



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

**DISEÑO DE UN ESPARCÍMETRO GONIOMÉTRICO
PARA MEDICIÓN POLARIMÉTRICA DE LA LUZ
REFLEJADA EN SUPERFICIES RUGOSAS
BIDIMENSIONALES**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. TONATIUH SANTANA SÁNCHEZ

TUTORES PRINCIPALES

GABRIEL ASCANIO GASCA, CCADET-UNAM
RIGOBERTO NAVA SANDOVAL, CCADET-UNAM

MÉXICO, D. F. ENERO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Ramírez Reivich Alejandro C.

Secretario: Dr. Velázquez Villegas Fernando.

Vocal: Dr. Gasca Gabriel Ascanio.

1er. Suplente: M.I. Nava Sandoval Rigoberto.

2do. Suplente: Dr. Bruce Davidson Neil Charles.

Ciudad Universitaria. México, D.F.

TUTOR DE TESIS

Dr. Gabriel Ascanio Gasca

COTUTOR DE TESIS

M.I. Rigoberto Nava Sandoval

*A lo más valioso de mi vida:
Mi madre, mi padre y mi hermano.*

AGRADECIMIENTOS

El reparto de agradecimientos para todos los que colaboraron para la realización de este trabajo y del proyecto que desarrollé en estos últimos años resulta en una cantidad enorme de personas e instituciones que favorecieron el éxito en la conclusión de esta tesis.

Comenzaré por agradecer a las instituciones y actores sociales:

A mi Universidad, por haberme brindado la formación académica que me hizo crecer profesionalmente y como ser humano, por la libertad y las oportunidades brindadas siendo estudiante y ex alumno.

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, por tener las puertas abiertas para que estudiantes de maestría podamos participar en proyectos de innovación tecnológica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por facilitar los recursos económicos para la realización de mis estudios de maestría y por autorizar el financiamiento del proyecto para el desarrollo del esparcómetro.

Al pueblo de México, por creer en el poder de la educación para transformar a las personas que implantarán las condiciones para vivir en un país con mayores libertades y una alta calidad de vida. Creencia que se vio materializada en el presupuesto que el pueblo, ha invertido en mis estudios y el de todos mis colegas egresados de la maestría.

Continuando los agradecimientos a los involucrados más allegados al proyecto:

Al ingeniero Rigoberto Nava Sandoval por haber confiado en mí en estos años para llevar a cabo el proyecto del cual deriva este trabajo, por su apoyo incondicional, su dedicación en tiempo, paciencia y enseñanza brindadas, por la amistad y por la charlas tan enriquecedoras.

A mi tutor de maestría, el Doctor Gabriel Ascanio Gasca, por el apoyo brindado, la libertad, confianza, comprensión y aportación para mejorar mi formación académica, y

por el esfuerzo realizado para asesorarme y apoyar la conclusión de este trabajo a pesar de la distancia y la carga de trabajo y compromisos.

Al Doctor Neil Charles Bruce Davidson, por confiar depositada en mí para desarrollar el proyecto, por su confianza, paciencia y colaboración cada vez que la requería.

Al Ingeniero Luis Alberto Vázquez Pérez, amigo de muchos años, que brindó su apoyo moral y profesional para la resolución de problemas en la operación del esparcímetero. Y sobre todo por el compañerismo y la convivencia a lo largo de la maestría.

Al Doctor Fernando Velázquez Villegas, quien me brindó conocimientos, asesoría, consejos y un apoyo invaluable para la conclusión de este trabajo.

Al Ingeniero Benjamín Valera, por ayudarme a resolver las dudas y solucionar los problemas surgidos durante el proyecto.

A los ingenieros Xanat Téllez y Diego Domínguez, por su colaboración al inicio del proyecto, varias de sus aportaciones contribuyeron en el diseño presentado en este trabajo.

A los trabajadores del taller del CCADET, que fabricaron y de los cuales aprendí muchos de los elementos que la teoría no me enseñó, por su labor, paciencia y buen trabajo que se vio plasmado en el equipo construido. Especial agradecimiento a Norberto por coordinar la manufactura del equipo.

A los amigos y colegas del CCADET, Jonathan, Ricardo, Florecita, David, el Doctor Soto, Álvaro, Rafa, por brindarme la mejor estancia en la oficina de Ingeniería de procesos.

Por último, y no menos importantes, los agradecimientos en el ámbito personal:

A mis padres, por el amor, la motivación, el apoyo incondicional, la esperanza depositada en mí para que realizara mis estudios hasta el momento, por los valores que me formaron como persona y el buen ejemplo que siempre me han inculcado.

A mi hermano, por toda la ayuda incondicional, por ser a lo largo de muchos años ejemplo a seguir de profesionalismo, trabajo y liderazgo. Por el tiempo compartido conmigo que propició este gusto por la ingeniería.

A todos mis familiares, tíos, primos, sobrinos, familia política, por estar al pendiente de mí y de mi éxito académico.

A mis amigos, en especial a Claudia, Alberto, Cynthia y Areli por escuchar y motivarme siempre. A Julio por sus buenos consejos para enfrentar los problemas personales en el desarrollo de mi tesis. Y a todos mis amigos del equipo representativo de triatlón de la UNAM por formar parte integral de mi vida en la universidad, en especial al Dr. Mario Victoria, a Jorge y a Sebastián por las porras para concluir mi trabajo a tiempo.

CONTENIDO

Resumen	i
Abstract	iii
Objetivo y alcance	v
Organización del trabajo	ix
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	1
1.1 Esparcimiento y polarización de la luz.....	3
1.1.1 Esparcimiento de la luz.....	3
1.1.2 Polarización	5
1.2 Medición del esparcimiento de la luz.....	6
1.2.1 Formas de medir el esparcimiento de la luz	6
1.2.2 Matrices de Mueller y vectores de Stokes.	9
1.3 Tipos y configuraciones de esparcímetros	10
1.4 Origen de la propuesta para el diseño del esparcómetro	18
CAPÍTULO 2 DISEÑO CONCEPTUAL	21
2.1 Definición del problema	23
2.1.1 Identificación de necesidades	23
2.1.2 Definición de requerimientos.....	25
2.1.3 Especificaciones.....	26
2.2 Descomposición funcional.....	29
2.3 Alternativas de solución	33
2.4 Generación de conceptos.....	36
2.5 Selección del concepto	44
CAPÍTULO 3 DISEÑO DE CONFIGURACIÓN	47
3.1 Desarrollo del concepto definido	49
3.1.1 Ajustes al concepto definido	49
3.1.2 Descripción general y consideraciones del equipo	51

3.1.3 Relación entre los movimientos angulares y el barrido del sensor en la totalidad del hemisferio superior	55
3.2 Mecanismos de alineación del equipo	56
3.3 Consideraciones físicas y de experimentación óptica	64
3.3.1 Contrapesos.....	64
3.3.2 Sensores de referencia y de final de carrera.....	65
3.3.3 Arreglos ópticos del láser y del sensor.....	66
3.4 Comunicación entre el equipo y la computadora	67
CAPÍTULO 4 DISEÑO DE DETALLE	71
4.1 Servomotores y reductores de velocidad del esparcímetro	73
4.2 Sensores de referencia y finales de carrera	76
4.3 Mecanismo de alineación M_1	77
4.4 Mecanismo de alineación M_2	80
4.5 Mecanismo de alineación M_3	82
4.6 Mecanismo de alineación M_4	84
4.7 Mecanismo de alineación M_5	86
4.8 Mecanismo de alineación M_6	90
4.9 Mecanismo de alineación M_7	92
4.10 Sujeción de sensores de referencia para el brazo B_1 ($SSRB_1$)	94
4.11 Sujeción de sensores de referencia para el brazo B_2 ($SSRB_2$)	96
4.12 Sujeción de sensores de referencia para el brazo G ($SSRBG$).....	98
4.13 Brazo B_1	100
4.14 Brazo B_2	101
4.14 Brazo G.....	102
4.15 Pedestal	104
4.16 Ensamble total del equipo.....	106
4.17 Materiales y procesos de manufactura	109
CAPÍTULO 5 AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO	111
5.1 Comunicación entre sensores, sevopacks y computadora	113
5.2 Interfaz de usuario.....	114
5.3 Estructura del programa del esparcímetro	119

5.4 Consideraciones en el programa	121
5.3.1 Programa a prueba de errores	121
5.3.2 Secuencia de movimientos en Modo automático.....	122
5.3.3 Corrección del error de <i>backlash</i> en el brazo B ₁	122
RESULTADOS	125
6.1 Manufactura del equipo	125
6.2 Ensamblaje.....	128
6.3 Ensamblaje de componentes ópticos.....	131
6.4 Pruebas de desempeño de los mecanismos de alineación	134
6.5 Instalación eléctrica y de sensado	137
6.6 Pruebas de movimiento.....	139
CONCLUSIONES	143
TRABAJO A FUTURO	147
REFERENCIAS.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

Figura 1.1 Luz reflejada en una superficie lisa.....	4
Figura 1.2 Luz esparcida en una superficie poco rugosa	4
Figura 1.3 Luz esparcida en superficie con mayor rugosidad.....	4
Figura 1.4 Luz polarizada a través de un polarizador	6
Figura 1.5 Esparcímetero unidimensional de barrido empleado en un laboratorio	7
Figura 1.6 Las superficies unidimensionales esparcen la luz en plano.....	8
Figura 1.7 Las superficies bidimensionales esparcen la luz en todo un hemisferio	8
Figura 1.8 Esparcímetero que emplea un espejo elíptico	11
Figura 1.9 Esparcímetero que hace uso de un espejo elipsoidal.....	11

Figura 1.10	Esparcímetero con arreglo de dos espejos elipsoidales	12
Figura 1.11	Esparcímetero de espejo elíptico desarrollado en el CCADET.....	12
Figura 1.12	Esparcímetero de un brazo para superficies unidimensionales	13
Figura 1.13	Configuración del esparcímetero reportado por Wang H.....	14
Figura 1.14	Configuración del esparcímetero reportado por Ramírez-Duverger A	14
Figura 1.15	Esparcímetero comercial SMS CASI	15
Figura 1.16	Esquema del esparcímetero presentado por Shen Y J.	16
Figura 1.17	Esparcímetero en operación.....	16
Figura 1.18	Esparcímetero de la compañía Schmitt Measurement Systems	17
Figura 1.19	Esquema preliminar del esparcímetero polarimétrico diseñado	19
CAPÍTULO 2 DISEÑO CONCEPTUAL		
Figura 2.1	Función principal del esparcímetero	29
Figura 2.2	Descomposición funcional del equipo.....	32
Figura 2.3	Concepto L1A1P1a.....	36
Figura 2.4	Concepto L1A1P1a.....	37
Figura 2.5	Concepto L1A1P3.....	38
Figura 2.6	Concepto L1AP2.....	39
Figura 2.7	Concepto L1A3P1.....	40
Figura 2.8	Concepto L1A3P3.....	41
Figura 2.9	Concepto L2AP2.....	42
Figura 2.10	Concepto L3A3P3.....	43
CAPÍTULO 3 DISEÑO DE CONFIGURACIÓN		
Figura 3.1	Modificación para el posicionamiento azimutal del sensor	50
Figura 3.2	Modificación al concepto para eliminar la obstrucción causada por el brazo que posiciona.....	51
Figura 3.3	Identificación de los elementos del concepto	52
Figura 3.4	Ángulo de incidencia θ_i	53
Figura 3.5	Ángulo de posicionamiento (polar) del sensor θ_s	53
Figura 3.6	Ángulo de posicionamiento del brazo θ_g	54
Figura 3.7	Mecanismos de alineación del equipo M1, M2,..., M7	57
Figura 3.8	Desalineaciones que corregirá el mecanismo M1	58
Figura 3.9	Desalineaciones que corregirá el mecanismo M2	59
Figura 3.10	Desalineaciones que corregirá el mecanismo M3	60

Figura 3.11	Desalineaciones que corregirá el mecanismo M4	61
Figura 3.12	Desalineaciones que corregirá el mecanismo M5	62
Figura 3.13	Desalineaciones que corregirá el mecanismo M6	63
Figura 3.14	Ajuste de la altura de la muestra mediante el mecanismo M7	64
Figura 3.15	Incorporación de contrapesos W1, W2, W3.....	65
Figura 3.16	Arreglo óptico del láser.....	66
Figura 3.17	Arreglo óptico del sensor.....	67
Figura 3.18	Esquema de comunicación del esparcímetro	69
CAPÍTULO 4 DISEÑO DE DETALLE		
Figura 4.1	Servomotor Yaskawa SMJV01A3A21	74
Figura 4.2	Servomotor Yaskawa SGDVR90A11A	74
Figura 4.3	Reductor de velocidad ABR-060-070-S2-P1.....	75
Figura 4.4	Reductor de velocidad AB-060-050-S2-P1.....	76
Figura 4.5	Sensores fotoeléctricos.....	77
Figura 4.6	Vista isométrica del mecanismo de alineación M ₁	77
Figura 4.7	Vista lateral del mecanismo de alineación M ₁	78
Figura 4.8	Vista superior del mecanismo de alineación M ₁	79
Figura 4.9	Vista isométrica del mecanismo de alineación M ₂	80
Figura 4.10	Vista superior del mecanismo de alineación M ₂	81
Figura 4.11	Vista isométrica del mecanismo de alineación M ₃	82
Figura 4.12	Vista lateral del mecanismo de alineación M ₃	83
Figura 4.13	Vista isométrica del mecanismo de alineación M ₄	84
Figura 4.14	Vista lateral del mecanismo de alineación M ₄	85
Figura 4.15	Vista isométrica del mecanismo de alineación M ₅	86
Figura 4.16	Vista lateral del mecanismo de alineación M ₅	87
Figura 4.17	Vista superior del mecanismo de alineación M ₅	88
Figura 4.18	Placa desmontable del mecanismo de alineación M ₅	89
Figura 4.19	Vista isométrica del mecanismo de alineación M ₆	90
Figura 4.20	Placa desmontable del mecanismo de alineación M ₆	91
Figura 4.21	Vista isométrica del mecanismo de ajuste M ₇	92
Figura 4.22	Vista lateral del mecanismo de ajuste M ₇	93
Figura 4.23	Vista isométrica del ensamble SSRB ₁	94

Figura 4.24	Vista lateral del ensamble SSRB ₁	95
Figura 4.25	Vista isométrica del ensamble SSRB ₂	96
Figura 4.26	Vista lateral y frontal del ensamble SSRB ₂	97
Figura 4.27	Vista isométrica del ensamble SSRBG.....	98
Figura 4.28	Vista superior del ensamble SSRBG	99
Figura 4.29	Vista isométrica del brazo B ₁	100
Figura 4.30	Vista isométrica del brazo B ₂	101
Figura 4.31	Vista isométrica del brazo G	102
Figura 4.32	Vista superior y lateral del brazo G.....	103
Figura 4.33	Vista isométrica del pedestal.....	104
Figura 4.34	Vista frontal del pedestal.....	105
Figura 4.35	Ensamble del conjunto lateral del esparcímetro.....	106
Figura 4.36	Ensamble del conjunto central del esparcímetro.....	107
Figura 4.37	Ensamble total del esparcímetro.....	108
 CAPÍTULO 5 AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO		
Figura 5.1	Interfaz de usuario.....	115
Figura 5.2	Bloque de <i>Conexión y referencia</i>	116
Figura 5.3	Bloque de <i>Modo Automático</i>	117
Figura 5.4	Sección de información.....	117
Figura 5.5	Bloque de <i>Modo Manual</i>	118
Figura 5.6	Diagrama del Estado de los ejes y Estado del Experimento	118
Figura 5.7	Diagrama de estados (simplificado) del programa.....	119
Figura 5.8	Pantalla del código del programa	120
Figura 5.9	Pantalla del código del programa	121
Figura 5.10	Corrección del error de <i>backlash</i> del brazo B ₁ en el programa.....	123
 RESULTADOS		
Figura 6.1	Manufactura de uno de los brazos del esparcímetro empleando corte por chorro de agua	128
Figura 6.2	Brazo B ₁ del esparcímetro obtenido después de un proceso de soldadura.....	128
Figura 6.3	Trabajadores del CCADET realizando la soldadura del brazo G.....	129
Figura 6.4	Diversas piezas del esparcímetro obtenidas por medio de CNC	129
Figura 6.5	Proceso de ensamblaje del mecanismo de alineación M ₁	130
Figura 6.6	Proceso de ensamblaje del brazo G al mecanismo de alineación M ₅	131

Figura 6.7	Finalización de la prueba del ensamblaje del equipo	132
Figura 6.8	Ensamblaje del mecanismo de alineación M_5 y los componentes ópticos de láser.....	133
Figura 6.9	Ensamblaje del mecanismo de alineación M_6 y los componentes ópticos del sensor	134
Figura 6.10	Rayo láser emitido a través de los elementos ópticos sujetos en la placa del mecanismo M_1	135
Figura 6.11	Excentricidad presente en la alineación de los elementos ópticos del sensor	135
Figura 6.12	Alineación del eje de giro del servomotor del brazo G. En la parte superior del servomotor se muestra cómo el equipo de metrología midiendo una inclinación cero	136
Figura 6.13	Alineación del eje de giro del mecanismo de sujeción de la muestra.....	137
Figura 6.14	Alineación del mecanismo de giro de la muestra con el eje de giro del brazo G.....	138
Figura 6.15	Gabinete de control que contiene los Servopacks	140
Figura 6.16	Direccionamiento de los cables de los servomotores por medio de canaletas	141

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2 DISEÑO CONCEPTUAL

Tabla 2.1	Especificaciones del esparcímetro.....	27
Tabla 2.2	Carta morfológica	35
Tabla 2.3	Matriz de decisión.....	45

RESUMEN

Se diseñó y construyó un equipo para la obtención automática de lecturas del esparcimiento de la luz en superficies rugosas bidimensionales, con base en las necesidades planteadas por el grupo de Sistemas Ópticos del CCADET de la UNAM. El equipo desarrollado consta de cuatro brazos mecánicos de posicionamiento con movimientos angulares proporcionados por servomotores y controlados por medio de una computadora. Un brazo posiciona el láser a una distancia de 50 centímetros con respecto de una muestra de estudio en un arco de 0° a 180° medidos a partir del plano de la misma. Otro brazo, coloca un sensor a una distancia de 75 centímetros con respecto de la muestra en un arco de 0 a 90° medidos de igual forma que el brazo anterior. El tercer brazo mueve al conjunto de la muestra y el brazo de posicionamiento del láser de 0 a 180° con respecto al centro de la muestra. Este movimiento en conjunto con el brazo anteriormente descrito permite el posicionamiento del sensor en el hemisferio superior al plano de la muestra. Un último movimiento angular es proporcionado a la muestra para eliminar la zona de obstrucción producida por el brazo que posiciona al láser. El equipo es controlado de forma manual y automática con el software desarrollado en este trabajo. En conjunto, estos elementos permiten al equipo alcanzar y superar una resolución angular de 0.25° en el posicionamiento del láser y el sensor, abarcar la totalidad del hemisferio superior al plano de la muestra, posicionar de forma automática y generar un archivo en la computadora para almacenar la información de posición y lectura del sensor.

ABSTRACT

An equipment was designed and built for obtaining readings from light scattering in rough bidimensional surfaces, according to the needs set out by Sistemas Ópticos teamwork in CCADET-UNAM. Developed equipment has four positioning mechanical arms with angular movements given by servomotors and controlled through a computer. One arm position places laser to a 50 centimeters distance from the study sample in a 0° to 180° arc measured from the sample's plane. Another arm, places a sensor to a 75 centimeter distance from sample in a 0° to 90° arc measured likewise previous arm. Third arm moves the sample and laser positioning arm set in a 0° to 180° movement around the sample's center. This movement together with preceding described arm allows the positioning of sensor in upper sample's plane hemisphere. The last angular movement is given to the sample in order to eliminate the obstruction zone produced by laser's positioning arm. Equipment is controlled in manual and automatically way with software development in this work. Altogether, this elements allows equipment achieve and overcome an angular resolution of 0.25° in the laser and sensor positioning, comprise the whole upper sample's plane hemisphere, automatically positioning and generate a file computer for information saving of sensor's position and reading.

OBJETIVO

Desarrollar el prototipo de un instrumento capaz de medir de manera automática el esparcimiento de la luz en superficies rugosas bidimensionales, con el fin de facilitar la obtención de gran cantidad de datos, respondiendo así a las necesidades de los experimentos llevados a cabo por el grupo de sistemas ópticos del CCADET de la UNAM.

v

ALCANCE

Esta tesis se refiere al desarrollo del instrumento. Contempla desde la definición del problema hasta el programa de automatización del esparcímetro y pruebas de funcionamiento.

