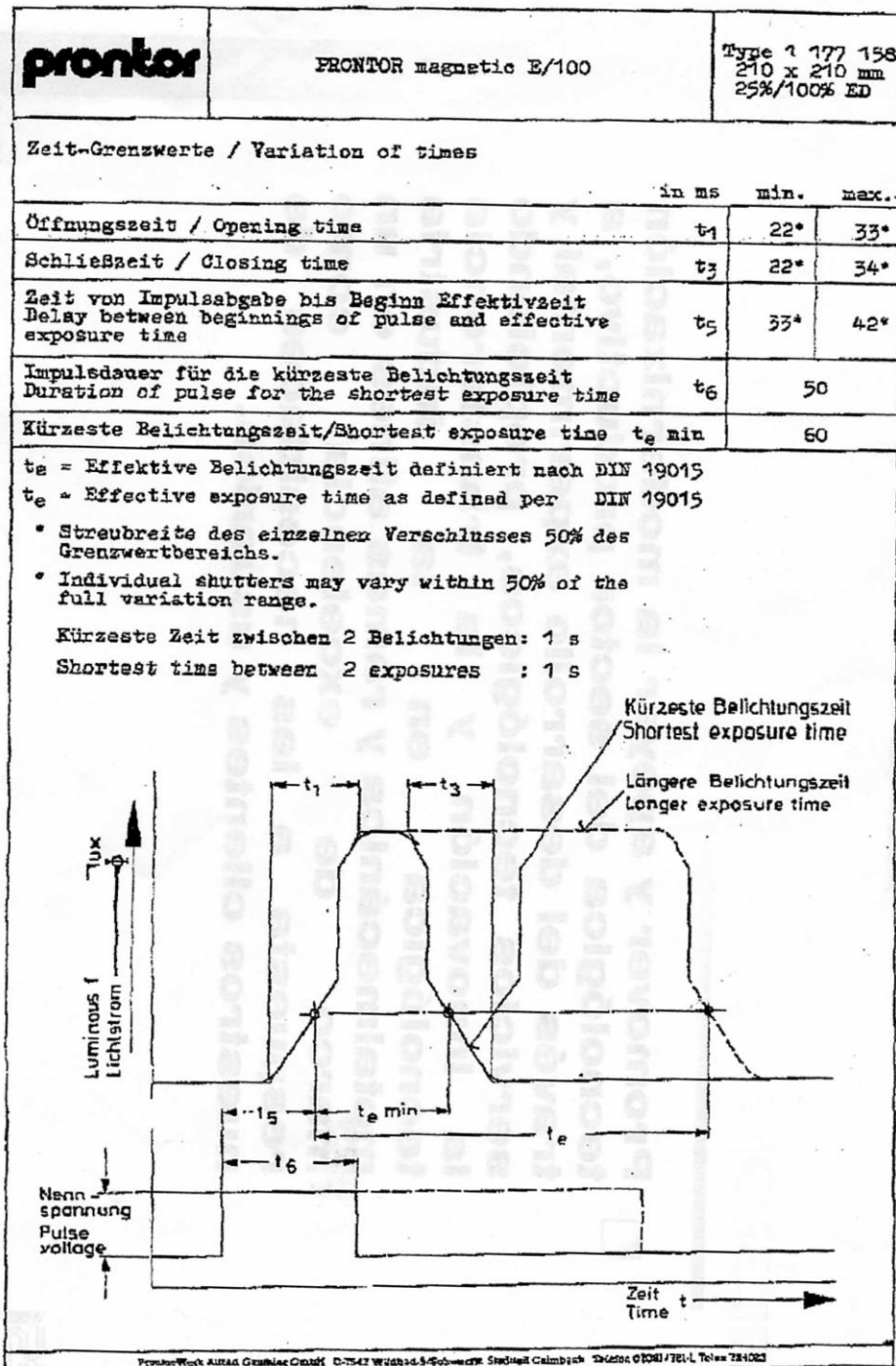


Figura A1.8 Certificado del Obturador

<b>CERTIFICADO DE TRATAMIENTO TERMICO</b>		<b>CERTIFICATE OF HEAT TREATMENT</b>		Certificado No.:
				Certificate No.: 2002/06-A
Clave / Code: <b>CIDESI</b>	Pedido No. / Order No.: <b>402128</b>	Pieza examinada / Item tested: <b>BRIDA SOPORTE Ø2630/2430X152</b>		
No. de Serie / Serial No.: <b>1 PIEZA</b>	Material / Material: <b>A-36</b>	Dibujo No. / Drawing No.: <b>DRSE-CM-CA-610</b>		
Cliente / Customer: <b>C.F.E.</b>				
Tipo de tratamiento térmico / Type of heat treatment:				
Horno/ Furnace <input checked="" type="checkbox"/> Local / Local	Relevado de esfuerzos Stress Relieving <input checked="" type="checkbox"/>	Normalizado Normalizing		
Segun procedimiento / acc. to Procedure No.: <b>Q-EWMX-71-001</b>				
Requerimientos especificados / Specification requirements:				
Velocidad de calentamiento/ Heating rate: <b>90°C / Hrs. max.</b>	Temperatura de inicio/ Furnace temp. start <b>25°C</b>	Temperatura de permanencia Holding Temp. <b>580 ± 20°C</b>		
Velocidad de enfriamiento/ Cooling rate: <b>90°C / Hrs. max</b>	Temperatura de apertura Furnace temp. out <b>250°C</b>	Tiempo de permanencia Holding Time. <b>4 hrs.</b>		
Resultados / Test Results:				
Velocidad de calentamiento / Heating rate: <b>60°C / Hrs.</b>	Temperatura de inicio / Furnace temp. start <b>20°C</b>	Temperatura de permanencia / Holding Temp. <b>617°C</b>		
Velocidad de enfriamiento/ Cooling rate: <b>44°C / Hrs.</b>	Temperatura de apertura Furnace temp. out <b>250°C</b>	Tiempo de permanencia Holding Time. <b>4 hrs. 10min.</b>		
Localización de los termopares / Thermocouples location:				
Observaciones / Remarks:				
Después de que el diagrama de tratamiento térmico fue revisado, se consideró que el relevado de esfuerzos cumple con los requerimientos del artículo UCS-56 Sección VIII (Div. I), del Código ASME, y con la requisición No. 2001/3572.				
Tramitado por / Prepared by: <b>Ing. Ma. Luisa Medina M.</b>	Aprobado por / Approved by: <b>Ing. Ricardo Pena</b>	Fecha / Date: <b>01 - Marzo - 2002</b>	Página 1 de 1 Página Page 1 of 1 page	
EWMX-023-89				

Figura A1.9 Certificado de construcción y tratamiento térmico de la estructura.



LABORATORIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL  
INFORME DE MEDICION

REG. No. LMD-022427  
FECHA 2002-07-09  
HOJA 1 DE 2  
O. S. INTERNA(MLP093/2002)

DATOS DE IDENTIFICACION

NOMBRE DE LA PIEZA: BASE PLATE WINDOW HOLDER  
MARCA: ----- No. CONTROL/INVENTARIO: SE-CM-CA-205-0004  
No. DE PLANO: DR/SE-CM-CA-205/004 CANTIDAD: 1 PIEZA  
ALCANCE: ----- SERIE: -----  
PROPIETARIO: INSTITUTO DE ASTRONOMIA DE LA UNAM  
DIRECCION: AV. UNIVERSIDAD No. 3000, COL. COPILCO, MEXICO, D. F.  
FECHA DE MEDICION: 2002-07-09

DATOS DE LA MEDICION

INSTRUMENTOS UTILIZADOS: MAQUINA DE MEDICION POR COORDENADAS; MARCA: MITUTOYO; MODELO: BR7 707;  
No. DE SERIE: 0170610; RESOLUCION: 0,000 5 mm; INCERTIDUMBRE:  $\pm (1,17 + 6^{\circ}L/1000) \mu m$ , L en mm; LM170197-265AP; INF. No. 1597  
MITUTOYO, TRAZABILIDAD AL PATRON NACIONAL DE LONGITUD, 740-120, VIGENTE HASTA 2004-03-13  
DESCRIPCION DE LA MEDICION: DIMENSIONAMIENTO DE ACUERDO AL PLANO DE REFERENCIA  
PROCEDIMIENTO UTILIZADO: TM-LMD-002 No. COTAS MEDIDAS: 10  
TEMPERATURA:  $20 \pm 1^{\circ}C$  HUMEDAD RELATIVA:  $45 \pm 15\%$   
INCERTIDUMBRE DE MEDICION:  $\pm 11 \mu m$  (VOLUMETRICA) TRAZABILIDAD: PATRON NACIONAL DE LONGITUD (CENAM).

OBSERVACIONES:

+ LA INCERTIDUMBRE DE MEDICION FUE CALCULADA SEGUN LA GUIA ISO/BIPM PARA LA EXPRESION DE INCERTIDUMBRE, SE REPORTA LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA CON UN FACTOR DE COBERTURA K=2 PARA UN INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95,45% ( $\pm 2\sigma$ )

REALIZO: ING. EFRAIN CALVA GOMEZ  
METROLOGO

APROBO: ING. HERIBERTO PEREZ MARTINEZ  
JEFE DEL LABORATORIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL

\*ECG07

LMD-004



Este documento es válido sólo en original y con las correspondientes firmas y sello.  
No se autoriza la reproducción parcial o total de este documento sin el permiso expreso del laboratorio.

Av. Playa Pie de la Cuesta 702, Desarrollo Habitacional San Pablo, Santiago de Querétaro, Qro., 76130  
Tels. (442) 2 11 98 42, 2 11 98 00 Ext. 307, 242 y 243 Fax: 2 11 98 00 Ext. 290  
e-mail: dimensional@cidesi.mx