Las pruebas del equipo bajo experimentos ópticos y los análisis de costos quedan fuera del alcance de este trabajo.

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

A continuación se muestra una descripción para cada uno de los capítulos que constituyen este trabajo:

Capítulo 1. *Antecedentes*

Se da una breve introducción al fenómeno del esparcimiento y polarización de la luz, las matrices de Mueller y los vectores de Stokes. Se describen varias configuraciones de esparcímetros reportados en la literatura y se explica el origen del desarrollo del esparcómetro de este trabajo.

Capítulo 2. *Diseño conceptual*

Se presenta el diseño conceptual del esparcómetro, que incluye: la definición del problema, identificación de necesidades, requerimientos y especificaciones; descomposición funcional del esparcómetro, generación de alternativas de solución y de conceptos. Por último se presenta la selección del concepto.

Capítulo 3. *Diseño de configuración*

Se presentan el desarrollo del concepto seleccionado en el capítulo anterior, se realizan algunas modificaciones y se incorporan nuevos elementos al concepto: Mecanismos de alineación, sensores de referencia y finales de carrea. Se explica la relación entre movimientos angulares de los brazos del esparcómetro y el barrido del sensor para cubrir el hemisferio superior al plano de la superficie de la muestra. Se presentan los elementos que componen los arreglos ópticos del láser y del sensor. Finalmente se presenta la comunicación entre el equipo y la computadora que efectuará el posicionamiento automático para el barrido en los experimentos.

Capítulo 4. *Diseño de detalle*

Se definen los componentes comerciales de los servomotores, reductores de velocidad, sensores de referencia y finales de carrera. Se muestran los diseños finales de los diversos ensambles que constituyen al esparcómetro con una descripción general. Por último se presenta el ensamble completo del esparcómetro.

Capítulo 5. Automatización del equipo

Se describe la forma cómo se comunican los sensores, los *Servopacks* y la computadora del esparcímetro. Se presentan y explican las partes que componen la interfaz de usuario en el programa. Se describe la estructura del programa. Finalmente se explica la secuencia de movimientos y la corrección de errores de *backlash* en el equipo.

Resultados.

Se presentan los resultados obtenidos con el diseño del equipo. Se describen los resultados en la manufactura, el ensamblaje parcial, con los elementos ópticos y de todo el equipo. Se muestran las pruebas del desempeño de los mecanismos de alineación del equipo. Se describe la instalación del cableado y los sensores, se verifica el cumplimiento del rango de movimiento de los ejes de movimiento del esparcímetro.

Conclusiones.

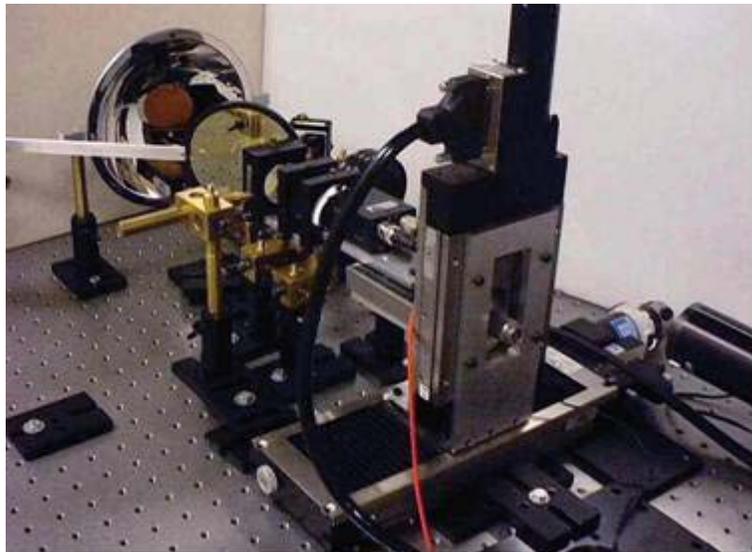
Se presenta la verificación del cumplimiento del objetivo de este trabajo y de los requerimientos del diseño.

x

Trabajo a futuro.

Se enlistan las actividades a futuro para la continuación del desarrollo del esparcímetro y se mencionan algunas de las áreas de oportunidad para la continuación de este trabajo.

Capítulo 1 1
Antecedentes



Arreglo óptico desarrollado en el CCADET para medir el esparcimiento de la luz visible construido con un espejo elíptico (cortesía del Laboratorio de Sistemas Ópticos del CCADET)

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

Se da una breve introducción al fenómeno del esparcimiento y polarización de la luz, matrices de Mueller y Vectores de Stokes. Se describen varias configuraciones de esparcímetros reportados en la literatura y se explica el origen del desarrollo del esparcómetro de este trabajo.

1.1 ESPARCIMIENTO Y POLARIZACIÓN DE LA LUZ.

1.1.1 Esparcimiento de la luz.

El esparcimiento es el fenómeno que se presenta cuando las ondas luminosas son desviadas por obstáculos que tienen un tamaño del mismo orden que la longitud de onda de las ondas incidentes [1].

La luz reflejada en superficies lisas o bien pulidas, como podría ser el caso de un espejo, se desvía en una sola dirección; este fenómeno se conoce como reflexión especular (Figura 1.1).

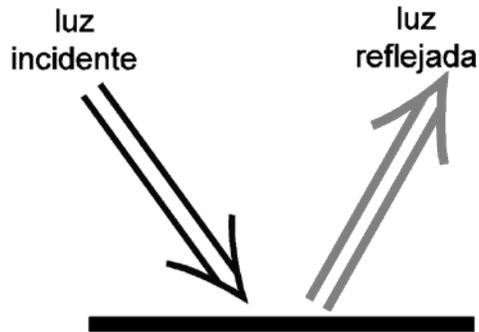


Figura 1.1 Luz reflejada en una superficie lisa.

Por otro lado, se sabe que la mayoría de las superficies de los cuerpos son irregulares, ásperas o rugosas. En este tipo de superficies el fenómeno que ocurre se conoce como reflexión difusa o también llamado *esparcimiento de la luz*, y se debe a que la luz reflejada es enviada en todas las direcciones posibles, como se muestra en las figuras 1.2 y 1.3.

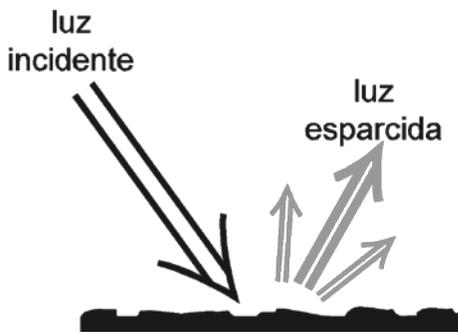


Figura 1.2 Luz esparcida en una superficie poco rugosa.

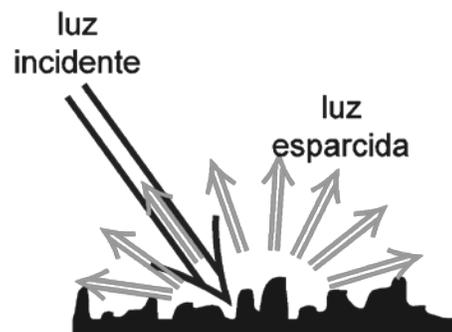


Figura 1.3 Luz esparcida en superficie con mayor rugosidad.

Durante el esparcimiento de luz la energía de un haz de radiación electromagnética es absorbida y vuelta a emitir con cambio de dirección, fase o longitud de onda. Toda radiación electromagnética está sujeta a esparcimiento por el medio (gas, líquido o sólido) a través del cual ésta pasa. De manera más concreta, en este trabajo se denomina esparcimiento de la luz al *cambio en la distribución espacial de un haz de radiación cuando éste interactúa con la superficie de un medio no homogéneo*.

Al incidir una onda plana monocromática sobre una superficie, debido a su rugosidad, la componente paralela del vector de onda incidente no se conserva, por eso todos los campos son esparcidos[2].

Cuando parte de la energía incidente es esparcida hacia el haz incidente se habla de retroesparcimiento, el cual es el coeficiente de esparcimiento difuso de la superficie en la dirección de la fuente o emisor, con la posible excepción de que en incidencia normal el retroesparcimiento es siempre una reflexión difusa y no especular.

1.1.2 Polarización.

La polarización es la alineación de las vibraciones de una onda transversal. Por lo general se consigue eliminando, por filtración, las ondas que tienen otras direcciones [3]. Es una característica de todas las ondas transversales, en éstas la vibración es perpendicular a la dirección de propagación de la onda [4].

Toda fuente real de luz contiene un gran número de moléculas orientadas al azar, de manera tal que la luz emitida es una mezcla aleatoria de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles. La luz de este tipo se describe como luz no polarizada o luz natural [5]. Para obtener luz polarizada a partir de luz natural es posible hacerlo a través de un filtro polarizador, estos se construyen dependiendo de la longitud de onda a tratar.

Un polarizador transmite un mayor porcentaje de la intensidad de las ondas polarizadas paralelas a cierto eje del material polarizador, dicho eje se conoce como eje de polarización [4]. Lo anterior se ilustra en la figura 1.4.

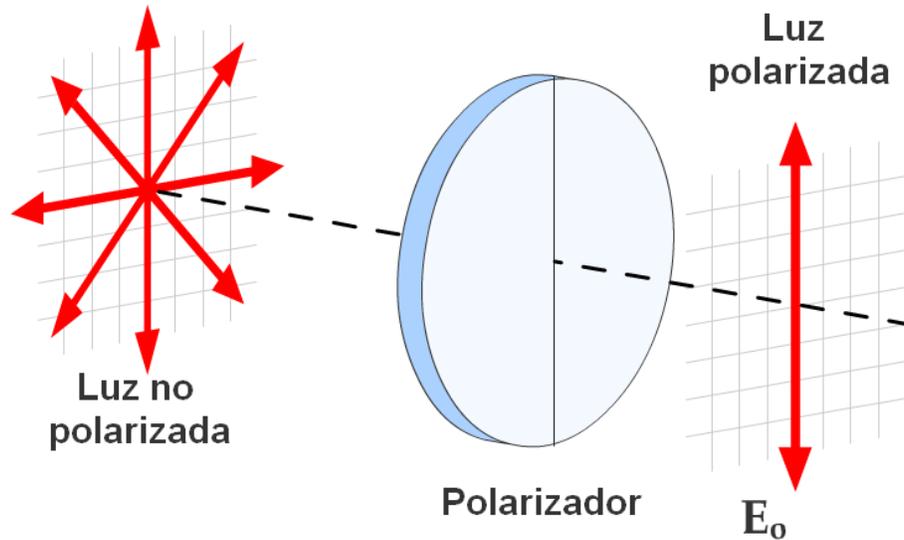


Figura 1.4 Luz polarizada a través de un polarizador [27].

Existen cuatro fenómenos que producen ondas electromagnéticas polarizadas a partir de ondas no polarizadas: absorción, reflexión, esparcimiento y birrefringencia (también llamada doble refracción) [4].

1.2 MEDICIÓN DEL ESPARCIMIENTO DE LA LUZ.

1.2. Procedimiento para medir el esparcimiento de la luz.

Los experimentos para la medición del esparcimiento de la luz consisten en hacer incidir un rayo de luz sobre la muestra o superficie que se desea estudiar y a través del movimiento angular de un sensor, medir la intensidad de la luz reflejada para diferentes posiciones angulares mientras se mantiene fijo el ángulo de incidencia de la luz.



Figura 1.5 Esparcímetero unidimensional de barrido empleado en un laboratorio.

Cortesía de Schmitt Measurement Systems Inc®.

Existen muchos trabajos reportados en la literatura sobre experimentos de esparcimiento de la luz en superficies rugosas, sin embargo, éstos se enfocan al estudio de superficies unidimensionales (Figura 1.6), siendo de interés práctico el estudio de superficies bidimensionales (Figura 1.7).

Una de las razones de la limitación del estudio a las superficies unidimensionales se debe a su mayor complejidad tanto técnica, como de solución analítica y numérica. Para superficies unidimensionales se puede aplicar la aproximación escalar al problema de difracción de ondas electromagnéticas, que en realidad son campos vectoriales. Esto significa que los cambios en la polarización de la luz esparcida no se pueden calcular, y, al esparcir la luz en superficies bidimensionales, por la geometría del problema siempre hay cambios en la polarización [6].

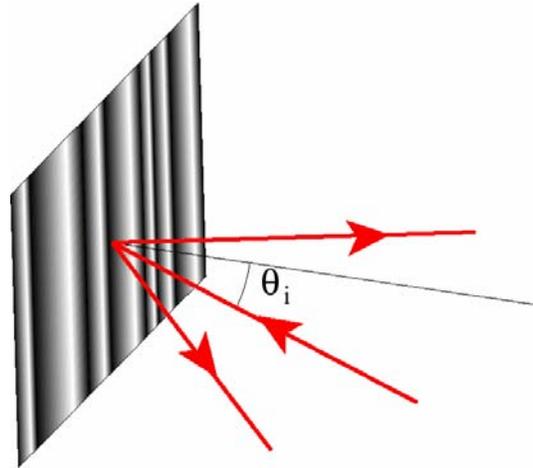


Figura 1.6 Las superficies unidimensionales esparcen la luz en un plano[6].

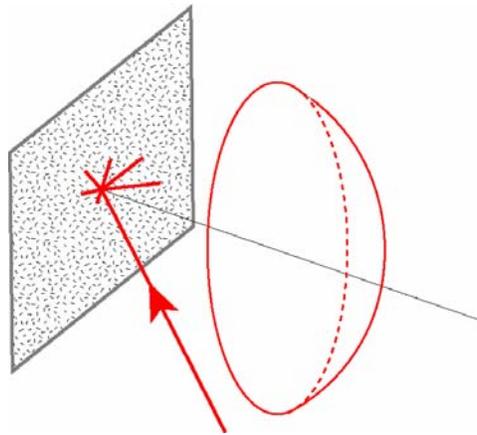


Figura 1.7 Las superficies bidimensionales esparcen la luz en todo un hemisferio[6].

El estudio del esparcimiento de luz por superficies, a pesar de tener una larga historia, sigue siendo un área de investigación activa. Cuando se trata de superficies rugosas aleatorias, el problema se puede dividir, un tanto arbitrariamente, en dos problemas. Uno que tiene que ver con la solución del problema electromagnético para un contorno y unas condiciones de iluminación dada, y el otro que tiene que ver con la caracterización y el modelo estadístico de la superficie. Cabe mencionar que, a escalas de la longitud de onda en el visible, prácticamente todas las superficies son rugosas y aleatorias.

Los métodos clásicos para resolver la parte electromagnética del problema son la aproximación de Kirchhoff, válida para superficies con perfiles y pendientes suaves en comparación con la longitud de onda, y el método de pequeñas perturbaciones, válido para

superficies con variaciones de altura pequeñas en comparación con la longitud de onda. En lo que respecta al problema electromagnético, mucha de la atención reciente se ha centrado en el desarrollo de métodos rigurosos de solución del problema y en la comprensión de los efectos y consecuencias del esparcimiento múltiple [8].

1.2.2 Matrices de Mueller y vectores de Stokes.

La luz polarizada puede ser descrita en términos medibles, mediante cuatro parámetros conocidos como los parámetros de Stokes, nombrados así por los trabajos de George Stokes, quien introdujo una nueva forma de ver el problema al plantearse la descripción de la luz no polarizada en términos de su intensidad y no de su amplitud, como lo habían hecho sus antecesores.

La luz no polarizada tiene la propiedad de que si se coloca un polarizador o un retardador enfrente de la fuente la intensidad transmitida no se ve afectada cuando se gira el polarizador o retardador, sin importar el ángulo de giro.

Hans Mueller propuso una manera de describir las propiedades polarizantes de un elemento óptico general a través de una matriz. La combinación de la matriz de Mueller con los vectores de Stokes permite hacer un estudio formal y sistemático de las propiedades polarizantes de elementos ópticos tales como polarizadores o retardadores con su eje rápido orientado a un ángulo arbitrario.

Si consideramos el vector de Stokes que describe la luz incidente en un elemento óptico, S_i , y le aplicamos la matriz de Mueller del elemento, M , obtendremos otro vector de Stokes, S_0 , que contendrá la información sobre el estado de polarización de la luz que sale de dicho elemento. Matemáticamente esto se expresa de la siguiente manera.

$$S_0 = MS_i \quad (1.1)$$

En general, la matriz de Mueller de un elemento óptico es una matriz de 4x4 en la que sus 16 elementos son distintos e independientes entre sí.

Por otro lado los vectores de Stokes son vectores columna de 4 elementos, de la forma:

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle E_P E_P^* + E_S E_S^* \rangle \\ \langle E_P E_P^* - E_S E_S^* \rangle \\ \langle E_P E_S^* + E_S E_P^* \rangle \\ i \langle E_P E_S^* - E_S E_P^* \rangle \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

En donde el término S_0 es la intensidad total, S_1 está relacionado con la fracción de polarización horizontal y vertical que tiene la luz, S_2 con la fracción de polarización a $+45^\circ$ o -45° y S_3 con la fracción de polarización circular derecha o izquierda que tiene la luz descrita por el vector. El símbolo $\langle \rangle$ indica que se debe tomar el promedio temporal del argumento, y los subíndices P y S indican la componente de polarización del campo, P para componente paralela al plano de incidencia y S para la ortogonal[9].

1.3 TIPOS Y CONFIGURACIONES DE ESPARCÍMETROS

10

La medición de alta precisión del esparcimiento de la luz se realiza apoyada por medio de aparatos construidos para dicho fin, estos son denominados esparcímetros, con ellos se puede obtener información para caracterizar rugosidades superficiales. Los esparcímetros tienen aplicaciones tanto en la industria electrónica [10], automotriz, aeronáutica, en estudios de monitoreo de contaminación ambiental, detección de objetos mediante el uso de radar, percepción remota, identificación de tejidos biológicos [11, 12], detección de impurezas en espejos de telescopio [13], caracterización de superficies [14], calibración de materiales de referencia estándar para uso en metrología [15], entre otras muchas. Los resultados ofrecidos de las mediciones del esparcimiento de la luz son escalables, por lo cual los resultados pueden ser aplicables a costos menores a estudios por satélite y radar.

En general existen dos tipos de esparcímetros empleados en laboratorio para medir la luz esparcida en superficies rugosas. Los primeros constan de un brazo que brinda movimiento angular al sensor en torno a la muestra a estudiar. Los segundos hacen uso de espejos, tanto elípticos, parabólicos, circulares, etc.; para coleccionar la luz esparcida y dirigirla hacia el sensor, y así evitar su desplazamiento angular.

En la literatura existen muchos reportes del uso y diseño de esparcímetros que emplean espejos con diversas geometrías, tales como el reportado por Rinder [23] que emplea un espejo elíptico (Figura 1.8). Otro esparcímetro, empleado por Mattison [24] utiliza un espejo elipsoidal (Figura 1.9). Sistemas más complejos hacen uso de varios espejos, como el descrito en el trabajo de Ford [25] que hace uso de dos espejos elipsoidales (Figura 1.10). Al interior del CCADET de la UNAM se ha diseñado este tipo de esparcímetros como el desarrollado por Rodríguez O[1] que emplea un espejo elíptico (figura 1.11)

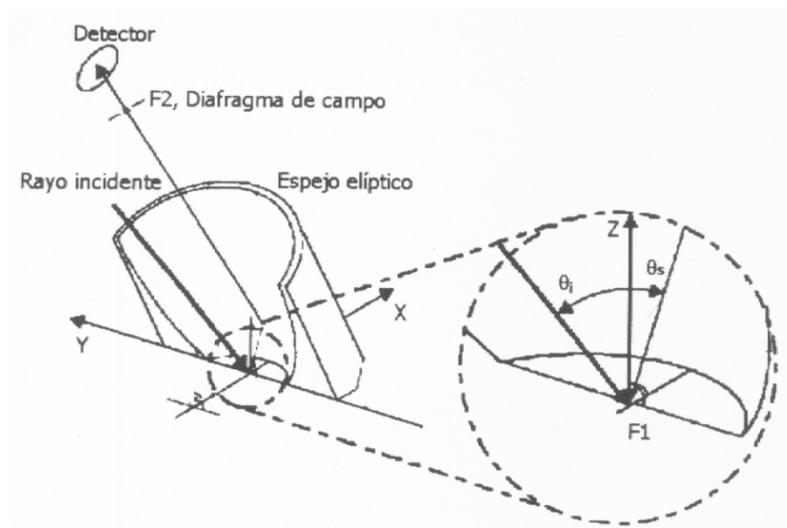


Figura 1.8 Esparcímetro que emplea un espejo elíptico[23].