Nº 25862

Figura A1.10 Certificado de medición de la base de la ventana de entrada

## *ANEXO 2*



## ANEXO 2

### A2.1: Matriz de seguridad (parte 1)

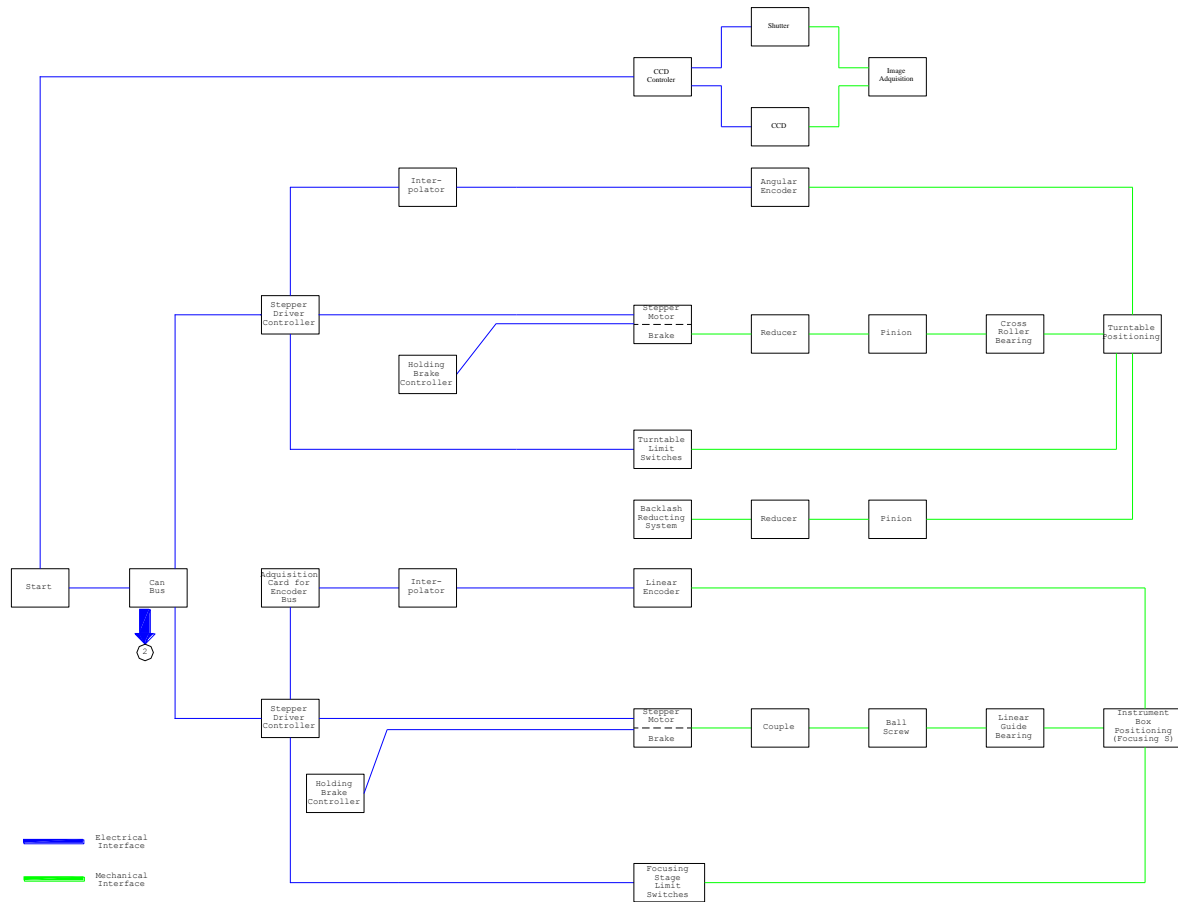
ASSEMBLY LEVEL	ELEMENTS INTERACTION	HAZARD DESCRIPTION	CONSEQUENCES	TASK ACTIVITIES ASSOCIATED TO HAZARD			SAFETY FACTOR		SEVERITY HAZARD	PROBABILITY HAZARD	RISK LEVEL	HAZARD PREVENTION	WARNINGS & SIGNS	LOCALIZATION AND PLACEMENT	SAFETY EQUIPMENT	ACTIVE WARNING REMARKS
				OPERATION	MAINTENANCE	ASSEMBLY										
1	Calibration fiber wheel-pinion-motor	Mechanical rotatory movement	Hand or fingers damage by trap	0	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't introduce fingers into wheel	Movement parts Prohibited introduce hands Electric shock risk	Instrument Box Cover	Gloves & and safety goggles	Overcurrent protection in motor driver Cover cable: PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C
		Electric power supply	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Limit switch Driver Stepper motor Connector block	3.96 1.72 7.14 1.2 1.2 1.2	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance				
1	Pupil positioner	Electric power	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Driver Micrometer stepper Connector block	3.96 1.72 1.2 1.2 1.2	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance	Prohibited introduce hands Electric shock risk	Instrument Box Cover	Gloves & and safety goggles	Overcurrent protection in motor driver Cover cable: PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C
1	Filter wheel 1-pinion-motor	Rotatory movement	Fingers damage by trap	0	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't introduce fingers into wheel	Movement parts Prohibited introduce hands Electric shock risk	Instrument Box Cover	Gloves & and safety goggles	Overcurrent protection in motor driver Cover cable: PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C
		Electric power	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Limit switch Driver Stepper motor Connector block	3.96 1.72 7.14 1.2 1.2 1.2	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance				
1	Filter wheel 2-pinion-motor	Rotatory movement	Fingers damage by trap	0	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't introduce fingers into wheel	Movement parts Prohibited introduce hands Electric shock risk	Instrument Box Cover	Gloves & and safety goggles	Overcurrent protection in motor driver Cover cable: PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C
		Electric power	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Limit switch Driver Stepper motor Connector block	3.96 1.72 7.14 1.2 1.2 1.2	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance				
1	Pupil stops & microlens wheel-pinion-motor	Rotatory movement	Fingers damage by trap	0	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't introduce fingers into wheel	Movement parts Prohibited introduce hands Electric shock risk	Instrument Box Cover	Gloves & and safety goggles	Overcurrent protection in motor driver Cover cable: PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C
		Impact	Impact risk with DTS	1	1	1						To be sure all components will be in initial position				
		Electric power	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Limit switch Driver Stepper motor Connector block	3.96 1.72 7.14 1.2 1.2 1.2	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance				