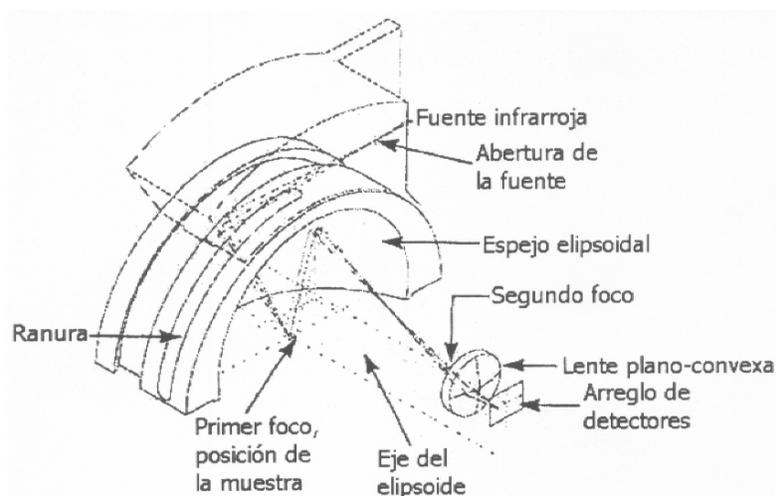


Figura 1.9 Esparcímetro que utiliza un espejo elipsoidal[24].

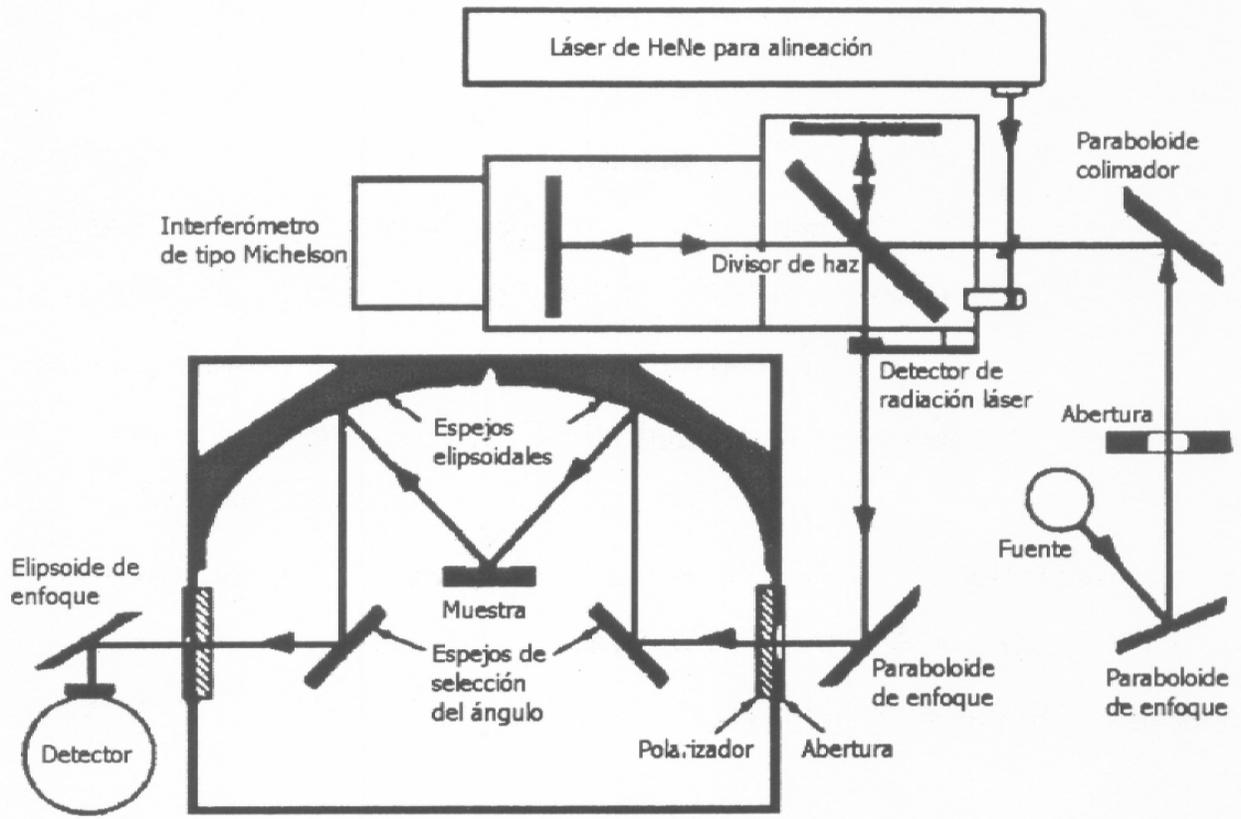


Figura 1.10 Esparcímetero con arreglo de dos espejos elipsoidales[25].

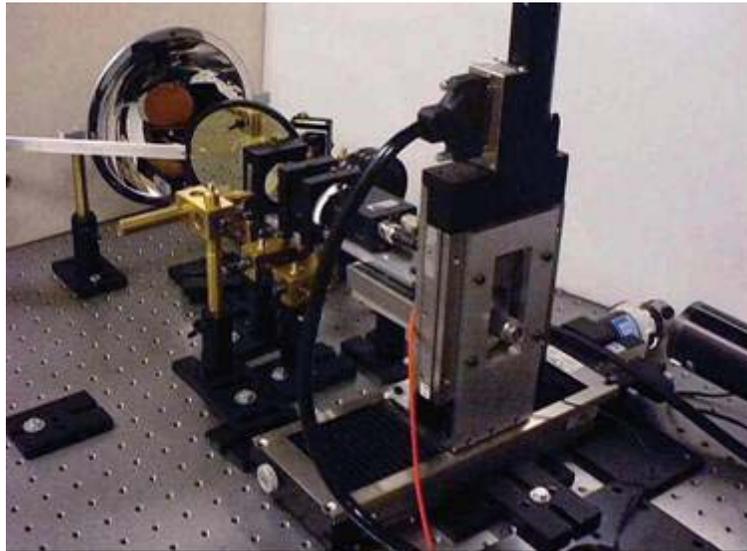


Figura 1.11 Esparcímetero de espejo elíptico desarrollado en el CCADET [1].

En la figura 1.12 se muestra el esquema de un esparcímeter de barrido, en este el sensor gira alrededor de la superficie 180° , con lo cual se posiciona a lo largo de un arco. Con este sistema se pueden tomar lecturas del esparcimiento de la luz únicamente en el plano, por lo cual es útil solamente para superficies unidimensionales.

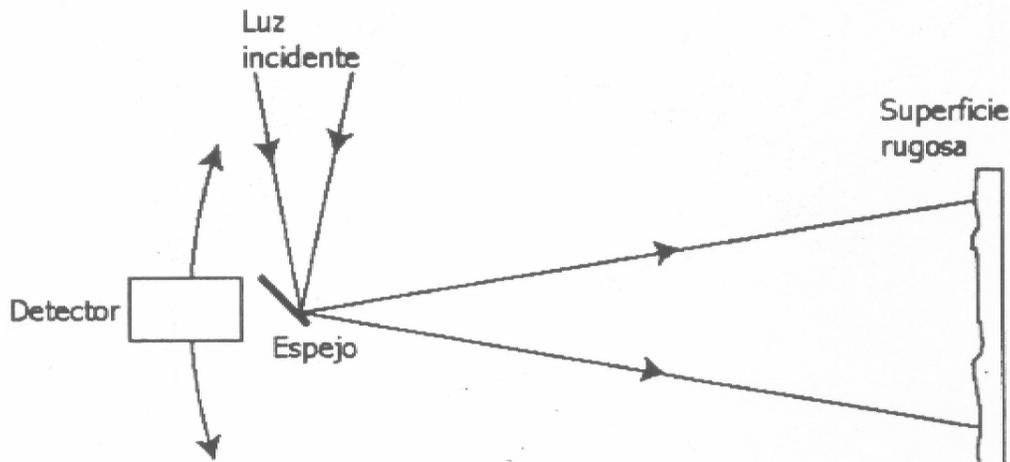


Figura 1.12 Esparcímeter de un brazo para superficies unidimensionales [1].

Ejemplos del desarrollo y uso de estos esparcímetros se pueden encontrar en trabajos como el publicado por Wang [16] donde se emplean dos brazos rotatorios para posicionar tanto al láser como al detector (fotodiodo). Los brazos rotatorios funcionan a través de dos motores conectados a un controlador. Una computadora envía las señales al controlador de los motores para dirigir los movimientos, activa las señales del láser y recolecta la información del fotodiodo (por medio de etapas electrónicas de acondicionamiento de las señales). En la imagen 1.13 se puede apreciar cómo está configurado este esparcímeter.

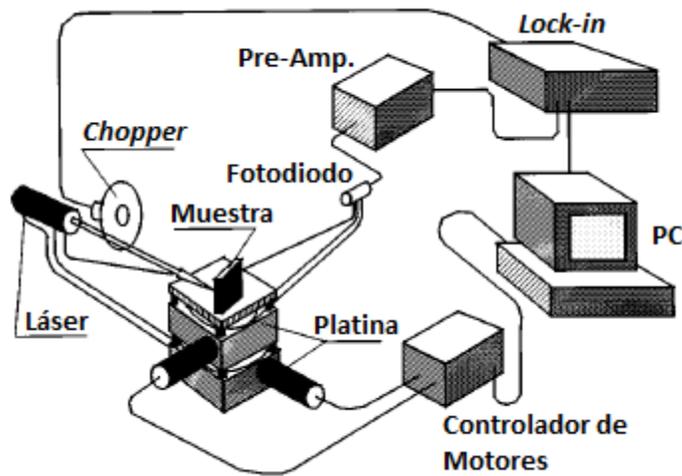


Figura 1.13 Configuración del esparcímeter reportado por Wang H [16].

En otra configuración, como la presentada por Ramírez-Duverger [18] (Figura 1.14), se emplean únicamente un brazo para colocar angularmente el sensor (D2), se mantiene fijo el láser incidente (L) y la muestra es movida angularmente para variar el ángulo de incidencia del láser. Al igual que la configuración anterior, se emplean dos motores, una tarjeta de control para los motores y una computadora.

14

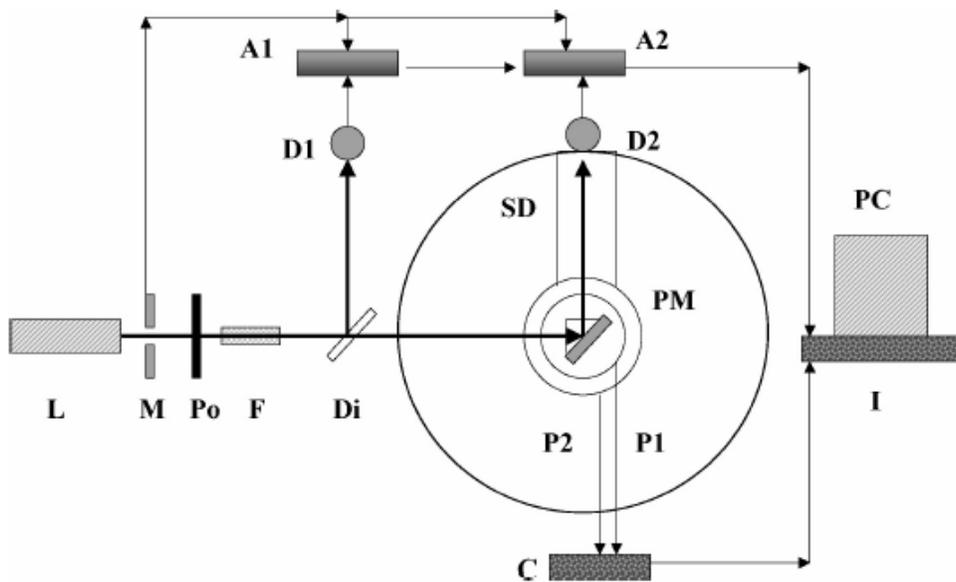


Figura 1.14 Esquema del esparcímeter reportado por Ramírez-Duverger A. [18].

En la actualidad existen equipos comerciales de esparcímetros de barrido para superficies unidimensionales, como el que ofrece Schimitt Measurement Systems Inc ® el cual trabaja con luz del ultravioleta al infrarrojo, su principal uso es para pruebas no destructivas, tales como medición de la calidad de superficies, rugosidad, defectos, contaminación. Como se puede observar en la Figura 1.15, su funcionamiento está basado en una configuración como la empleada en el trabajo de Ramírez-Duverger.



Figura 1.15 Esparcómetro comercial SMS CASI. *Cortesía de Schmitt Measurement Systems Inc®.*

En la literatura se reporta el desarrollo de esparcímetros angulares bidimensionales, como el presentado por Shen [19] (Figura 1.16). El cual consta de 3 movimientos rotatorios (α , β , γ), en este aparato el rayo de luz incidente se mantiene fijo, se proporciona movimiento angular a la muestra (α) (colocada de forma vertical) con ello se hace variar el ángulo de incidencia sobre la muestra. El posicionamiento del detector se realiza por medio de dos movimientos angulares (β , γ) transmitidos por medio de dos brazos. Los ejes tanto de los movimientos angulares (α , β , γ) así como del ángulo incidente tienen como punto común el punto O del porta-muestras. Todos los movimientos angulares son independientes entre sí. Con este equipo se pueden tomar muestras en todo el hemisferio superior al plano de la muestra.

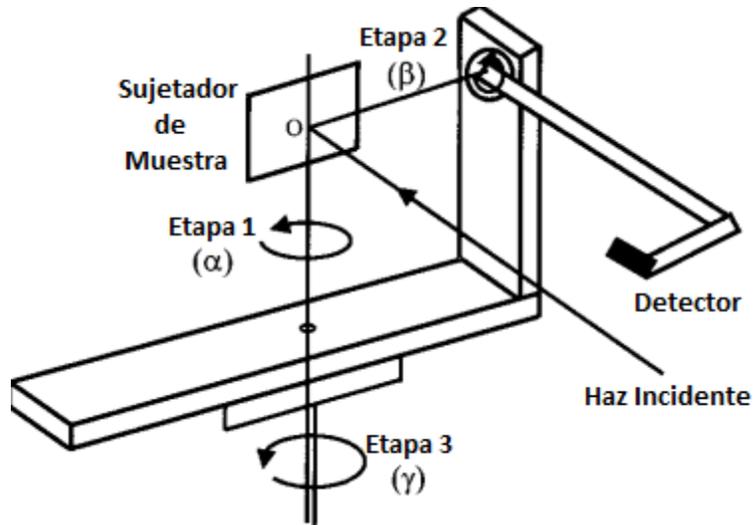


Figura 1.16 Esquema del esparcímetero presentado por Shen Y.J. [19].

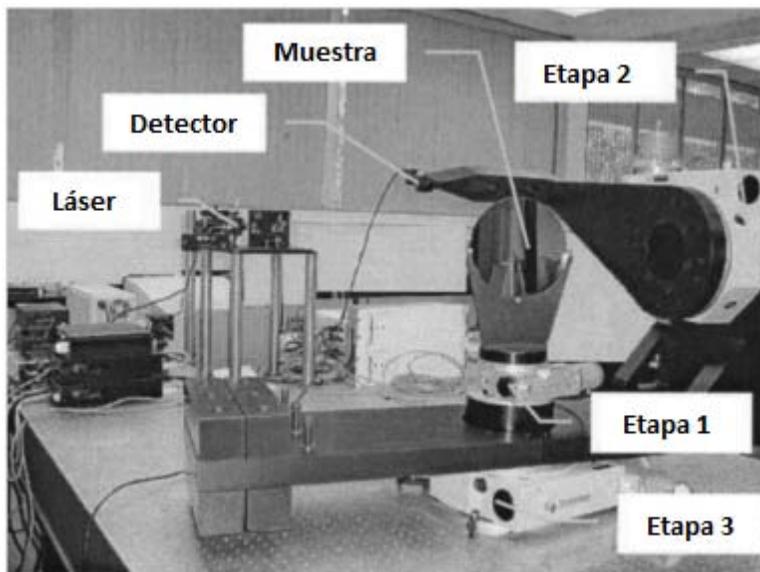


Figura 1.17 Esparcímetero descrito por Shen [19] en operación.

Una configuración de esparcímetero comercial muy utilizada es la que realiza la compañía Schmitt Measurement Systems Inc®. (antes TMA technologies, Inc.) cuyo funcionamiento está reportado por Bahar [22] y en algunos artículos de la NASA [17] (Figura 1.18)

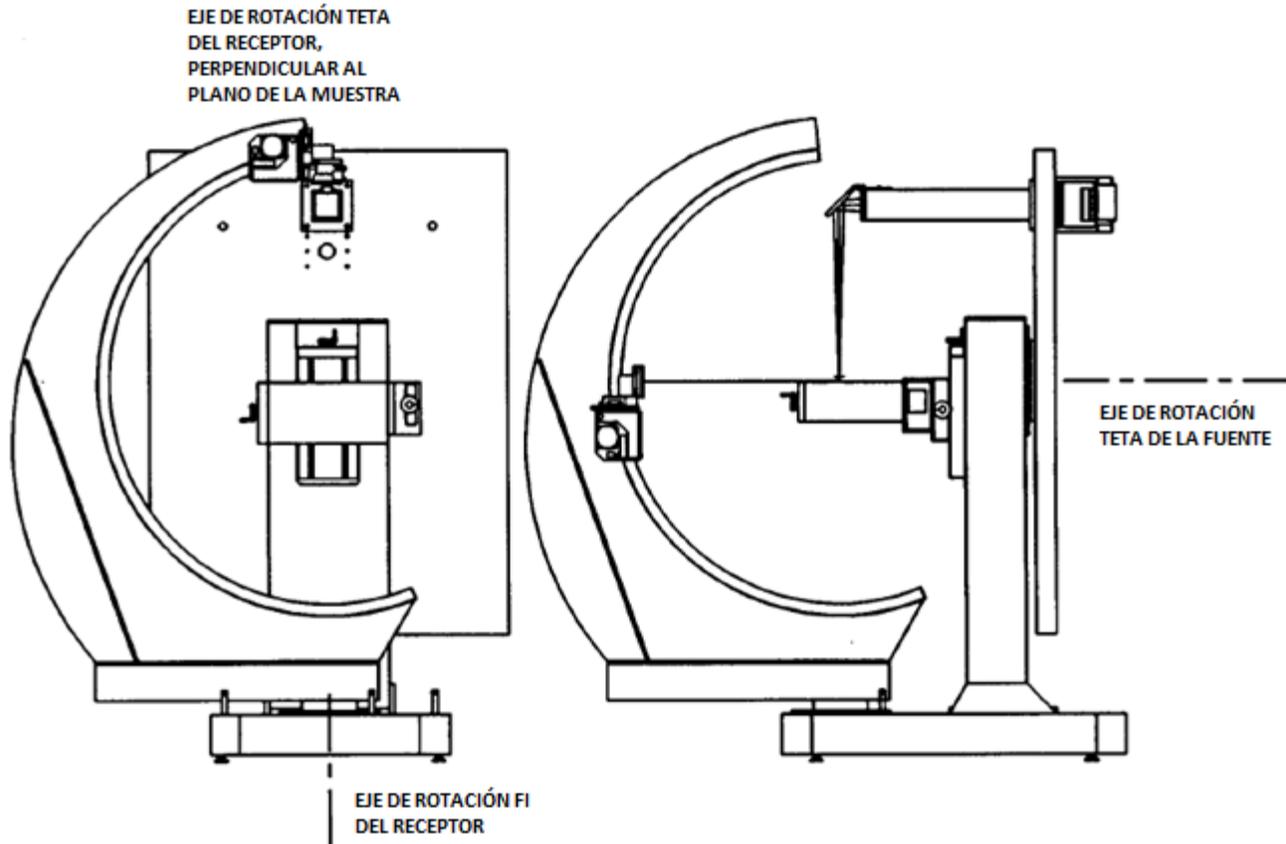


Figura 1.18 Esparcímetro de la compañía Schmitt Measurement Systems®[17].

Este equipo es utilizado para medir los 16 elementos de la matriz de Mueller para cualquier ángulo de incidencia en la totalidad del ángulo sólido de 4π (tanto el hemisferio superior, como inferior al plano de la muestra para incluir tanto reflexión y transmisión).

El equipo consta de una tabla óptica, que soporta todos los arreglos para hacer enviar un rayo láser a través de un brazo que contiene un espejo en el extremo y con el cual se hace incidir sobre la muestra. Un sujetador mantiene fija a la muestra en una posición horizontal, éste posee varios ajustes de posicionamiento para centrar la superficie de la muestra a estudiar. Posee un brazo en forma de arco, con un riel a través del cual corre la parte de detección, con el que se puede hacer un barrido de 180° (ángulo de elevación), este brazo gira alrededor de la muestra 180° (ángulo azimutal) y con ello se consigue el barrido de 4π en el ángulo sólido.

Las señales para el posicionamiento de los elementos del esparcímetero, así como la toma de señales ópticas y los cálculos relacionados con la Matriz de Mueller son ejecutados por medio de una computadora. Otra de las características adicionales de este equipo es que puede medir además el retroesparcimiento.

1.4 ORIGEN DE LA SOLICITUD DEL DESARROLLO DEL ESPARCÍMETRO

En este trabajo se presenta el diseño de un esparcímetero acorde a los requerimientos de los experimentos llevados a cabo por el grupo de Sistemas Ópticos del CCADET de la UNAM. La propuesta corresponde al proyecto planteado por el Dr. Neil C. Bruce Davidson, cuyo diseño se realizó con la colaboración de la sección de Desarrollo de Prototipos del mismo centro.

El diseño de este equipo se construyó en el taller del centro, se pondrá en operación en laboratorio del grupo de Sistemas Ópticos y servirá como herramienta para comprobar experimentalmente los desarrollos teóricos que lleva a cabo el grupo, tales como la obtención de la matriz de Mueller y métodos modificados de la aproximación de Kirchhoff para calcular la luz esparcida en superficies rugosas bidimensionales con pendientes infinitas. A diferencia del esparcímetero de espejo elíptico realizado con anterioridad en el centro, este nuevo esparcímetero podrá trabajar con la polarización de la luz, área en la cual no pueden trabajar los esparcímetros que hacen uso de espejos para la recolección de la luz.

En la figura 1.19 se observa la idea original planteada por el Dr. Bruce para llevar a cabo el diseño del equipo. Como se mostrará más adelante, parte de esta configuración está plasmada en el diseño final del equipo.

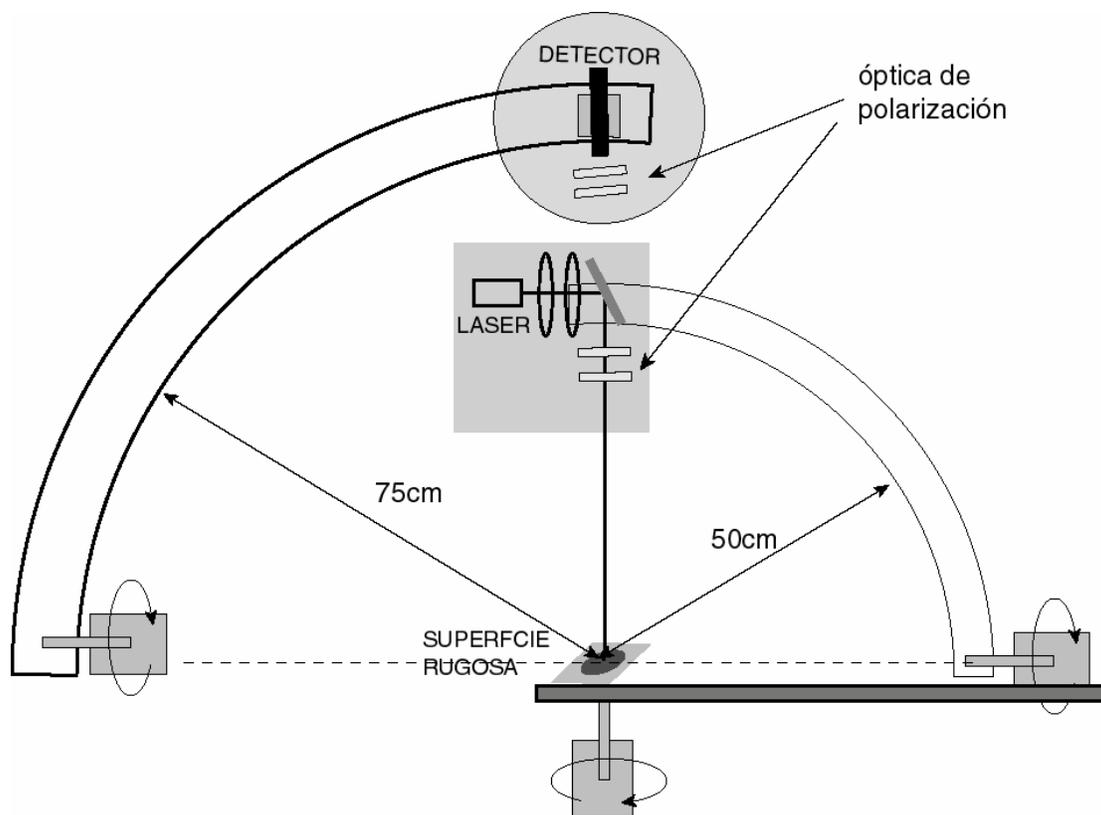


Figura 1.19 Esquema preliminar del esparcímetero polarimétrico diseñado. [6].

Capítulo 2
Diseño Conceptual



Esquemas de la generación de conceptos para el esparcómetro.

CAPÍTULO 2 DISEÑO CONCEPTUAL

Se presenta el diseño conceptual del esparcómetro, que incluye: la definición del problema, identificación de necesidades, requerimientos y especificaciones; descomposición funcional del esparcómetro, generación de alternativas de solución y de conceptos. Por último se muestra la selección del concepto.

2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

2.1.1 Identificación de necesidades

Por medio de una entrevista realizada al Dr. Neil C. Bruce Davidson (investigador del CCADET quien solicitó el desarrollo del esparcómetro) se obtuvieron los siguientes enunciados para el equipo a diseñar:

1. "El aparato va servir para medir la luz esparcida en superficies rugosas".
2. "El aparato mide la cantidad de luz esparcida como función del ángulo en todo el hemisferio arriba de la superficie".
3. "Se requiere variar el ángulo de incidencia de la luz sobre la superficie".
4. "Se va emplear un láser de sólo una longitud de onda".

5. "El detector necesita barrer todo el hemisferio y captar la luz reflejada como función del ángulo".
6. "Se va a medir la polarización de la luz para obtener la matriz de Mueller".
7. "El esparcómetro va a estar en el laboratorio de esparcimiento de la luz del CCADET"
8. "Se podrá utilizar la mitad del laboratorio para poner a funcionar el esparcómetro, el cual es de 6x 4 metros".
9. "El esparcómetro preferentemente debe tener un color negro".
10. "El esparcómetro puede ir anclado al piso del laboratorio, no es necesario que sea transportable".
11. "Se tienen tomas de corriente eléctrica de 127 y 220 [V] para que el esparcómetro trabaje".
12. "La resolución del equipo debe de ser de un cuarto de grado para cada elemento".
13. "Se puede tener un error de aproximadamente +/- una centésima de grado".
14. "No hay un límite de tiempo para tomar las mediciones".
15. "Se planea dejar funcionando el equipo sólo".
16. "No se necesita seguir una trayectoria en específico".
17. "Las mediciones se toman cuando el equipo no está en movimiento".
18. "El programa debe contener información del rango de trabajo para realizar todo el barrido en esa región".
19. "El programa debe almacenar la información de las lecturas del sensor con los datos de la posición".
20. "No se requiere de ningún *software* en especial para realizar el programa del esparcómetro".
21. "El grosor máximo de las muestras es de aproximadamente 3 cm".
22. "El presupuesto máximo para el esparcómetro es de 250 mil pesos".

A raíz de esta entrevista, surgieron dudas que llevaron a la identificación de otras necesidades que habían sido omitidas, mediante consultas posteriores, se agregaron las siguientes necesidades:

23. "El láser se debe localizar a una distancia de la muestra de aproximadamente 50 cm".
24. "El sensor debe estar a una distancia de la muestra de 75 cm aproximadamente".

25. "El láser se debe de posicionar de 0 a 180° respecto al plano de la muestra".
26. "El tiempo de espera para la lectura del sensor es variable".

2.1.2 Definición de requerimientos.

Con base en la información de las necesidades identificadas, se llegó a la siguiente lista de requerimientos.

1. El esparcímetero mide la luz polarizada esparcida en superficies rugosas como función del ángulo en el hemisferio superior.
2. El esparcímetero posiciona al láser en un rango de 0 a 180 [°].
3. El esparcímetero posiciona al láser a una distancia de al menos 50 [cm] con respecto al punto de incidencia de la muestra.
4. El esparcímetero posiciona al sensor en todo el hemisferio superior al plano de esparcimiento de la muestra.
5. El esparcímetero posiciona al sensor a una distancia de al menos 75 [cm] con respecto al punto de incidencia de la muestra.
6. El esparcímetero tiene sólo una fuente de luz incidente.
7. El esparcímetero funciona en el laboratorio de esparcimiento de la luz del CCADET.
8. El esparcímetero es de piezas de colores oscuros.
9. El esparcímetero es fijo.
10. El esparcímetero funciona por medio de una toma de corriente eléctrica de 127 y/o 220 [Vca].
11. El esparcímetero posiciona al láser con una resolución de 0.25 [°].
12. El esparcímetero posiciona al sensor con una resolución de 0.25 [°].
13. El esparcímetero posiciona al láser con una tolerancia de 0.01 [°].
14. El esparcímetero posiciona al sensor con una tolerancia de 0.01 [°].
15. El esparcímetero recolecta la información del sensor por medio de una computadora.
16. El esparcímetero brinda la opción de establecer el rango de barrido del sensor al usuario para los experimentos.
17. El esparcímetero brinda la opción de establecer el paso del barrido del sensor al usuario.

18. El esparcómetro almacena la información del sensor asociándola con la posición del mismo.
19. El esparcómetro tiene espacio para el uso de muestras de al menos 3 cm de grosor.
20. El esparcómetro funciona de forma automática.
21. El esparcómetro es de dimensiones inferiores a las del espacio disponible en el laboratorio del CCADET.
22. El esparcómetro realiza la toma de lecturas del sensor cuando está detenido.
23. El esparcómetro tiene encendido manual de los componentes ópticos del láser.
24. El esparcómetro tiene encendido manual de los componentes del sensor.
25. El esparcómetro tiene tiempo indefinido para el posicionamiento del láser.
26. El esparcómetro tiene tiempo indefinido para el posicionamiento del sensor.
27. El esparcómetro espera la toma de la lectura el tiempo especificado por el usuario.
28. El esparcómetro tiene piezas en su mayoría manufacturables en el taller del CCADET.
29. El desarrollo del diseño del esparcómetro es menor a 250 mil pesos*
30. El esparcómetro tiene una zona de obstrucción del sensor menor a 1 [°] en la dirección de un desplazamiento angular.

2.1.3 Especificaciones.

Con la lista de requerimientos se establecieron las especificaciones a cubrir con el diseño del esparcómetro, las cuales se muestran en la tabla 2.1.

Las especificaciones se agrupan en 8 grupos: geometría, cinemática, energía, operación, señales, material, producción y costos.

*Aunque en este trabajo no se incluyen los costos de la construcción del equipo se procuró cumplir con este requerimiento.

No.	Especificación	Valor	Unidades	Tolerancia	Tipo	Fuente	Observaciones	Requerimientos
1	Resolución de la posición angular del láser	0.25	[°]	+/- 0.01	Geometría	Cliente		1, 11, 13
2	Resolución de la posición angular del sensor	0.25	[°]	+/- 0.01	Geometría	Cliente		1, 12, 14
3	Rango de posición angular del láser	0.25	[°]	-----	Geometría	Cliente	El ángulo polar es aquel entre el sensor y el plano de la muestra	1, 2
4	Rango de posición angular azimutal del sensor	0 a 360	[°]	-----	Geometría	Cliente		1, 4
5	Rango de posición angular polar del sensor	0 a 180	[°]	-----	Geometría	Cliente		4
6	Distancia del láser al punto de incidencia de la muestra	50	[cm]	+10	Geometría	Cliente		3
7	Distancia del sensor al punto de incidencia de la muestra	75	[cm]	+10	Geometría	Cliente		5
8	Capacidad máxima de grosor de la lectura	3	[cm]	-----	Geometría	Cliente		19
9	Área de obstrucción del sensor	1	[°]	-----	Geometría	Cliente	El bloqueo del conjunto de componentes ópticos del láser no se incluye	30
10	Área de operación del equipo	3 x 2	[m]	-----	Geometría	Mediciones en el sitio		7, 9, 21
11	Altura máxima del equipo	3	[m]	-----	Geometría	Mediciones en el sitio		7, 9, 21
12	Tiempo máximo de posicionamiento del láser	60	[s]	-----	Cinemática	Diseñador		25
13	Tiempo máximo de posicionamiento del sensor	30	[s]	-----	Cinemática	Diseñador		26
14	Alimentación del equipo	127 / 220	[Vca]	+/- 10%	Energía	Cliente		10

Tabla 2.1 Especificaciones del esparcómetro (parte 1/2).

No.	Especificación	Valor	Unidades	Tolerancia	Tipo	Fuente	Observaciones	Requerimientos
15	Asociación de posicionamiento angular y lectura del sensor	Sí	----	----	Operación	Ciente		18
16	Funcionamiento del esparcímetro	Automático	----	----	Operación	Ciente		20, 22
17	Encendido del láser y el sensor	Manual	----	----	Operación	Ciente		23, 24
18	Incluye opción de tiempo de espera para la lectura del sensor	Sí	----	----	Operación	Ciente		27
19	Opción para establecer rango en el barrido de los experimentos	Sí	----	----	Operación	Ciente		16
20	Opción de ingresar el paso en el barrido del sensor	Sí	----	----	Operación	Ciente		17
21	Equipo fijo al suelo del laboratorio	Sí	----	----	Operación	Ciente		9
22	Almacenamiento de la información en una computadora de escritorio	V	[V/F]	----	Señales	Ciente		15
23	Color de las piezas del equipo	Negro	----	-----	Material	Ciente	Solo aquellas que pueden tener interacción con la luz esparcida	8
24	Manufacturable en el taller del CCADET	Sí	[V/F]	----	Producción	Ciente		28
25	Costo máximo del equipo	250,000	\$	----	Costos	Ciente		29

Tabla 2.1 Especificaciones del esparcímetro (parte 2/2).

2.2 Descomposición funcional.

Una vez establecidas las especificaciones del equipo, se realizó la descomposición funcional del equipo. El primer paso fue determinar la función principal, la cual quedó enunciada como: "Recopilar de forma automática información del esparcimiento de la luz en superficies bidimensionales rugosas".

Se identificaron como entradas del sistema: el arreglo de elementos ópticos del láser, el cual por simplicidad se menciona como Láser; el arreglo de elementos ópticos del sensor, indicado sólo como sensor; la muestra a estudiar, la información del experimento brindada por el usuario (ángulo de incidencia, rango y paso de las lecturas, etc.) y energía eléctrica.

Como salidas del sistema se identificó al láser posicionado, al sensor posicionado, a la muestra posicionada, la información del esparcimiento y la información de la posición relativa del láser y el sensor. En la Figura 2.1 se ilustra esta descripción.

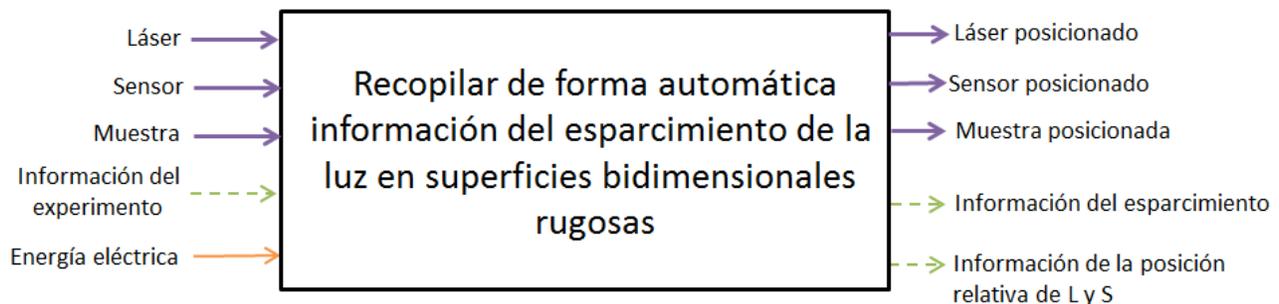


Figura 2.1 Función principal del esparcímetero.

Con base en la información de los requerimientos del cliente, se identificaron las siguientes subfunciones del equipo:

1. Sujetar el láser
2. Sujetar el sensor
3. Sujetar la muestra
4. Posicionar el láser

5. Posicionar el sensor
6. Posicionar la muestra
7. Determinar posiciones
8. Proporcionar información de las posiciones relativas del láser y del sensor
9. Tomar lecturas del sensor
10. Guardar lecturas del sensor.

La descripción de estas subfunciones es la siguiente:

Sujetar láser. Sujeta al conjunto de elementos empleados para hacer incidir el rayo láser.

Sujetar sensor. Sujeta al conjunto de elementos empleados para realizar la toma de las lecturas incluido el sensor.

Sujetar muestra. Sujeta la muestra de la superficie sobre la que se realizarán las mediciones del esparcimiento de la luz.

Posicionar láser. Posiciona al láser con el ángulo de incidencia especificado por el usuario a la distancia especificada (50 cm).

Posicionar sensor Posiciona al sensor en los dos ángulos correspondientes al hemisferio superior (azimutal y polar) a la distancia (75 cm) especificada.

Posicionar muestra Ajusta la muestra a la altura adecuada para que la superficie de estudio quede en el plano de esparcimiento del equipo y con la rotación adecuada para la toma de mediciones del equipo.

Determinar posiciones Genera la información sobre las posiciones angulares que deben alcanzar el láser, el sensor y la muestra para llevar a cabo las mediciones del esparcimiento de la luz en todos los puntos contenidos dentro del rango y con el paso especificados por el usuario.

Proporcionar información de las posiciones relativas del láser y del sensor Transmite la información de las posiciones relativas del láser y del sensor con respecto del plano de incidencia de la muestra y envía la información al usuario.

Tomar lecturas del sensor Solicita y recopila la información leída del sensor.

Guardar lecturas del sensor Guarda la información leída del sensor y la asocia a la posición relativa del láser y del sensor.

En la figura 2.2 se muestra la descomposición funcional del equipo.

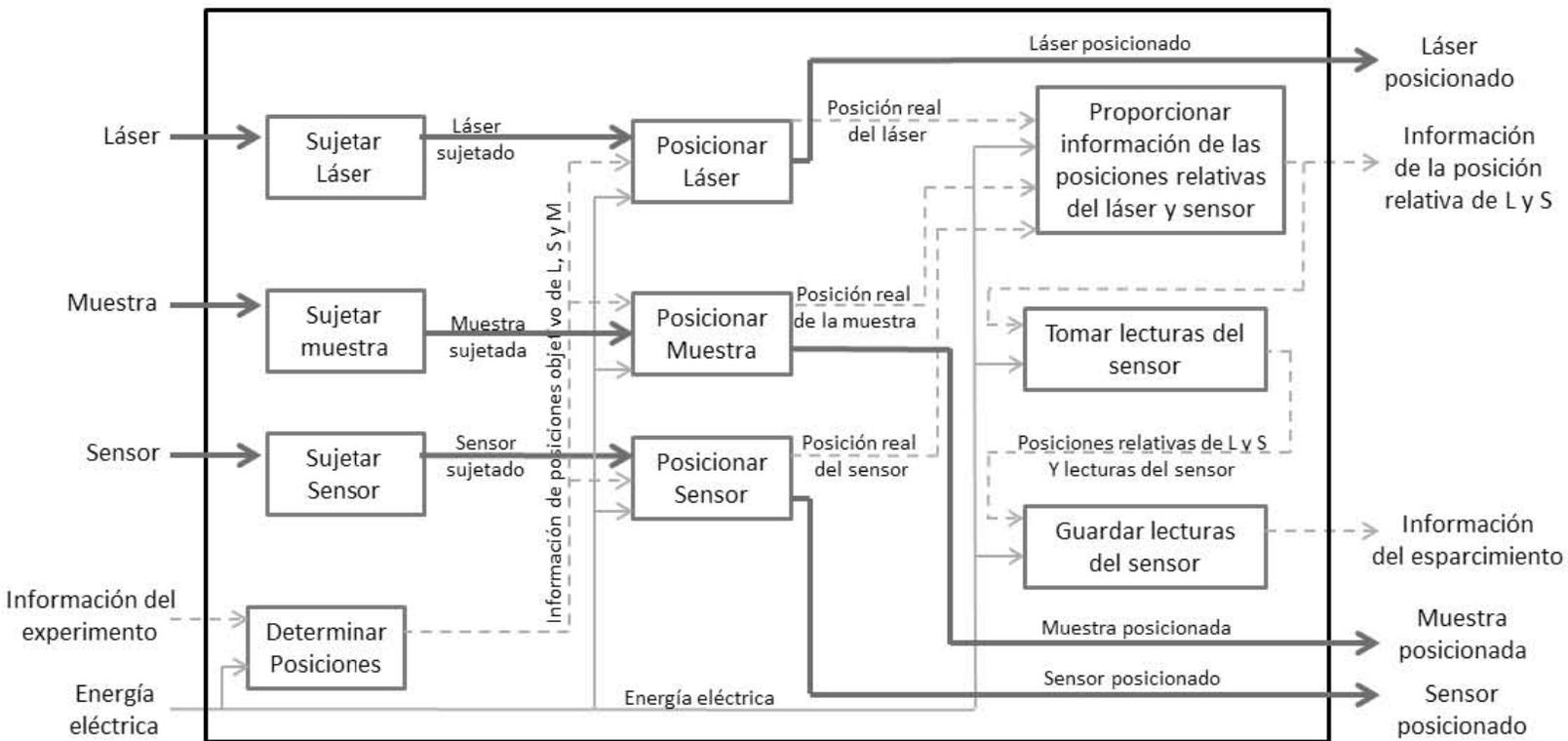


Figura 2.2 Descomposición funcional del equipo.