## A2.2 Matriz de seguridad (parte 2)

ASSEMBLY LEVEL	ELEMENTS INTERACTION	HAZARD DESCRIPTION	CONSEQUENCES	TASK ACTIVITIES ASSOCIATED TO HAZARD			SAFETY FACTOR		SEVERITY HAZARD	PROBABILITY HAZARD	RISK LEVEL	HAZARD PREVENTION	WARNINGS & SIGNS	LOCALIZATION AND PLACEMENT	SAFETY EQUIPMENT	ACTIVE WARNING REMARKS
				OPERATION	MAINTENANCE	ASSEMBLY										
1	Camera wheel-pinion-motor	Rotatory movement	Fingers damage by trap	0	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't introduce fingers into wheel. To be sure all components will be in initial position	Movement parts!	Instrument Box Cover	Gloves & and safety goggles	Overcurrent protection in motor driver Cover cable. PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C
		Impact	Impact risk with DTS	1	1	1										
1	Detector Translation Stage	Electric power	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Limit switch Driver Stepper motor Connector block	3.96 1.72 7.14 1.2 1.2 1.2	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance	Movement parts! Prohibited introduce hands Electric shock risk	Instrument Box Cover	Gloves & and safety goggles	Overcurrent protection in motor driver Cover cable. PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C
		Translacion movement	Fingers damage by trap	0	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't introduce fingers into travel guide				
2	Focusing stage motor-guide -box	Rotatory movement and Translation movement	Damage any part of body by trap	1	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't stay near	Movement parts! Prohibited introduce hands Electric shock risk Longitudinal travel movement	Focusing satge	Gloves , Safety goggles, Helmet, Safety shoes & crane	Overcurrent protection in motor driver Cover cable. PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C
		Electric power	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Connector block Driver Encoder Stepper motor limit switch Relay	3.96 1.72 1.2 1.2 72 3.96 4.31 8.33	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance				
2	Turn table-Bearing - pinion- structure	Rotatory movement	Damage any part of body by trap	1	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't stay near	Movement parts! Prohibited introduce hands Electric shock risk Restricted areal	turntable structure turntable structure electric cabinet turntable structure	Gloves , Safety goggles, Helmet, Safety shoes & crane	Overcurrent protection in motor driver Cover cable. PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C Counterweight designed to balance the rotator
		Inertial movement	Damage any part of body by trap	1	1	1						Don't stay near				
		Weigth	Damage any part of body by trap	0	1	1						Don't stay near				
		Electric power	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Connector block Driver Encoder Stepper motor limit switch Break	3.96 1.72 1.2 1.2 100 4.18 4.31 4.18	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance				
3	Commissioning Instrument- Instrument Rotator	Rotatory and translational movement	Damage any part of body by trap	1	1	1	Mechanical parts	2.09	2	1	2	Don't stay near	Movement parts! Prohibited introduce hands Electric shock risk Restricted turning areal	Main structure Main structure electric cabinet Main structure	Gloves , Safety goggles, Helmet, Safety shoes & crane	Overcurrent protection in motor driver Cover cable. PVC, self-extinguish Connector type protection: IP65 Flamability Class HB Limit switch type protection: IP40 Limit switch temperature range: -10 to 85°C Counterweight designed to balance the rotator
		Inertial forces	Damage any part of body by trap	1	1	1						Don't stay near				
		Weigth	Damage any part of body by trap	0	1	1						Don't stay near				
		Electric power	Electric shock	1	1	1	Cable Terminal block Connector block Driver Encoder Stepper motor Limit switch DC motor Break	3.96 1.72 1.2 1.2 100 4.18 4.31 1.2 4.18	2	1	2	Disconnect electric power before maintenance				

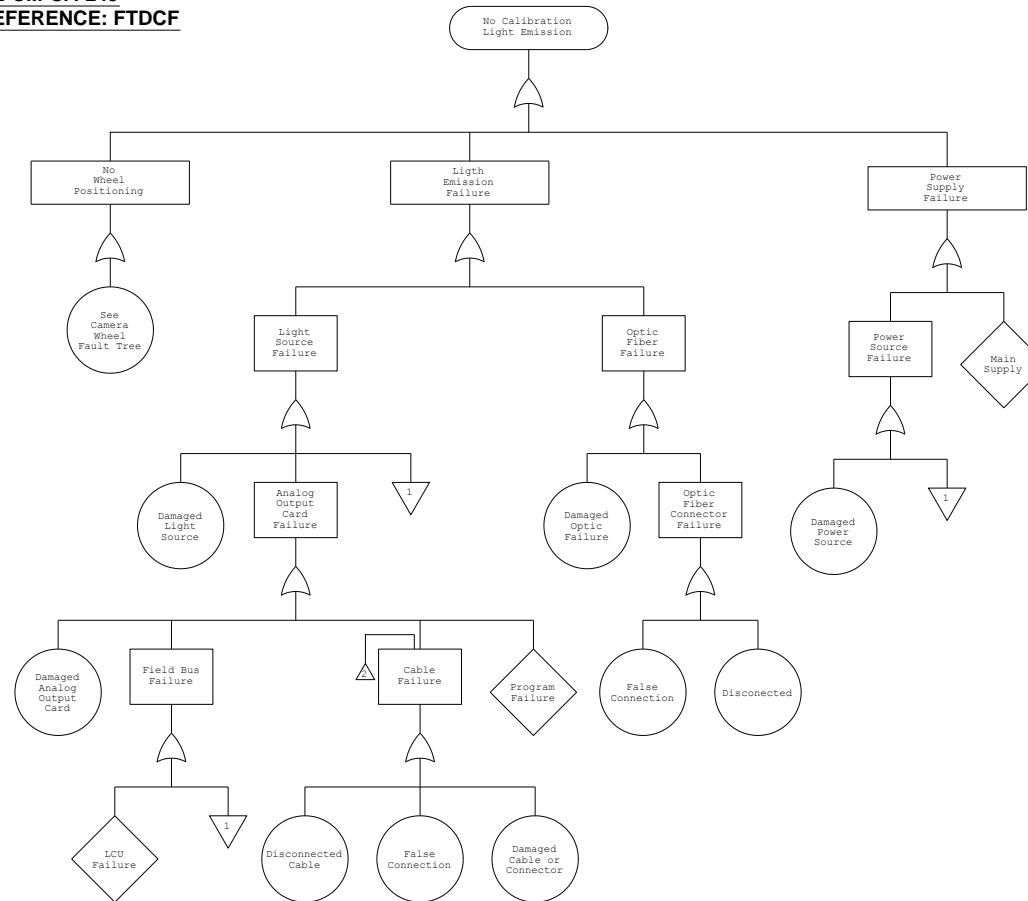
## A2.3 Diagrama de bloques funcional

**COMMISSIONING INSTRUMENT FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM**  
**SE-CM-CA**  
**REFERENCE: FBDCI**