2.3 Alternativas de solución.

Una vez realizada la descomposición funcional del equipo, se procede a la generación de alternativas de solución para cada una de las subfunciones, con estas alternativas se realiza la generación de conceptos.

Para el diseño de este equipo sólo se consideran las subfunciones *Posicionar láser* y *Posicionar sensor*, para la generación de conceptos. Debido a que son las subfunciones de mayor importancia, de mayor dificultad y son las que, en gran medida, determinan el diseño final del equipo.

La subfunción *Posicionar sensor* es dividida, ya que implica dos posicionamientos angulares, razón por la cual, para la generación de conceptos se tomará en cuenta como: *Posicionar sensor azimutalmente* (giro en el plano horizontal) y *Posicionar sensor polarmente* (Giro respecto al plano horizontal).

La subfunción *Posicionar muestra* no está incluida ya que es dependiente de la forma cómo sean resueltas las subfunciones Posicionar láser y Posicionar sensor, cómo se explicará más adelante en los conceptos generados.

Las subfunciones *Sujetar láser*, *Sujetar sensor* y *Sujetar muestra* son de resolución más sencilla y el margen de generación de alternativas de solución para estas funciones queda sumamente limitado por la geometría de los componentes, el arreglo y el ordenamiento de los componentes ópticos.

Las subfunciones que involucran el uso y transformación de información, cómo: *Determinar posiciones*, *Proporcionar información de las posiciones relativas del láser y del sensor*, *Tomar lecturas del sensor* y *Guardar lecturas del sensor* han sido omitidas de las alternativas de solución debido a que no influyen directamente en la generación de conceptos para un diseño que involucra elementos mecánicos. Siendo estas subfunciones parte de la automatización del equipo ejecutada por medio de una computadora (tal y como se definió en los requerimientos del equipo).

Posicionar láser

Movimiento angular sobre un riel semicircular.

Movimientos lineales cartesianos con rotación en el efector final.

Brazo con movimiento angular.

Posicionar sensor azimutalmente

Movimiento angular sobre un riel semicircular.

Movimientos lineales cartesianos con rotación en el efector final.

Brazo con movimiento angular.

Posicionar sensor polarmente

Movimiento angular sobre un riel semicircular.

Movimientos lineales cartesianos con rotación en el efector final.

Brazo con movimiento angular.

Con estas alternativas de solución para el posicionamiento del láser y del sensor se tiene la carta morfológica mostrada en la tabla 2.2

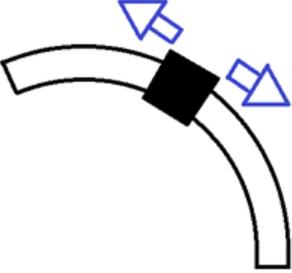
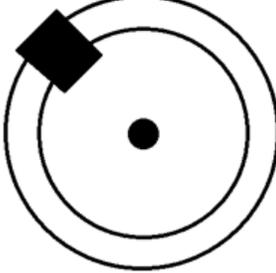
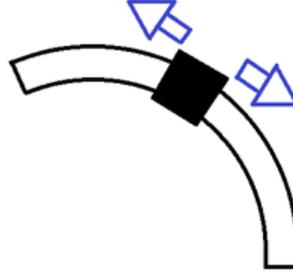
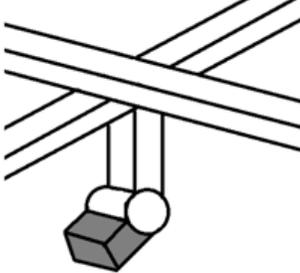
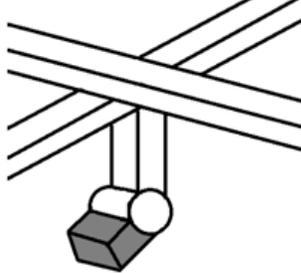
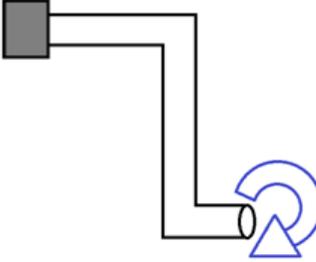
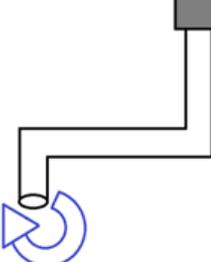
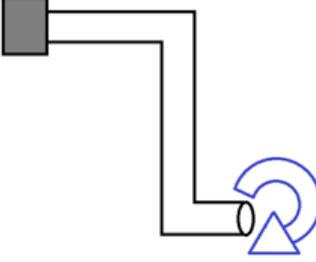
<i>Posicionar láser</i>	<i>Posicionar sensor azimutalmente</i>	<i>Posicionar sensor polarmente</i>
		
		
		

Tabla 2.2 Carta morfológica (empleando las subfunciones más importantes).

2.4 Generación de conceptos.

A continuación se presentan algunos de los conceptos generados con las alternativas de solución presentadas en la carta morfológica.

Concepto L1A1P1 (a y b)

El láser se desplaza por un riel en forma de arco. Este concepto genera dos ideas considerando la misma alternativa de solución. En la primera, un riel desplaza a otro riel en un plano. En la segunda, los dos rieles son articulados por un carro, se permite el libre giro de los arcos.

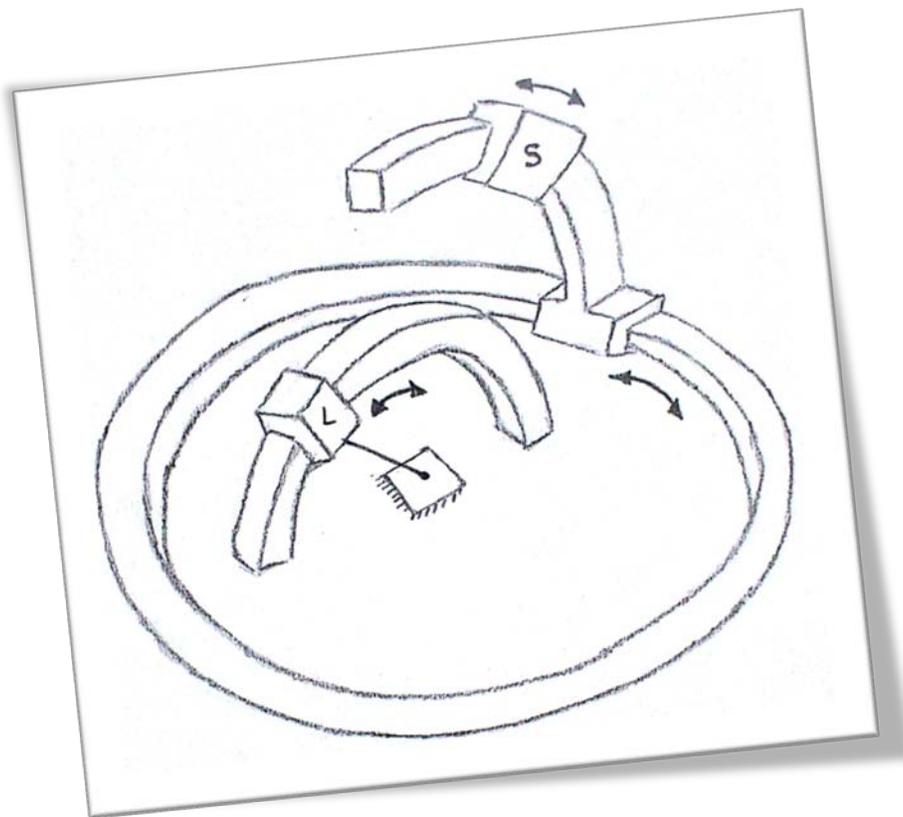


Figura 2.3 Concepto L1A1P1a

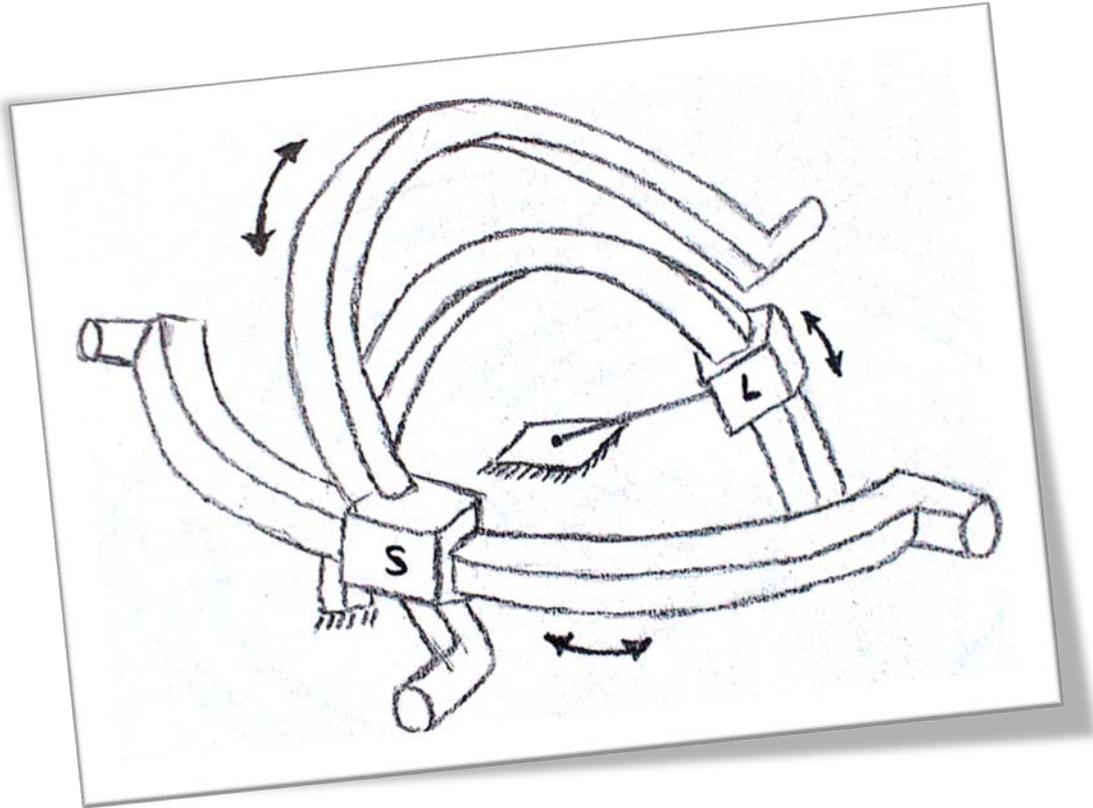


Figura 2.4 Concepto L1A1P1b

Concepto L1A1P3

El láser se desplaza por un riel en forma de arco, el sensor es posicionado por la combinación de un riel en el plano y un brazo que gira angularmente.

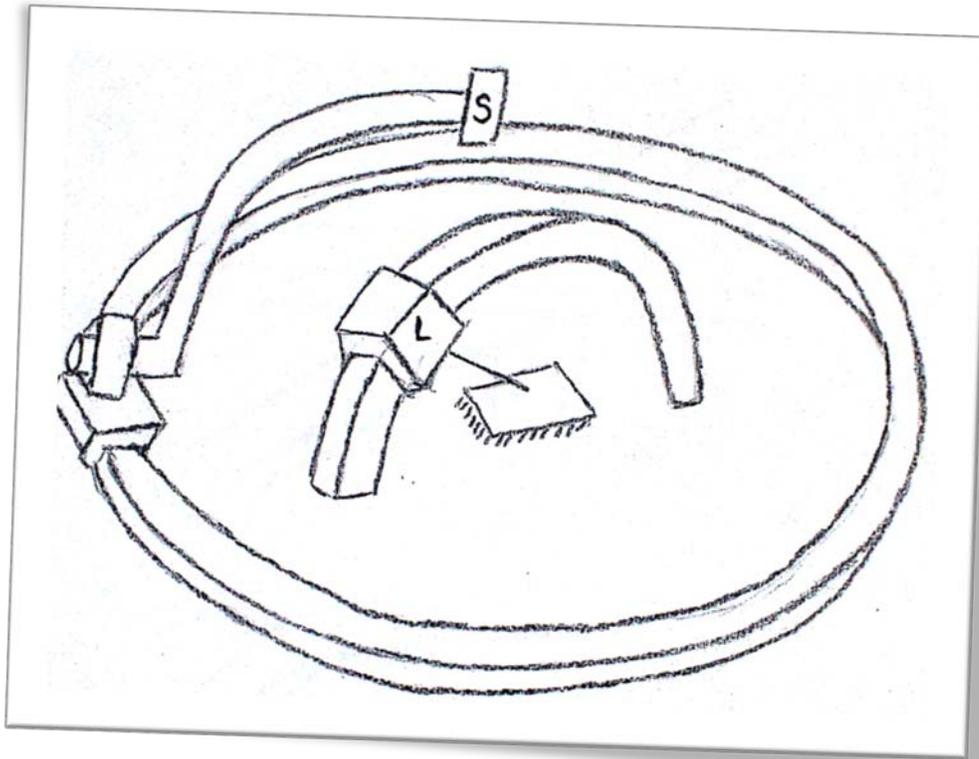


Figura 2.5 Concepto L1A1P3

Concepto L1A2

El láser se desplaza por un riel en forma de arco, el sensor es posicionado por guías cartesianas superpuestas y articuladas, giros en el efector final orientan al sensor hacia la muestra.

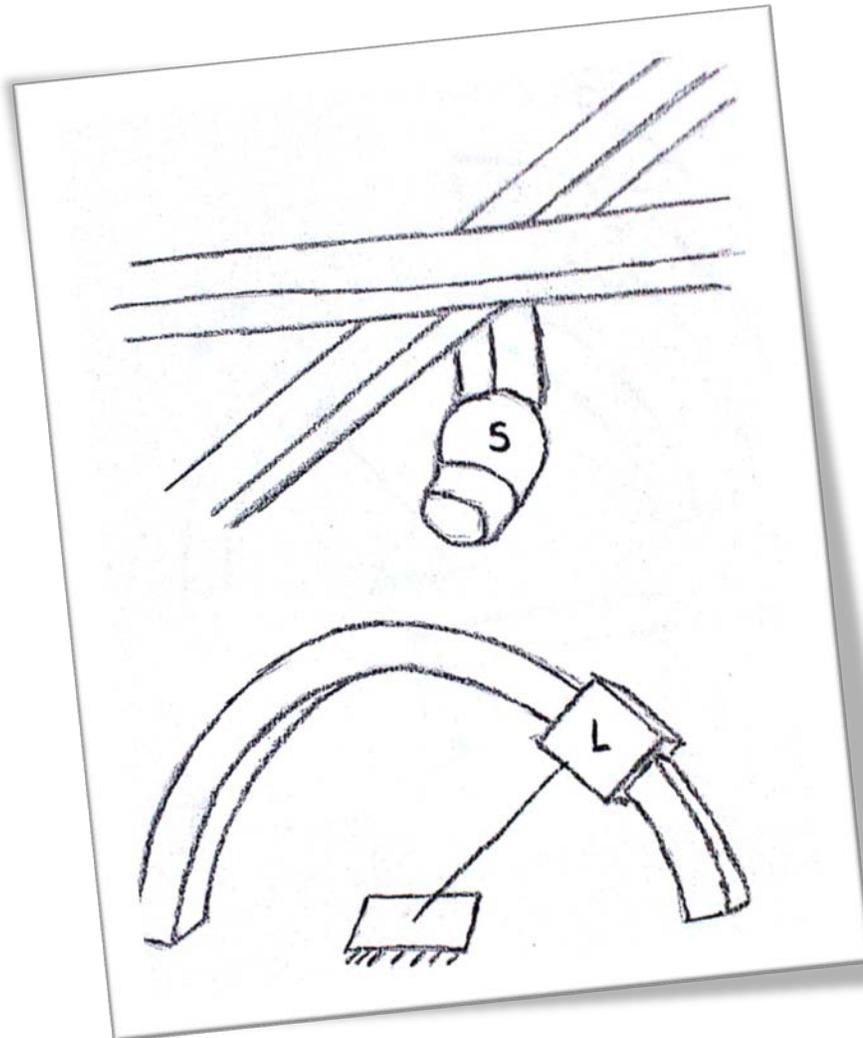


Figura 2.6 Concepto L1AP2

Concepto L1A3P1

El láser se desplaza por un riel en forma de arco, el sensor es posicionado por un brazo en el ángulo azimutal y un carro desplazándose en un riel realiza la posición angular polar.

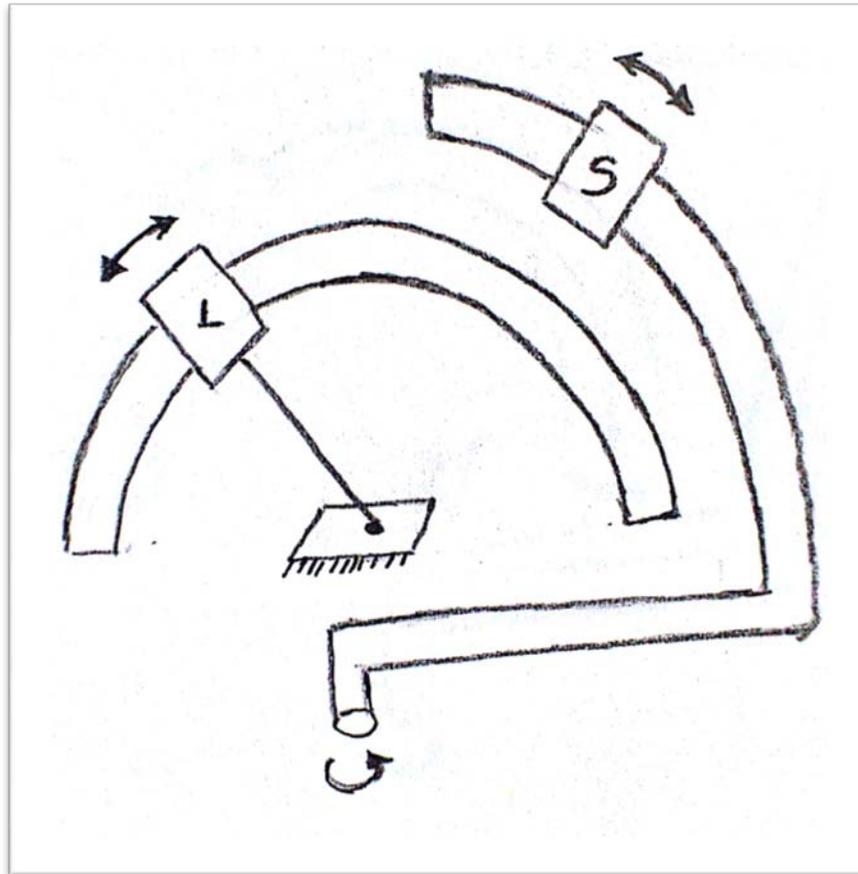


Figura 2.7 Concepto L1A3P1

Concepto L1A3P3

El láser se desplaza por un riel en forma de arco, el sensor es posicionado por dos brazos con movimiento angular, uno para cada ángulo.

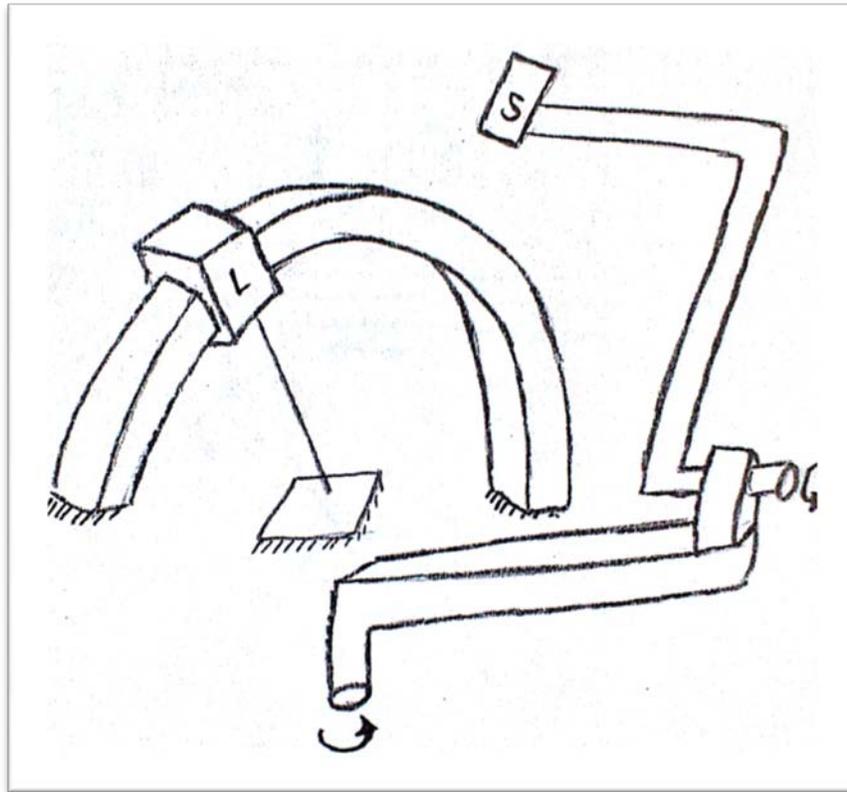


Figura 2.8 Concepto L1A3P3

Concepto L2A2

Tanto el láser como el sensor son posicionados por guías cartesianas superpuestas y articuladas, giros en los efectores finales los orientan hacia la muestra.

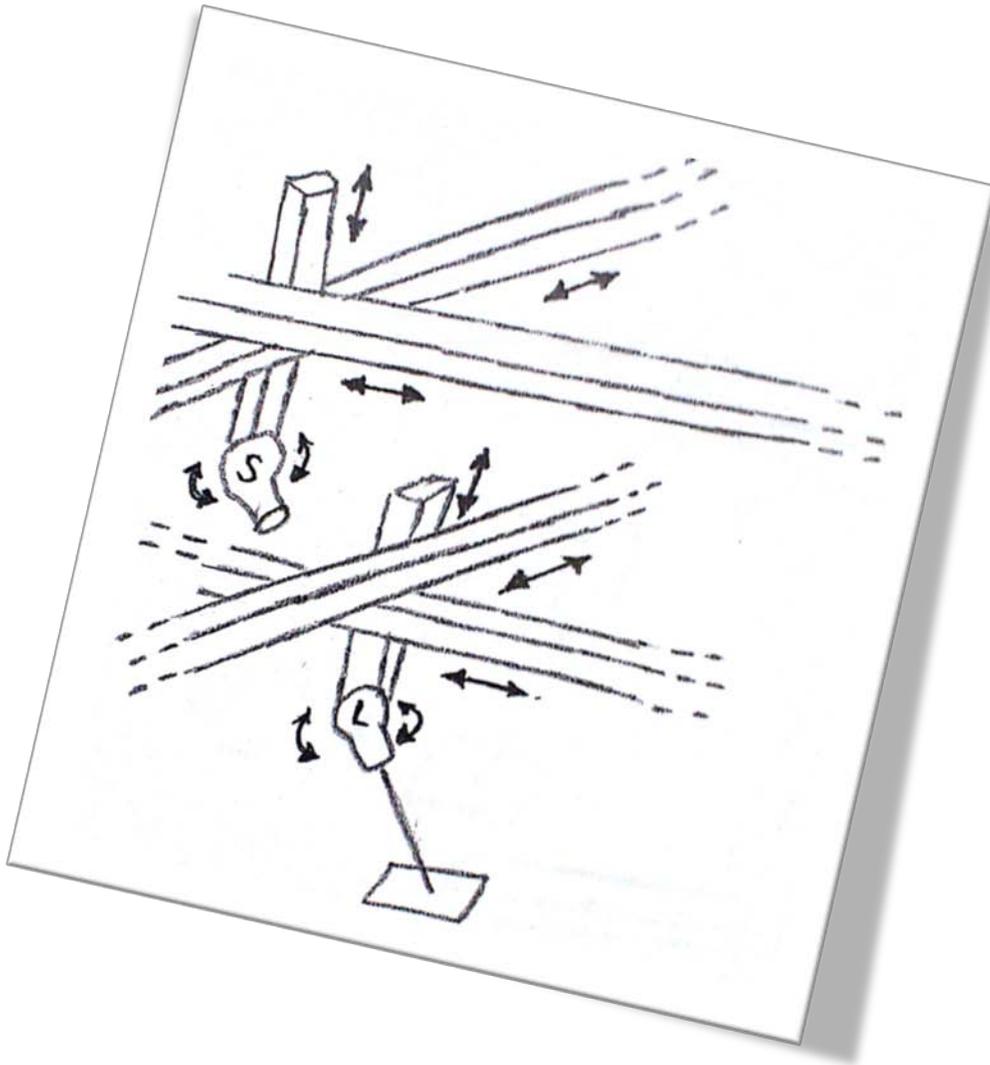


Figura 2.9 Concepto L2AP2

Concepto L3A3P3

Todos los posicionamientos son generados por brazos con movimientos angulares.

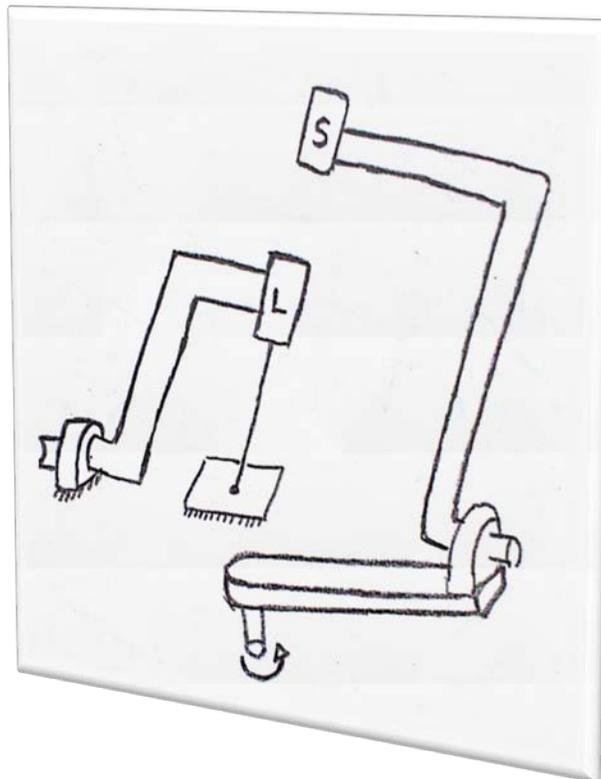


Figura 2.10 Concepto L3A3P3

Las ilustraciones presentadas de los conceptos anteriores dan una muestra clara del resto de los conceptos que se generan con base en la carta morfológica, los conceptos del L1A1P1a al L1A3P3 se repiten variando únicamente la forma cómo es posicionado el láser.

Vale la pena señalar que de esta generación de conceptos, el concepto L3A3P1 es el que desarrolló la compañía Schmitt Measurement Systems Inc para ser comercializado.

2.5 Selección de concepto.

Los conceptos generados fueron evaluados mediante una matriz de decisión. En ella se incluyen los siguientes criterios de selección:

Elementos que en su mayoría se puedan manufacturar en el CCADET. Este criterio fue establecido, ya que el diseño de este equipo será manufacturado en su mayoría en el taller con que cuenta el CCADET, por lo cual, es condición necesaria tener un diseño que implique procesos de manufactura realizables en el CCADET.

Reducida zona de obstrucción al sensor. Este criterio es de importancia para los resultados que el cliente desea obtener de la operación del equipo al momento de realizar las mediciones del esparcimiento de la luz.

Cantidad de actuadores a controlar. Este criterio se incluyó por su fuerte relación con las funciones que fueron descartadas para la generación de conceptos, en especial con, *Determinar posiciones.* A mayor número de actuadores se dificulta el control de los mismos y la programación de los movimientos mediante la computadora.

Las evaluaciones para cada criterio van del 1 al 10, los valores para ponderar las evaluaciones, si bien, no están en función del desempeño esperado en el dispositivo, son de utilidad para discriminar y llegar a una elección de concepto. Los valores asignados son los siguientes:

Simplicidad para manufacturar – 50 %

Reducida zona de obstrucción al sensor – 30 %

Menor cantidad de actuadores a controlar – 20%

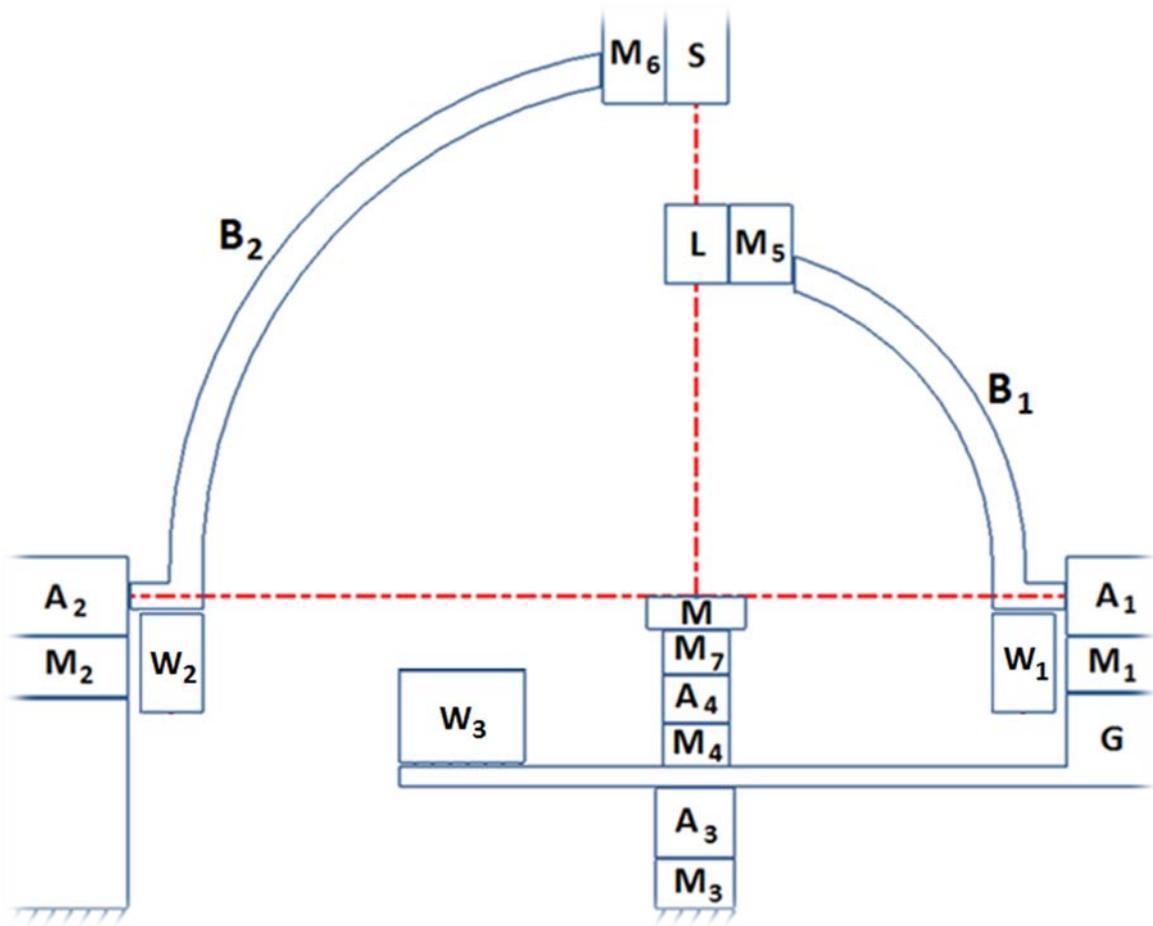
Concepto	<i>Elementos que en su mayoría se puedan manufacturar en el CCADET</i>		<i>Reducida zona de obstrucción al sensor</i>		<i>Menor cantidad de actuadores a controlar</i>		Evaluación total ponderada
	50%		30%		20%		
	Evaluación	Evaluación ponderada	Evaluación	Evaluación ponderada	Evaluación	Evaluación ponderada	
L1A1P1a	3	1.5	5	1.5	10	2	5
L1A1P1b	2	1	5	1.5	10	2	4.5
L1A1P3	4	2	5	1.5	10	2	5.5
L1AP2	4	2	5	1.5	6	1.2	4.7
L1A3P1	4	2	5	1.5	10	2	5.5
L1A3P3	6	3	5	1.5	10	2	6.5
L2A1P1	3	1.5	1	0.3	5	1	2.8
L2A1P1b	2	1	1	0.3	7	1.4	2.7
L2A1P3	5	2.5	1	0.3	7	1.4	4.2
L2AP2	5	2.5	1	0.3	1	0.2	3
L2A3P1	4	2	1	0.3	7	1.4	3.7
L2A3P3	6	3	1	0.3	7	1.4	4.7
L3A1P1	5	2.5	7	2.1	10	2	6.6
L3A1P1b	4	2	7	2.1	10	2	6.1
L3A1P3	5	2.5	7	2.1	10	2	6.6
L3AP2	6	3	7	2.1	6	1.2	6.3
L3A3P1	6	3	7	2.1	10	2	7.1
L3A3P3	8	4	7	2.1	10	2	8.1

Tabla 2.3 Matriz de decisión.

Como resultado de la matriz de evaluación, el concepto L3A3P3 es el que se empleó para el diseño del esparcímetro*.

*En el diseño de configuración se agrega una modificación a este concepto, sin embargo, se conserva el mismo principio de emplear tres brazos con movimiento angular para realizar las mediciones.

Capítulo 3 47
Diseño de Configuración



Esquema de los elementos que constituyen al esparcómetro.

CAPÍTULO 3 DISEÑO DE CONFIGURACIÓN

Se presenta el desarrollo del concepto seleccionado en el capítulo anterior, se realizan algunas modificaciones y se incorporan nuevos elementos al concepto: Mecanismos de alineación, sensores de referencia y finales de carrea. Se explica la relación entre movimientos angulares de los brazos del esparcímetro y el barrido del sensor para cubrir el hemisferio superior al plano de la superficie de la muestra. Se presentan los elementos que componen los arreglos ópticos del láser y del sensor. Finalmente se presenta la comunicación entre el equipo y la computadora que efectuará el posicionamiento automático para el barrido en los experimentos.

49

3.1 DESARROLLO DEL CONCEPTO DEFINIDO.

3.1.1 Ajustes al concepto definido.

Se aplicaron modificaciones al concepto generado en el capítulo anterior, el primero de ellos fue a la función *Posicionar azimutalmente al sensor*. Se encontró que resulta menos complejo transmitir el movimiento azimutal a todo el conjunto de Muestra y Láser dejando fijo el sensor respecto al movimiento azimutal. De esta forma el sensor sólo se desplaza en una dirección angular. Con esto se facilita el diseño para la manufactura al interior del CCADET. En la figura 3.1 se ilustra esta modificación.

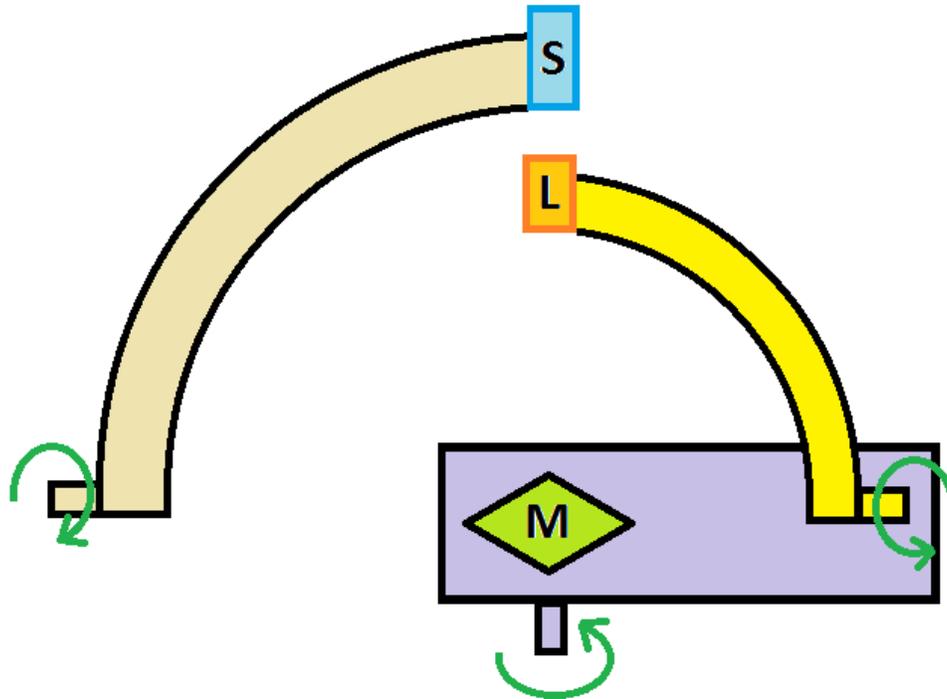


Figura 3.1 Modificación para el posicionamiento azimuthal del sensor.

50 Una vez analizadas las trayectorias del movimiento angular de los brazos del concepto, se identificó la *zona de interferencia o zona de obstrucción al sensor*. Esta zona había sido previamente considerada en la selección del concepto, se había observado que el brazo posicionador del láser era el elemento que mayor aportación tenía a la zona de interferencia. Por otro lado, en la generación de conceptos se había dejado de lado la subfunción *Posicionar muestra*, ya que está es dependiente de cómo se solucionan las subfunciones *Posicionar láser* y *Posicionar sensor*. Considerando estos dos puntos: el problema de la *zona de obstrucción al sensor* y la solución a la subfunción *Posicionar muestra*, se determinó que: la muestra requiere de un movimiento angular (además del longitudinal para ajustar la altura de la muestra); para que, mediante una combinación de movimientos con la posición del láser, ofrezcan eliminar la zona de obstrucción al sensor originada por la presencia física del brazo posicionador del láser.

En la Figura 3.2 se muestra un esquema del concepto con esta última modificación.

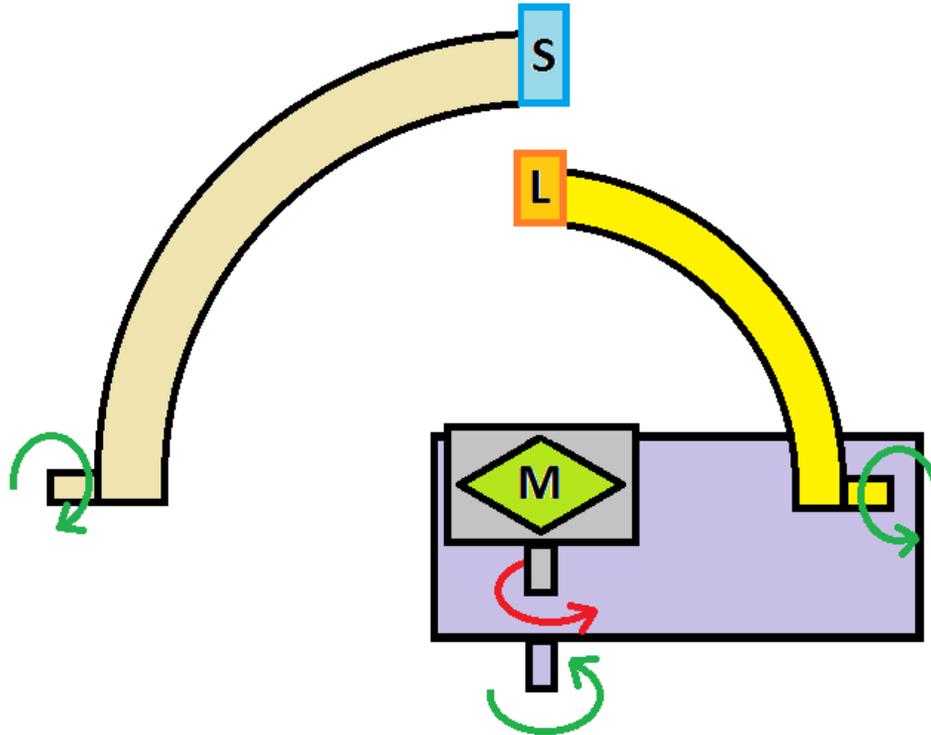


Figura 3.2 Modificación al concepto para eliminar la obstrucción causada por el brazo que posiciona al láser.