## A2.4 Arbol de Falla

**FAULT TREE DIAGRAM  
CALIBRATION FIBER WHEEL  
SE-CM-CA-245  
REFERENCE: FTDCF**





## A2.5 Matriz FMCEA

*Subsystem CALIBRATION FIBER SE-CM-CA-245*

*Operational Mode* Shack Hartman

Table FMECA-1

<i>Element and part number</i>	<i>Failure Mode</i>	<i>Local Effect</i>	<i>Next Level Effect</i>	<i>Defect Probability based on 1650 operational hours</i>	<i>Critical Clasif.</i>	<i>Cause</i>	<i>Detection</i>	<i>Corrective Task</i>	<i>Prevention and Remarks</i>
ANALOG OUTPUT MODULE #1 (AOM1) SE-CM-CA-245 -0101	No light source Control	Disabled output module	No light source Operation	0.018966	2	Field Bus Failure	LCU warning	Check Element	Connections inspection
	No light source Control	Disabled output module	No light source Operation	0.018966	2	Program Failure	LCU warning	Program debugging	Preliminar Tests
	No light source Control	Disabled output module	No light source Operation	0.018966	2	Damaged Controller	LCU warning	Replace	Preventive Maintenance
ANALOG SIGNAL CABLE #1 (ASC1) SECMCA245 /000/0010001-SAI	No signal	No control Signal	No light source Operation	0.008250	2	Damaged Cable or connector	LCU warning	Replace	Preventive Maintenance
	No signal	No control Signal	No light source Operation	0.008250	2	Disconnected Cable	LCU warning	Reconnect	Connections inspection
	No signal	No control Signal	No light source Operation	0.008250	2	False Connection	LCU warning	Reconnect	Connections inspection
CANBUS INTERFACE CABLE #1 (CBIC1) SECMCA500 /000/0010001-EPP	No signal	No communication between LCU and CDIOS controller	Disabled CDIOS controller	0.008250	3	False Connection	No instrument box components	Reconnect	Connections inspection
	No signal	No communication between LCU and CDIOS controller	Disabled CDIOS controller	0.008250	3	Damaged Cable or connector	LCU warning	Replace	Preventive Maintenance
	No signal	No communication between LCU and CDIOS controller	Disabled CDIOS controller	0.008250	3	Disconnected Cable	LCU warning	Reconnect	Connections inspection
CANBUS INTERFACE CABLE #2 (CBIC2) SECMCA500 /000/0010002-EPP	No signal	No communication between LCU and CDIOS controller	Disabled CDIOS controller	0.008250	3	Damaged Cable or connector	No commissioning instrument feedback	Replace	Preventive Maintenance
	No signal	No communication between LCU and CDIOS controller	Disabled CDIOS controller	0.008250	3	Disconnected Cable	No commissioning instrument feedback	Reconnect	Connections inspection

***ANEXO 3***



ANEXO 3

**REFERENCE:**  
**SUBSYSTEM:** COMMISSIONING INSTRUMENT  
**COMPONENT:** INSTRUMENT POSITIONER / INSTRUMENT BOX  
**DEVICE NAME:** INPUT MODULE  
**COMPANY:** CD-SYSTEMS  
**MODEL:** 6153

**1) KEY FEATURES**

Small DIN rail device, Module of the **CD** systems **Input Output System** , Controlled by the Cdios , ontroller , Up to 16 Cdios Modules can be connected to one controller , Low Cost device , About the **Inputs**

8 Digital inputs , Electrically Isolated , 12 ... 28Vdc signals , Debounce timer , in 2 groups sink or , ource selectable , LED indication on each input

**2) SPECIFICATIONS**

<b>Supply</b>	<b>Conditions</b>	<b>Min.</b>	<b>Typ.</b>	<b>Max.</b>	<b>Units</b>
<b>Supply power</b>	Serial no < 121xxxxx	23	24	25	Vdc
<b>Power consumption</b>	Serial no < 121xxxxx	12	-	28	W
<b>Power on Current</b>	During power on	-	0.8	1	mA
<b>Fuse slow</b>		-	1	-	A
<b>Input</b>	<b>Conditions</b>	<b>Min.</b>	<b>Typ.</b>	<b>Max.</b>	<b>Units</b>
<b>No. Inputs</b>	Isolated to Cdios	-	8	-	pcs
<b>Voltage</b>	Serial no < 121xxxxx	-	24	30	Vdc
<b>Switch threshold</b>	Serial no < 121xxxxx	12	-	28	Vdc
<b>PNP/NPN resistance</b>	via jumper	7	-	17	Vdc
<b>Debounce time</b>	Software adjustable	5	-	9.5	kOhm
<b>Excitation voltage</b>	see supply power	0	-	255	ms
		-	-	-	Vdc

### 3) MORE INFORMATION

- [www.cd-systems.com](http://www.cd-systems.com)

### 4) SUPPLIERS

#### [CD Systems by](#)

Development, Production and Sales of electronic devices  
P.O.Box 271 2160 AG Lisse The Netherlands  
Sales office Tel: +31 252 410 182  
Fax: +31 252 420 279

#### REFERENCE:

<b>SUBSYSTEM:</b>	<b>COMMISSIONING INSTRUMENT</b>
<b>COMPONENT:</b>	<b>INSTRUMENT POSITIONER/INSTRUMENT BOX</b>
<b>DEVICE NAME:</b>	<b>TRANSLATION STAGE</b>
<b>COMPANY:</b>	<b>NEWPORT</b>
<b>MODEL:</b>	<b>UTMCC.5HA</b>

### 1) KEY FEATURES

- Travel: 25 – 150 mm.
- Repeatability to: 1.0  $\mu\text{m}$
- Optional linear: glass-scale encoder.
- Maximum speed: 20 mm/sec.
- Load capacity: to 20 kg.
- DC or stepper motor driver.
- Steel construction.