3.1.2 Descripción general y consideraciones del concepto.

En las Figuras 3.3 a 3.6 se muestra el concepto anterior considerando en el esquema los actuadores para los cuatro movimientos angulares. Para las explicaciones siguientes, se hará referencia a los elementos que componen el diseño de la siguiente forma:

L – láser (conjunto de componentes ópticos para la emisión del láser).

S – sensor (conjunto de componentes ópticos para el sensado).

M – muestra (superficie rugosa).

B₁ – Brazo que sujeta al láser (L).

B₂ – Brazo que sujeta al sensor (S).

A₁ – Actuador que proporciona movimiento angular al brazo B₁.

A₂ – Actuador que proporciona movimiento angular al brazo B₂.

A₃ – Actuador que proporciona movimiento angular al brazo G.

A₄ – Actuador que proporciona movimiento angular a la muestra.

G – Brazo que sujeta a A₁ y A₄.

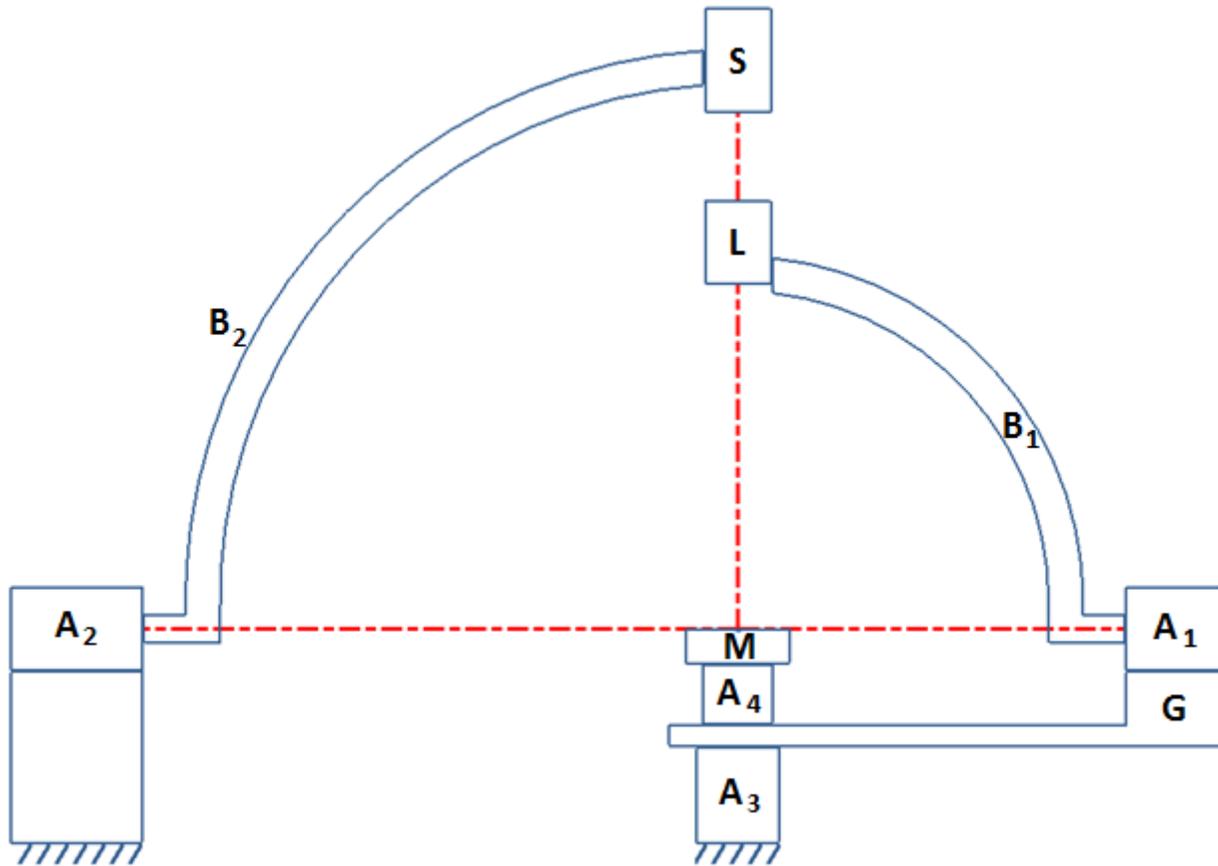


Figura 3.3 Identificación de los elementos del concepto.

θ_i – ángulo de incidencia del láser medido en sentido antihorario desde el eje perpendicular al plano horizontal.

θ_s – ángulo de posicionamiento del sensor medido en sentido antihorario desde el plano horizontal.

θ_g – ángulo de posicionamiento del brazo g medido en sentido horario desde el extremo opuesto a A₂.

θ_m – ángulo de giro de la muestra, medido en sentido horario.

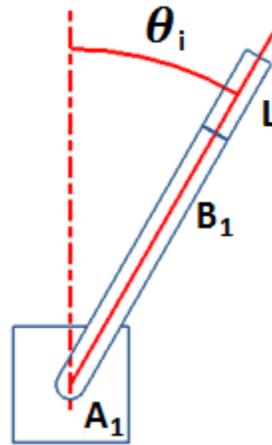


Figura 3.4 Ángulo de incidencia θ_i

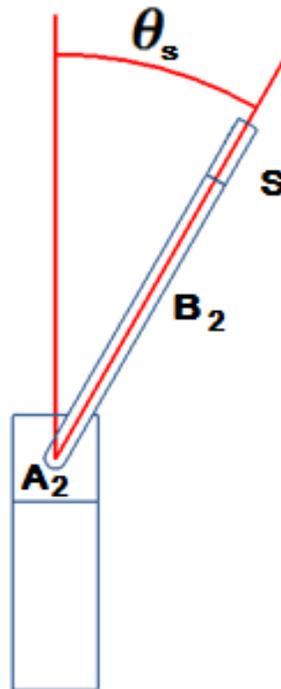


Figura 3.5 Ángulo de posicionamiento (polar) del sensor θ_s

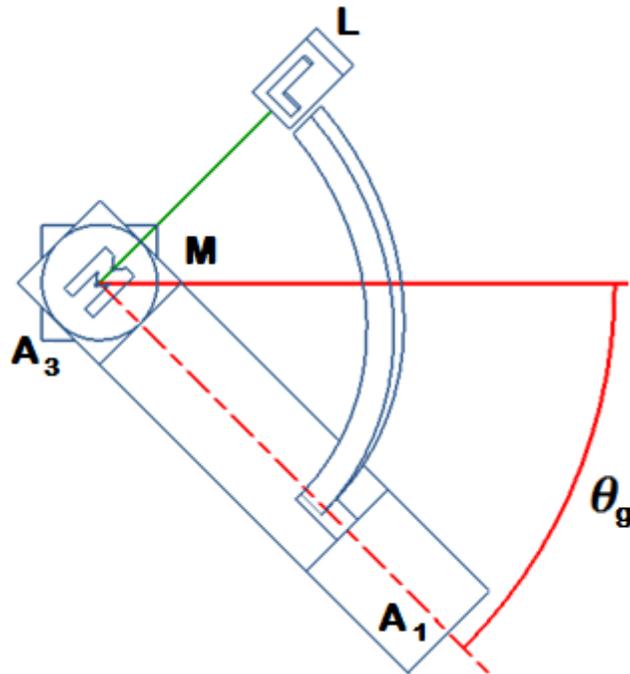


Figura 3.6 Ángulo de posicionamiento del brazo θ_g

Consideración 1. Distancia del láser y del sensor respecto de la muestra.

En los requerimientos del equipo se estableció que la distancia entre el láser y la muestra fuera a una distancia de 50 cm (o ligeramente mayor, +10 cm), y de 70 cm (+10 cm) para el sensor. Estos dos requerimientos son parte del posicionamiento del láser y del sensor, los cuales quedan determinados por medio de la geometría de los brazos B_1 , B_2 ; así como también de la distancia que resulta del brazo G y los elementos del actuador A_1 para el caso del láser, y la distancia entre la posición de A_2 y A_3 para el caso del sensor.

Consideración 2 Alineación de los ejes de giro.

Para que el concepto opere de manera correcta es necesario que tanto el eje de giro del brazo B_1 y del brazo B_2 estén contenidos en el mismo plano que el de la superficie de la muestra a estudiar (plano horizontal).

También se necesita que el eje de incidencia del láser cuando el ángulo de incidencia del láser θ_i es cero, el eje de lectura del sensor cuando el ángulo del posicionamiento del sensor θ_s es 90° , el eje de giro de la muestra y el eje de giro del brazo sean todos colineales.

Consideración 3 Perpendicularidad entre los ejes de giro.

Por último, y para dejar de forma explícita lo que se puede deducir de los párrafos anteriores, los ejes de giro de A_3 y A_4 deben ser perpendiculares a los ejes A_1 y A_2 , y por lo tanto, perpendiculares al plano donde están contenidos (A_1 y A_2). Como nota adicional, todos los ejes tienen como punto en común el punto de incidencia del láser sobre la muestra.

3.1.3 Relación entre movimientos angulares y el barrido del sensor en la totalidad del hemisferio superior.

A continuación se explica la combinación los movimientos angulares para el posicionamiento del sensor en el hemisferio superior con **respecto de la muestra**.

Primera mitad del hemisferio superior.

El barrido de la primera mitad del hemisferio superior se logra mediante la siguiente combinación de movimientos:

1. Se mantiene la posición angular inicial de la muestra θ_m y el ángulo de incidencia inicial del láser θ_i .
2. La combinación del giro del brazo B_2 , en un rango de 0 a 90° , en conjunto con el giro del brazo G , en un rango de 0 a 180° . Dan como resultado el barrido del sensor en la mitad del hemisferio superior.

Segunda mitad del hemisferio superior.

El barrido de la segunda mitad del hemisferio superior se logra mediante la siguiente combinación de movimientos:

1. Se gira 180° la muestra respecto de la posición inicial y se coloca el láser con el mismo valor del ángulo inicial en dirección opuesta a la que había sido medido para la primera

mitad. Con este paso se logra un efecto físico similar al de tener otro brazo B_1 en el lado opuesto con el cual se intercambiara la sujeción del láser, para de esa forma, evitar la interferencia de éste en la toma de lecturas del sensor.

2. Se ejecuta la misma combinación de giros de B_2 y de G que se realizó para la primera mitad del hemisferio.

Con estos procedimientos se logra cubrir cualquier punto contenido en el hemisferio superior al plano de esparcimiento de la muestra.

3.2 MECANISMOS DE ALINEACIÓN DEL EQUIPO.

Tomando en cuenta las consideraciones del concepto y la relación entre los movimientos angulares y el barrido del sensor en la totalidad del hemisferio superior se determinó la inclusión de elementos que aseguraran la alineación de los ejes de movimiento de los brazos del esparcímetero.

En general, los procesos de manufactura no son perfectos y no producen piezas perfectas, las desalineaciones presentadas por estas imperfecciones se corregirán por medio de mecanismos de alineación que son incorporados en diversas zonas del equipo, con ello se garantiza la operación correcta del equipo. En la figura 3.7 se muestran los mecanismos de alineación que se incluyeron para el diseño.

M₁ – Mecanismo de alineación para el eje de giro del brazo B_1 .

M₂ – Mecanismo de alineación para el eje de giro del brazo B_2 .

M₃ – Mecanismo de alineación para el eje de giro del brazo G.

M₄ – Mecanismo de alineación para el eje de giro de la muestra M.

M₅ – Mecanismo de alineación para orientar el arreglo de la óptica del láser hacia la muestra.

M₆ – Mecanismo de alineación para orientar el arreglo de la óptica del sensor hacia la muestra.

Mecanismo de alineación para el eje de giro del brazo B_1 .

Este mecanismo permite la corrección en dos direcciones, la primera para corregir la inclinación vertical con respecto del plano de la muestra, y la segunda para corregir en el plano horizontal la desviación que se tiene respecto al punto de incidencia del láser.

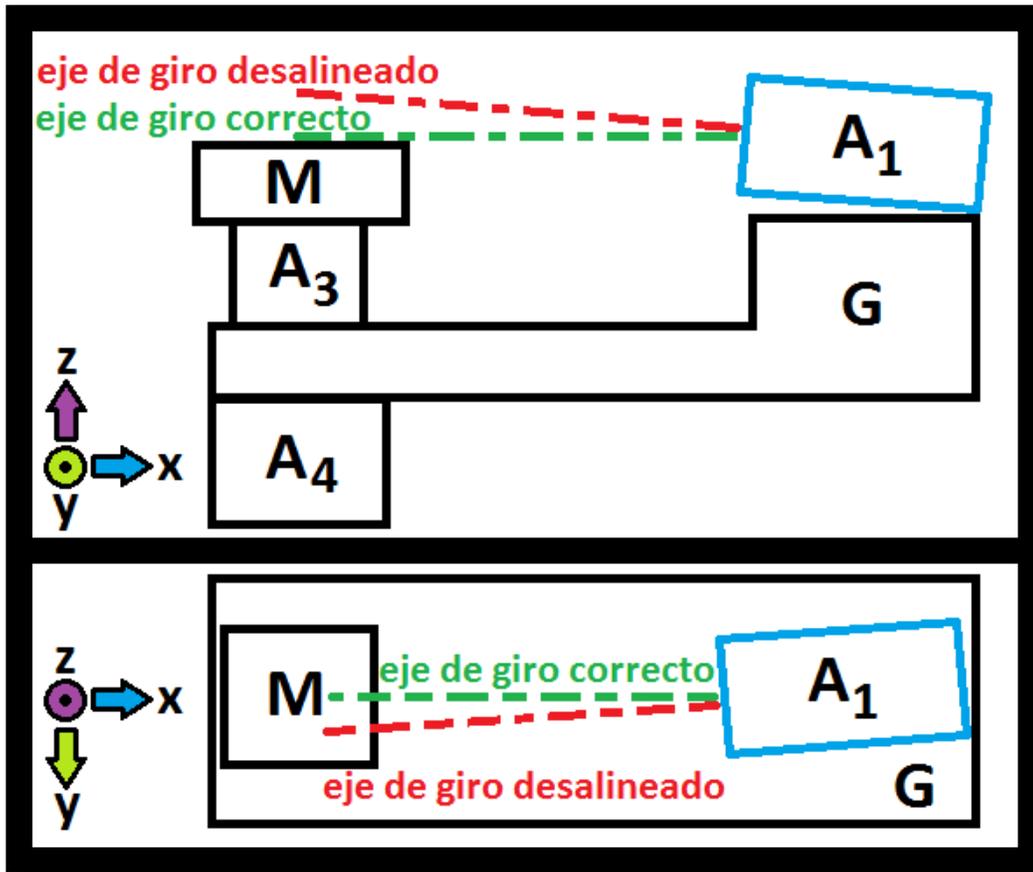


Figura 3.8 Desalineaciones que corregirá el mecanismo M_1

Mecanismo de alineación para el eje de giro del brazo B_2 .

Al igual que el mecanismo anterior, permite corregir la inclinación vertical respecto del plano de la muestra, y la desviación que se tiene respecto al punto de incidencia del láser.

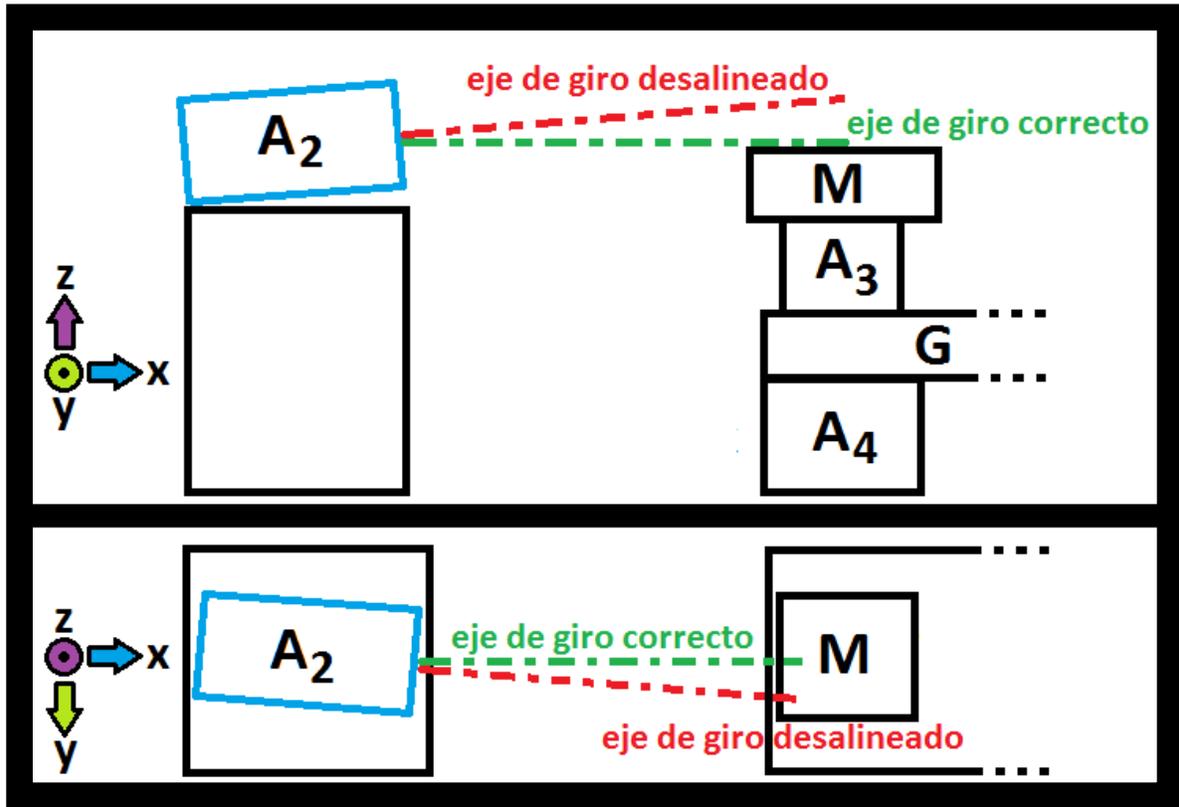


Figura 3.9 Desalineaciones que corregirá el mecanismo M_2 .

Mecanismo de alineación para el eje de giro del brazo G.

Este mecanismo corrige el eje de giro del brazo G para que sea perpendicular al plano horizontal. Y también corrige el desplazamiento en el plano con respecto del eje del sensor cuando se ubica en posición vertical, es decir, a 90°.

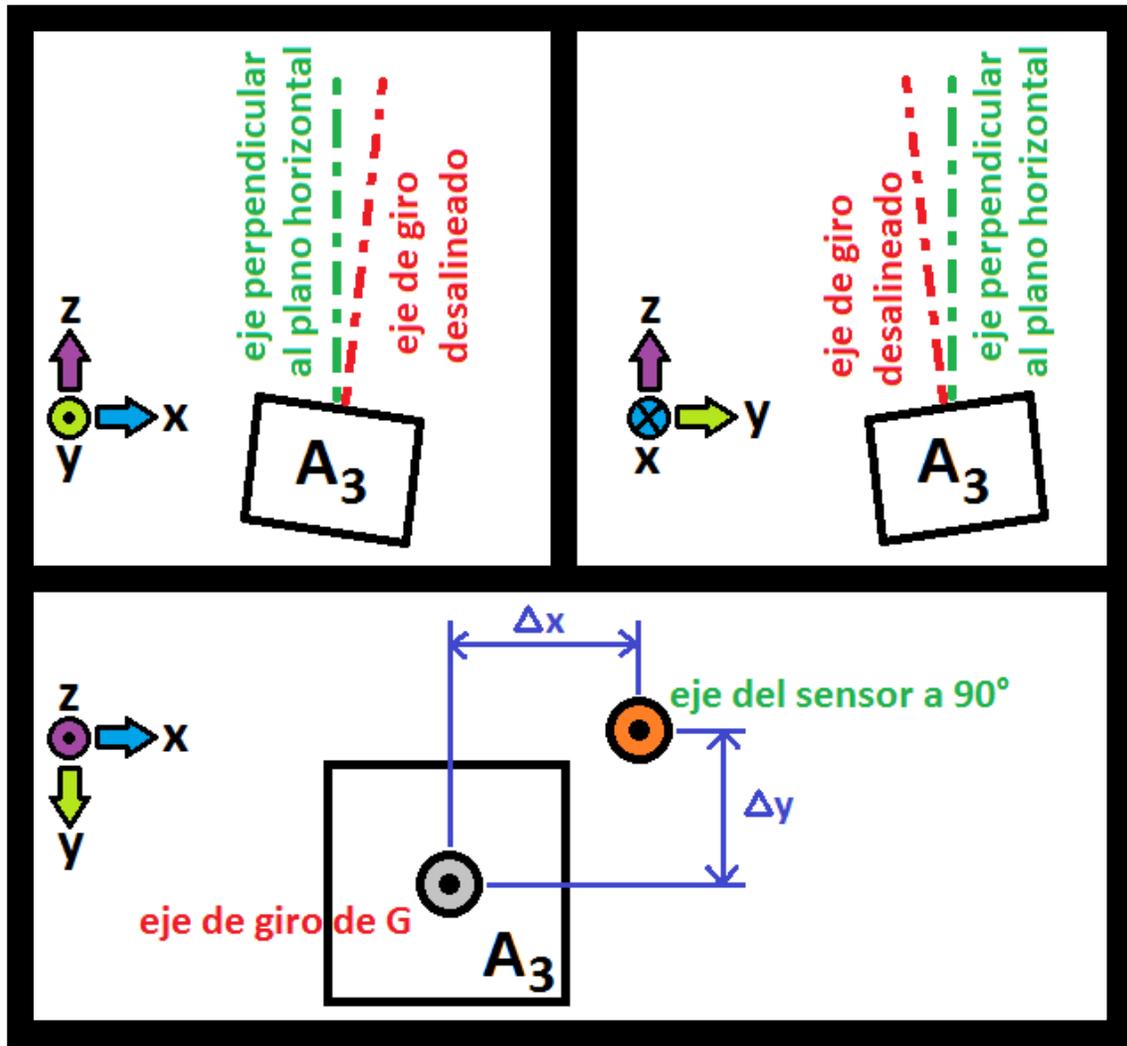


Figura 3.10 Desalineaciones que corregirá el mecanismo M_3

Mecanismo de alineación para el eje de giro de la muestra.