### 2) SPECIFICATIONS

- Travel range: 25; 50; 100 and 150 mm.
- On/axis: 5  $\mu\text{m}$ .
- Accuracy<sup>(1)</sup>: 3  $\mu\text{m}$  (HA)
- Repeatability: 1.5  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$  (HA)
- Hysteresis: 3  $\mu\text{m}$  (PP1, PE1, CC1HL CC1DD)  
3.5  $\mu\text{m}$ . (PP.1, PE.1, CC.1, CC.1DD)  
1.5  $\mu\text{m}$ . (HA)
- $\alpha\text{Y}$  Pitch<sup>(1)</sup>: 110  $\mu\text{rad}$

- $\alpha Z$  Yaw <sup>(1)</sup>: 70  $\mu$ rad

#### Drive specifications

- Resolution 0.5  $\mu$ m.
- Speed 20 mm/s
- Motor UE404CC

#### DC motor specifications

- Rated voltage\*: 75 V
- Armature resistance: 18.6  $\Omega$ .
- Armature inductance: 6.6 mH
- Gear ratio: 1:1
- Tachometer: yes

### 3) MORE INFORMATION

- [www.newport.com](http://www.newport.com)

### 4) SUPLIES

- **FRANCE**

Newport/Micro-Controle S.A.  
P.A. de Saint-Guenault  
3 bis rue jean Mermoz, B. P. 189  
91006 Evry Cedex  
Tel. +33 (0) 1 60 91 68 68  
Fax +33 (0) 1 60 91 68 69  
france@newport.com

- **SPAIN**

Innova Instrumentacion, S. L.  
C/. Collado Mediano, 32  
28230 Las Rozas, Madrid  
Tel. +34 91 710 5650  
Fax +34 91 710 5651  
spain@newport.com

**REFERENCE:**  
**SUBSYSTEM:** COMMISSIONING INSTRUMENT  
**COMPONENT:** INSTRUMENT POSITIONER/INSTRUMENT BOX  
**DEVICE NAME:** STEPPER MOTOR  
**COMPANY:** BERGER LAHR  
**MODEL:** VRDM 364/50 LHC

## 1) KEY FEATURES

- 3 Phase stepping motor of size 60 mm., with brake.

## 2) SPECIFICATIONS

- Max. Torque: 45 Ncm
- Holding torque: 51 Ncm
- Rotor inertia: 0.1 Kgcm<sup>2</sup>
- Number of steps<sup>1)</sup>:  
200/400/500/1000/2000/4000/5000/10000
- Step angle<sup>1)</sup>: 1.8/0.9/0.72/0.36/0.18/0.09/0.072/0.036  
(°)
- Systematic angle tolerance per step<sup>2)</sup>: ±6 (‘)
- Max. Starting frequency<sup>1)</sup>: 8.5 KHz
- Rated current of incoming cable: 52 A LH<sup>6)</sup>
- Winding resistance: 0.42 Ω LH<sup>6)</sup>
- Current rise constant: 2.1 ms
- Shaft load: Max. Radial force (front F<sub>R1</sub>): 24 N  
Max. Axial force (Pull F<sub>A1</sub>): 100 N
- Motor voltage: 35 V LH<sup>6)</sup>
- Approximate weight<sup>3)</sup>: 0.45 kg

Terms and symbols taken from DIN 42021 part 2

- 1) With suitable power drive
- 2) Measured at 1000 steps/revolution, unit in minutes
- 3) Weight of the motor with stranded wire connection
- 4) f<sub>Aom</sub>=Starting frequency at no load
- 5) LN=Normal winding
- 6) LH= Heavy-current winding (operated with D 920; up to 40 V is possible)
- 7) LW= Wall-mounted winding

### 3) MORE INFORMATION

- [www.berger-lahr.de](http://www.berger-lahr.de)

### 4) SUPPLIES

- **France**  
Berger Lahr Positec  
12, Avenue des Tropiques  
F-91978 Courtaboeuf cedex  
Tel. +33 1691 810 10  
Fax +33 1644 610 11  
[Cristian.laporte@berger-lahr.com](mailto:Cristian.laporte@berger-lahr.com)
- **Spain**  
Berger Lahr Positec S.L.  
C/Pamplona 92/94-2°. 3ª.  
E-08018 Barcelona/Spainien  
Tel. +34 93 3 56 83 90  
Fax +34 9 34 85 52 45

#### REFERENCE:

<b>SUBSYSTEM:</b>	<b>COMMISSIONING INSTRUMENT</b>
<b>COMPONENT:</b>	<b>INSTRUMENT POSITIONER/INSTRUMENT BOX</b>
<b>DEVICE NAME:</b>	<b>ENCODER</b>
<b>COMPANY:</b>	<b>HEIDENHAIN</b>
<b>MODEL:</b>	<b>ERA 780C</b>

### 1) KEY FEATURES

- The ERA 780C incremental modular angle encoder feature an AURODUR steel scale tape as measuring standard. On the ERA 780C, the scale tape is place in a slot in the inside circumference of the hollow shaft.
- Incremental signals: ~1 Vpp
- Grating period: 40 µm
- Resulting line count: 36000 at D1 = 458.62 + 0.02 mm  
40000 at D1 = 573.20 + 0.03 mm.  
90000 at D1 = 1146.10 + 0.06 mm.

- Recommended measuring steps: 0.0001°, 0.001° depending on the scale-tape-mount  
Diameter and signal interpolation.

## 2) SPECIFICATIONS

- Power supply: 5 V  $\pm$ 10%  
Max. 150 mA
- Incremental signals:  $\sim$ 1 Vpp
- Reference marks: Distance-coded, nominal increment 1000  
grating periods
- Scale slot diameter D: 458.62 + 0.02, 573.20 + 0.03, 1146.10 + 0.06
- Line count/ accuracy of graduation: 36000/  $\pm$ 3°, 45000/  $\pm$ 3°, 90000/  $\pm$ 3°.
- Cutoff frequency (-3 dB):  $\geq$ 180 kHz
- Mech. Perm. Speed: 500 rpm
- Max. Operating temp.: 50 °C (thermal coefficient of expansion of the scale  
Substrate greater than 9 ppm/K and less than 12 ppm/K)
- Min. Operating temp.: -10 °C (14 °F)
- Protection: IP 00
- Perm. Axial movement:  $\pm$ 0.2 mm.
- Weight scanning unit: 350 g.
- Scale tape: 30 g/m
- Vibration (55 to 2000 Hz):  $\leq$ 100 m/s<sup>2</sup> (IEC 68-2-6)
- Shock ( 6 ms):  $\leq$ 1000 m/s<sup>2</sup> (IEC 68-2-27)
- Electrical connection: Cable 3 m. (9.9 ft.), with coupling
- Permissible cable length to subsequent electronics Max.: 150 m. (492 ft.)

## 3) MORE INFORMATION

- [www.heidenhain.de](http://www.heidenhain.de)

## 4) SUPPLIES

- **Spain**  
FARRESA ELECTRONICA S.A.



C/Simon Bolivar, 27 – Dpto. 11  
E-48013 Bilbao (Vizcaya), Spain  
Tel. 9 44 41 36 49  
Fax 9 44 42 35 40

- **France**  
HEIDENHAIN FRANCE sarl  
Post Box 62  
2, Avenue de la Cristallerie  
F-92316 Sevres  
Tel. 01 41 14 30 00  
Fax 01 41 14 30 30

## ANEXO 4

### CONTRATO

#### 5.- JURISDICCIÓN.

5.1.- GRANTECAN y el CONTRATISTA se comprometen a resolver de manera amistosa cualquier desacuerdo que pueda surgir en el desarrollo del contrato.

5.2.- Los desacuerdos podrán ser sometidos al arbitraje de una comisión formada por un representante elegido por GRANTECAN, otro elegido por el CONTRATISTA y un tercero, que actuara como presidente de la comisión, elegido por ambos representantes. Los acuerdos se tomaran por mayoría simple y estos serán inapelables.

5.3.- Toda duda o cuestión que pudiera suscitarse entre GRANTECAN y el CONTRATISTA sobre interpretación, cumplimiento o ejecución de presente contrato, serán sometidas a los Juzgados y Tribunales del Orden Jurisdiccional Civil de la Ciudad de Santa Cruz de Tenerife, con renuncia expresa al fuero que pudiera corresponder a cada parte, caso que lo tuviere.

#### 6.- INFRACCIONES

6.1.- Cada una de las partes no será responsable de las infracciones a la legalidad vigente en que incurra la otra como consecuencia de este contrato.

#### 7.- VINCULACIÓN LABORAL

7.1.- Cada una de las partes asume exclusivamente los vínculos laborales o de servicio respecto al personal de su dependencia, sin que de su participación en los trabajos comunes que son objeto de los contratos formalizados entre el CONTRATISTA y GRANTECAN a que se refieren esta condiciones generales se derive relación de trabajo distinta a la que previamente mantenían.

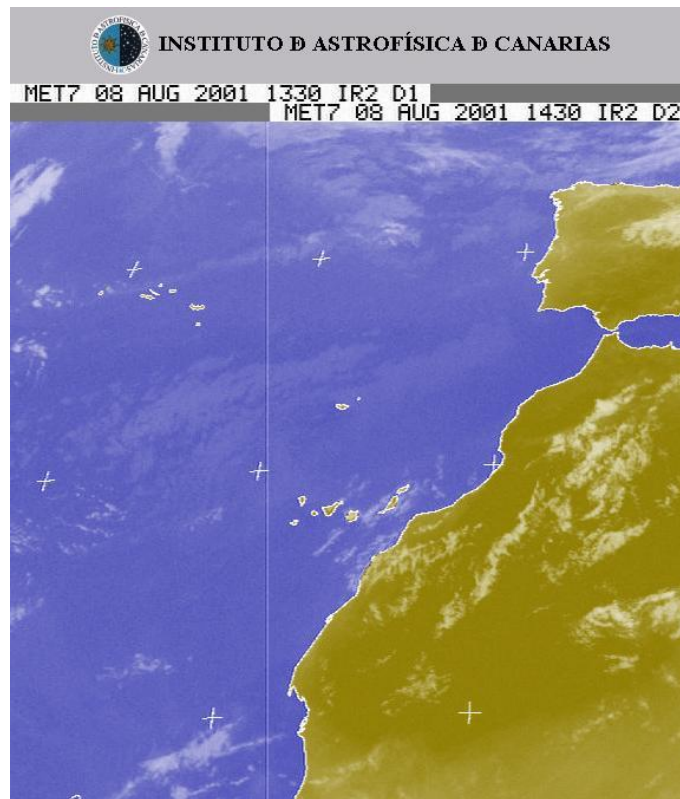
#### 8.- CONFIDENCIALIDAD DE LA INFORMACIÓN

8.1.- Cada una de las partes se compromete a no difundir, bajo ningún aspecto, las informaciones científicas, técnicas o comerciales pertenecientes a la otra parte a las que haya podido tener acceso en el desarrollo del trabajo objeto del contrato, siempre que dichas informaciones no sean de dominio público. A este respecto, las partes podrán firmar un Acuerdo de Confidencialidad específico que desarrolle en detalle estos aspectos.

PTSP

Figura A4: Contrato y cláusula de confidencialidad.

# ***BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS ADICIONALES***



## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS ADICIONALES

### Referencias:

#### Introducción

- 1.- [www.keck.com](http://www.keck.com)
- 2.- [www.eso.org](http://www.eso.org)
- 3.- [www.gtc.iac.es](http://www.gtc.iac.es)
- 4.- “Curvature equation for segmented telescope”, Cuevas S., Orlov V., Garfias F., Voisekhovich V., Sánchez L.J. Proc. SPIE Vol.4003, Astronomical Telescopes: Optical Design, Materials, Fabrication and Maintenance, Philippe Dierickx, ed. (Bellingham, WA:SPIE press, pp 291-302,(2000).

#### Parte I Requerimientos de diseño

##### Capítulo 1: Definición del problema

- 1.- Commissioning Instrument Specifications, Nicholas Devaney, Lluís Cavaller, Totty Jochum, PO, GTC, ESP/OPTI/0124-R, 1.A. 26/07/00.
- 2.- Commissioning Camera Outline, Nicholas Devaney, PO, GTC, NTE/OPTI/0080-R, 1.A. 02/03/00.
- 3.- System Engineering; GTC Coordinate System, Alvaro Medina, PO,GTC,RPT/STMA/0075-R, 1.A. 12/05/99.
- 4.- System Enginnering, GTC Coordinate System, Álvaro Medina, PO, GTC, RPT/STMA/0075-R, 1.A. 12/05/99.

#### Parte II Solución propuesta

##### Capítulo 3: Descripción del Modelo de Solución Propuesto

- 1.- GTC Telescope Mechanics Design, Jorge Pan, Consolación Asenjo, PO, GTC, PUB/TELE/0031-L, 23/03/00.
- 2.- Commissioning Camera for the Gran Telescopio Canarias, Salvador Cuevas, Carlos Espejo, Beatriz Sánchez, Vicente Bringas, Armando Chavoya, J.Manuel Montoya, Nicholas Devaney, Javier Castro, SPIE Vol 4840-35, 2002.

#### Parte III Diseño

##### Capítulo 5: Diseño mecánico, presupuestos de error y pruebas en el sistema mecánico

- 1.- Commissioning Instrument Preliminary Mechanical Design, Lluís Cavaller, PO,GTC, RPT/OPTI/0142-R, 1.A, 12/07/00.
- 2.- Commissioning Instrument FEM document, Luis del Llano, J.L. Sánchez, Alfredo Manzo, Alejandro Farha, Javier Godoy, Vicente Bringas, Carlos Espejo, EXT/UNAM, 27/07/02.
- 3.- Commissioning Instrument Mechanical Design Report, Carlos Espejo, Vicente Bringas, J.Manuel Montoya, EXT/UNAM, 27/07/02.

##### Capítulo 6: Optica astronómica

- 1.- Adaptive Optics Tutorial publicado por ESO, [www.eso.org](http://www.eso.org)
- 2.- Spot-Optics, [www.Spot-optics.com](http://www.Spot-optics.com)

- 3.- GTC PO, [www.iac.gtc.es](http://www.iac.gtc.es).
- 4.- A new CCD designed for curvature wavefront sensing, J.W. Beletic, Reinhold J. Dorn, Thomas Craven- Bartle and Berry Bruke European Southern Observatory, MIT Lincoln Observatory.
- 5.- AO Curvature Systems for Segmented Primary Telescopes, Cuevas S. Orlov V., Garfias f. , Voitsekovich V., Sánchez L. J. 2000 Proc SPIE 4003, 291.

Capítulo 7: Óptica del Instrumento de Verificación

- 1.- “Curvature equation for segmented telescope”, Cuevas S., Orlov V., Garfias F., Voisekhovich V., Sánchez L.J. Proc. SPIE Vol.4003, Astronomical Telescopes: Optical Design, Materials, Fabrication and Maintenance, Philippe Dierickx, ed. (Bellingham, WA:SPIE press, pp 291-302,(2000).

Capítulo 8: Diseño de los barriles del colimador y la cámara

- 1.- Opto- mechanical System Design, Yoder, Paul R. 2<sup>nd</sup> Ed. Marcel Dekker, New York 1992.
- 2.- Precision Glassworking, Zcommler W, SPIE Vol 472 SPIE press, Bellingham WA 1984.

Capítulo 10: Determinación de la fiabilidad del Instrumento

- 1.- GTC Availability Model, Ana Pérez, J. Carlos González, P.O., GTC, RPT/STMA/0067-R, 1C. 16/10/00.
- 2.- Baseline of the GTC Operation and Maintenance Plan Ana Pérez, J. Carlos González, PUB/STMA/0026-L, 1C, 29/02/00
- 3.- Commissioning Instrument RAMS Analysis, Vicente Bringas, Gustavo Anguiano, EXT/UNAM, 22/07/02.

Capítulo 11: Sistema de control del Instrumento de Verificación

- 1.- Electronics and Acceptance Control System for the Gran Telescopio Canarias, Rubén Flores, Gerardo Lara, Sadot Arciniega, Beatriz Sánchez, Carlos Espejo, Salvador Cuevas, Vicente Bringas. SPIE Vol. 4837-60, 2002.
- 2.- Control System for Commissioning Instrument, Rafael de la Calle Andrés, PO, GTC, DCI/CTRL/0041-R, 21/10/02.

**Bibliografía**

1. Handbook of QS-9000 Tooling and Equipment Certification  
George Mouradian  
SAE ISBN 0-7680-0527-2
2. Components Failures Maintenance and Repair (a Tribology Handbook)  
M. J. Neale, Butterworth Heinemann  
1995 ISBN I56091-4513
3. Mechatronics Theory and Applications  
Dr. Ing Hans Joachim Koriath

Dipl Ing Matthias Romer  
Robert Bosch GmbH 2000  
ISBN 0-7680-0642-2

4. Machinery's Handbook (Twenty Fifth edition)  
Erik Oberg, Franklin D. Jones, Holbrook L. Horton and Henry H Ryffel  
Industrial Press Inc. 1996  
ISBN 0-8311-2414-5

5. Fatigue Design Handbook  
SAE Third Edition  
1997 ISBN 1-56091-917-5

6. Gear Design Manufacturing and Inspection Manual  
SAE International Gear and Spline Technical Committee  
1990 ISBN 1-56091-006-2

7. Design of Machinery  
Robert L. Norton  
Mc Graw Hill 1992  
ISBN 0-07-047799-X

8. Machine Design, An Integrated Approach  
Robert L. Norton  
Prentice Hall 1999  
ISBN 970-17-0257-3

9. Design of Machine Elements  
M. F. Spotts, T. E. Shoup  
1999 Prentice Hall  
ISBN 970-17-0252-2

10. Introduction to Finite Elements in Engineering  
Chandrupatla, Tirupathi R./Bdu, Ashok D.  
1999 Prentice Hall  
ISBN 970-17-0260-3

11. The Newport Resource  
Standard Products and Application Notes Tutorial  
2003 [www.newport.com](http://www.newport.com)

12. Physics for Scientists and Engineers  
Raymond A. Serway and Robert J. Beichner  
2000 McGraw Hill  
ISBN 970-10-3580-1