Este mecanismo corrige la alineación del eje de giro de la muestra, para que sea colineal con el eje de giro del brazo G.

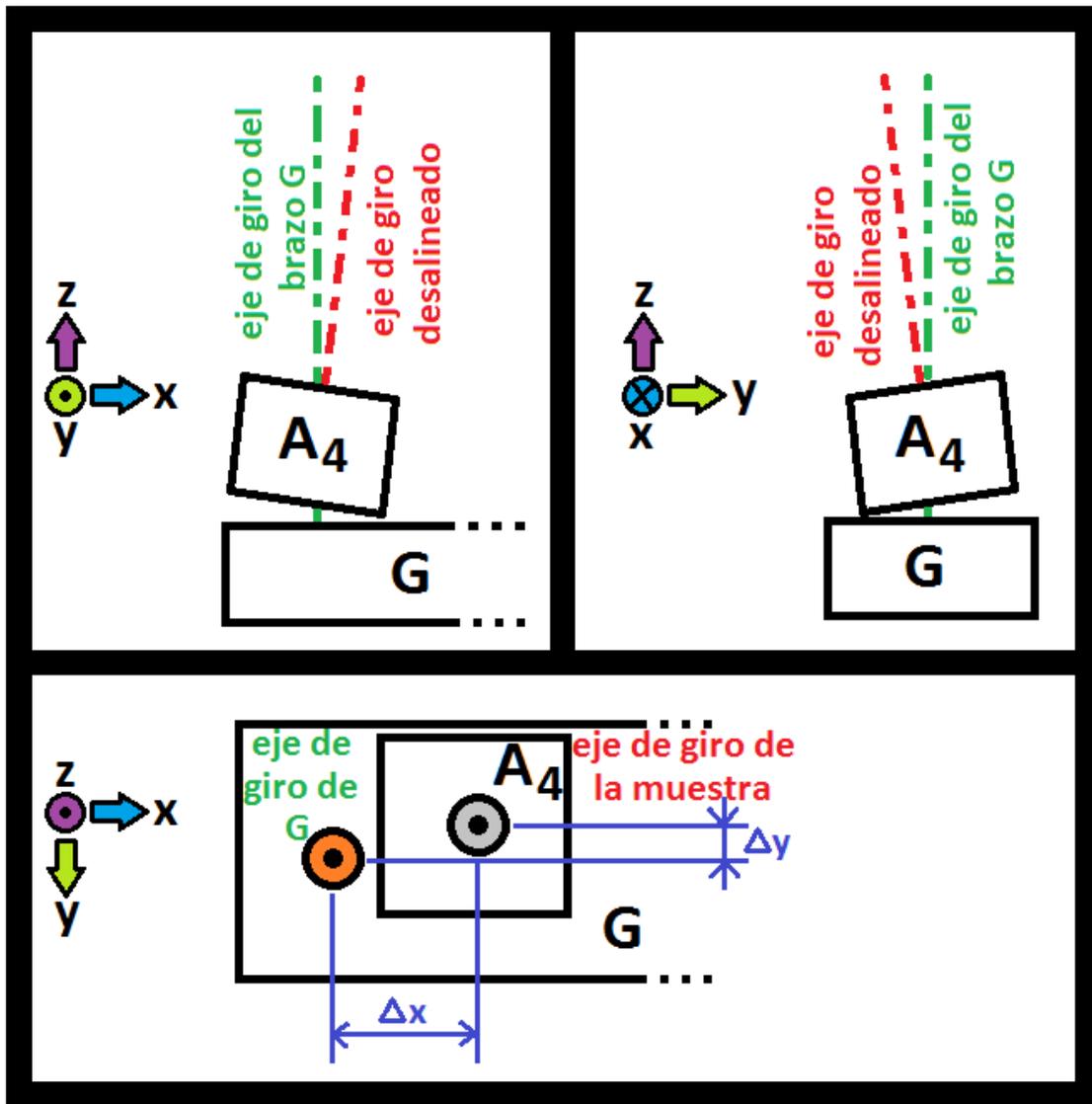


Figura 3.11 Desalineaciones que corregirá el mecanismo M_4

Mecanismo de alineación para el arreglo de la óptica del láser.

Con este mecanismo se corrige el eje de incidencia del láser, para que sea colineal con el eje de giro del brazo G. Para ello se corrigen desviaciones tanto de inclinación, así como de desplazamiento en el plano.

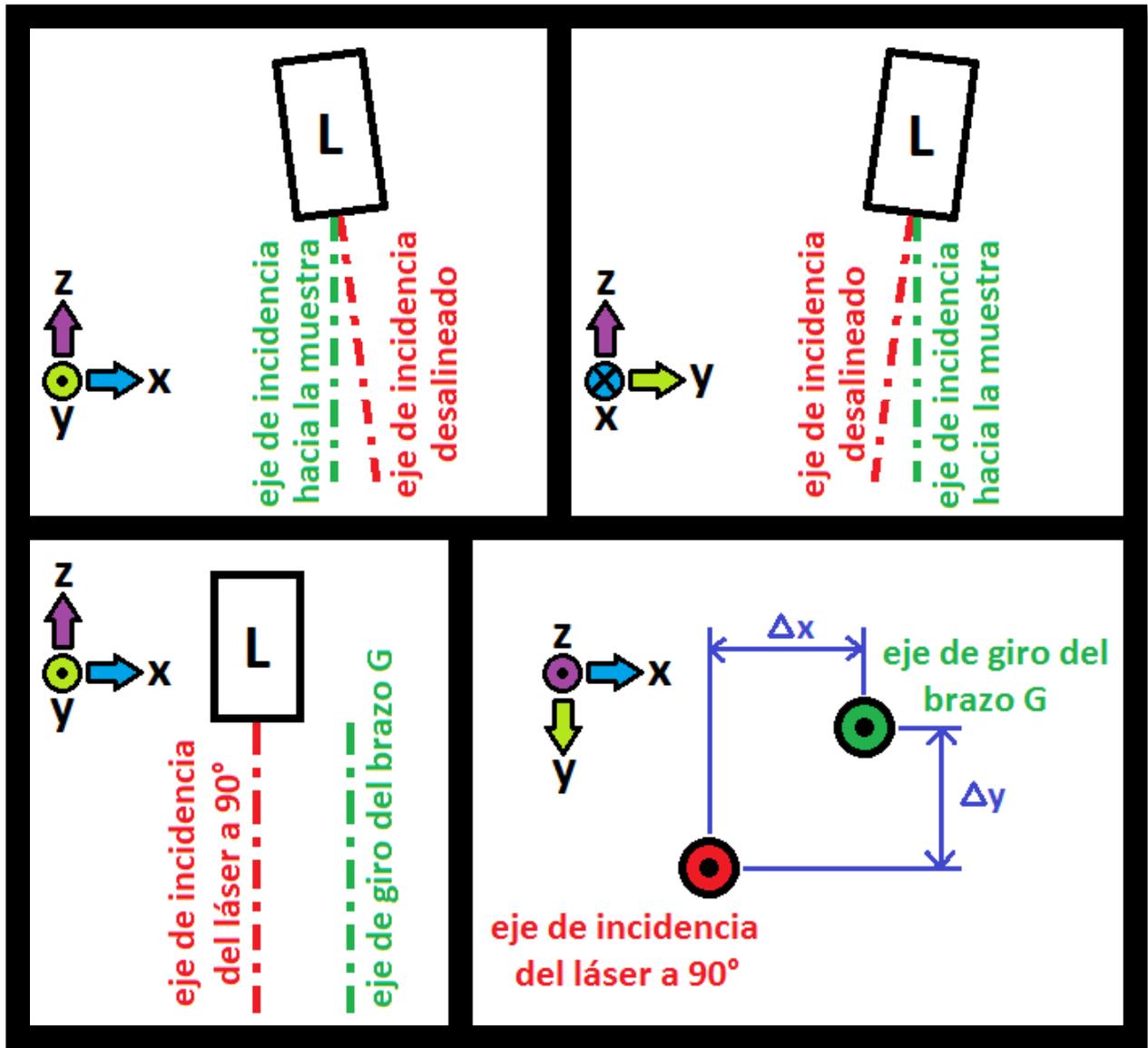


Figura 3.12 Desalineaciones que corregirá el mecanismo M_5

Mecanismo de alineación para el arreglo de la óptica del sensor.

Con este mecanismo se corrige el eje de lectura del sensor, para que sea colineal con el eje de giro del brazo G. Para ello se corrigen desviaciones tanto de inclinación, así como de desplazamiento en el plano.

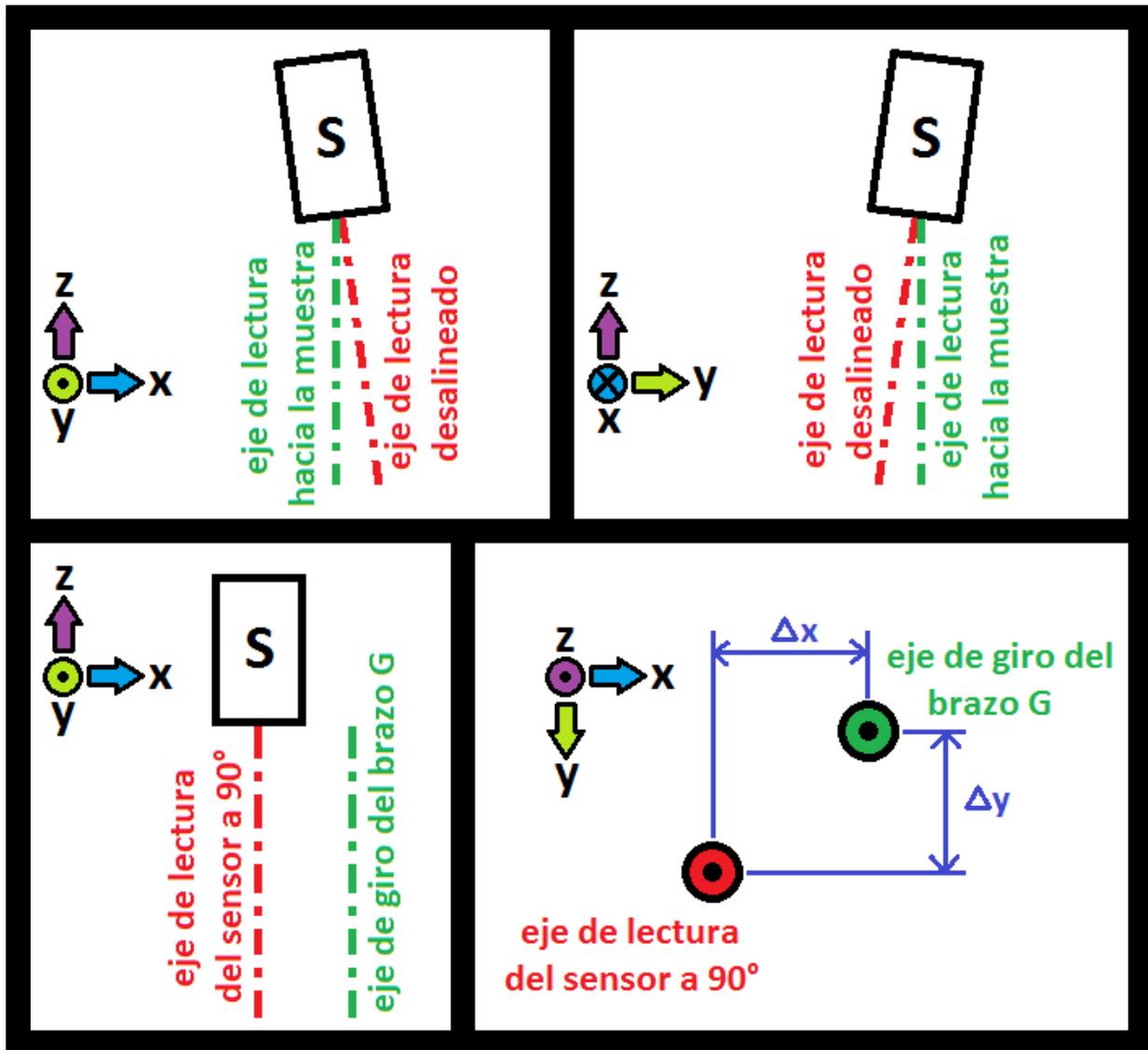


Figura 3.13 Desalineaciones que corregirá el mecanismo M_6

Mecanismo de ajuste de la altura de la superficie de la muestra.

Finalmente, este mecanismo permitirá ajustar la altura a la que se coloca la muestra. A diferencia de los mecanismos anteriores que son ajustados durante el ensamble del equipo. Este mecanismo será empleado por el usuario del equipo cada vez que cambie el grosor de la muestra.

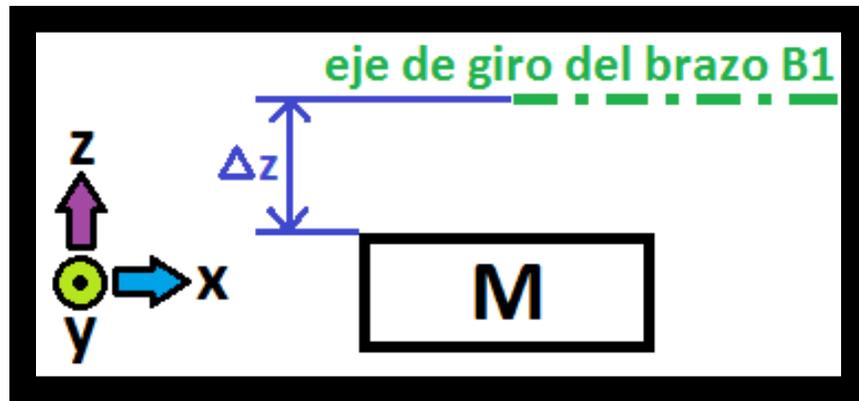


Figura 3.14 Ajuste de la altura de la muestra mediante el mecanismo M_7

3.3 CONSIDERACIONES FÍSICAS Y DE EXPERIMENTACIÓN ÓPTICA.

3.3.1 Contrapesos

Con la finalidad de reducir el par requerido para mover los brazos B_1 y B_2 así como también eliminar las "cargas colgantes" en el actuador, es decir, requerir que el motor aplique un par alto para mantener la posición angular del brazo; se determinó incluir un contrapeso en cada brazo.

Por otro lado, al brazo G también se le añade un contrapeso en el lado opuesto a la posición del actuador A1 y de esa forma eliminar el torque provocado por todos los componentes ubicados en dicho extremo.

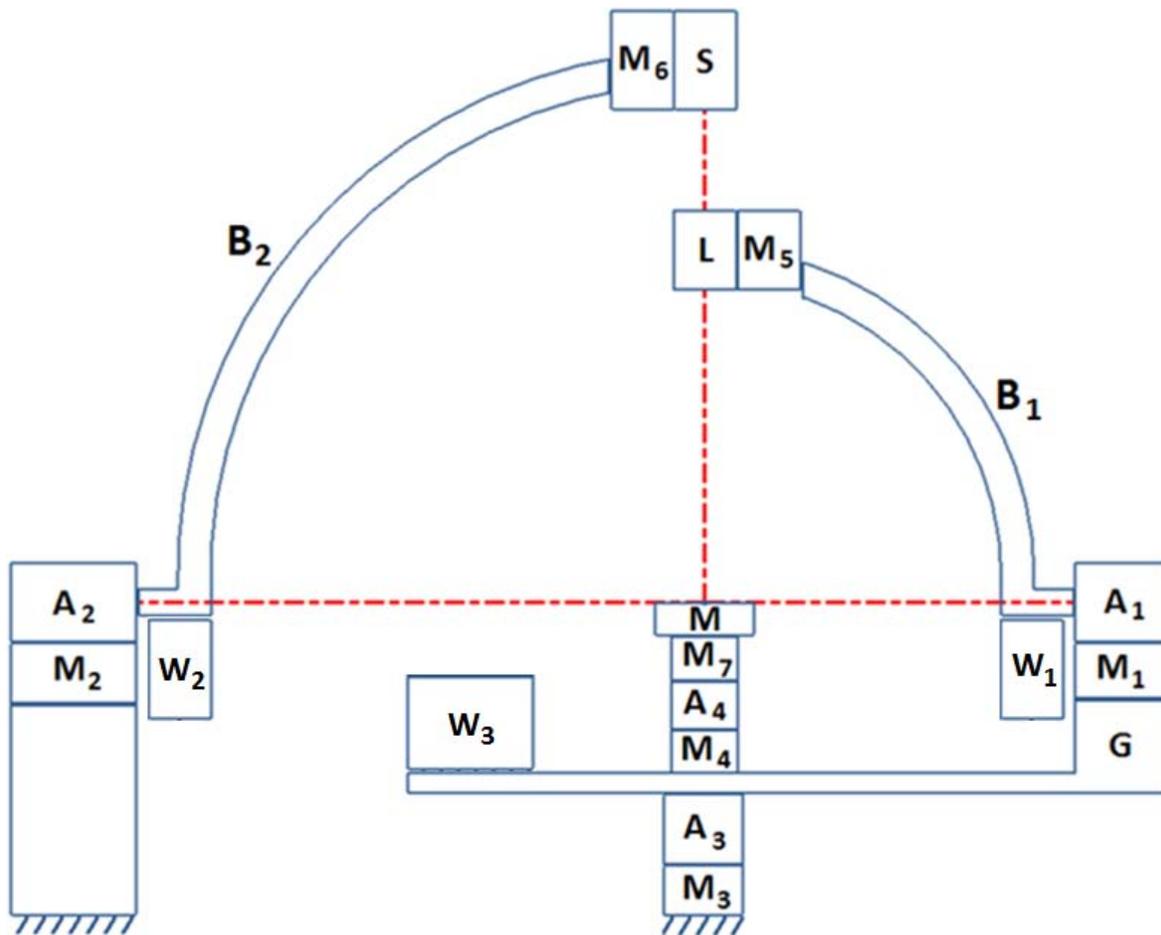


Figura 3.15 Incorporación de contrapesos W_1 , W_2 y W_3 -

3.3.2 Sensores de referencia y de final de carrera.

Para la identificación real de las posiciones absolutas de los brazos del esparcímeter, se incluyeron sensores fotoeléctricos en los brazos B_1 , B_2 y G . También como medida de seguridad se implementan sensores de final de carrera (interruptores) para desactivar el movimiento de los actuadores y de esa manera prevenir colisiones o giros que pudieran provocar que los cables de los componentes eléctricos se enreden.

3.3.3 Arreglos ópticos del láser y el sensor.

Hasta el momento se ha hecho referencia al conjunto de componentes ópticos para la emisión del láser como simplemente "Láser" y los del conjunto del sensor como "Sensor". A continuación se muestra en qué consisten dichos arreglos.

En la Figura 3.15 se presentan los elementos del arreglo de los componentes ópticos para el láser, el cual consta de: una fuente láser, una lente, un polarizador y dos retardadores variables. Estos componentes se ubican en línea, uno detrás de otro (con cierta separación) en el orden en que fueron mencionados.

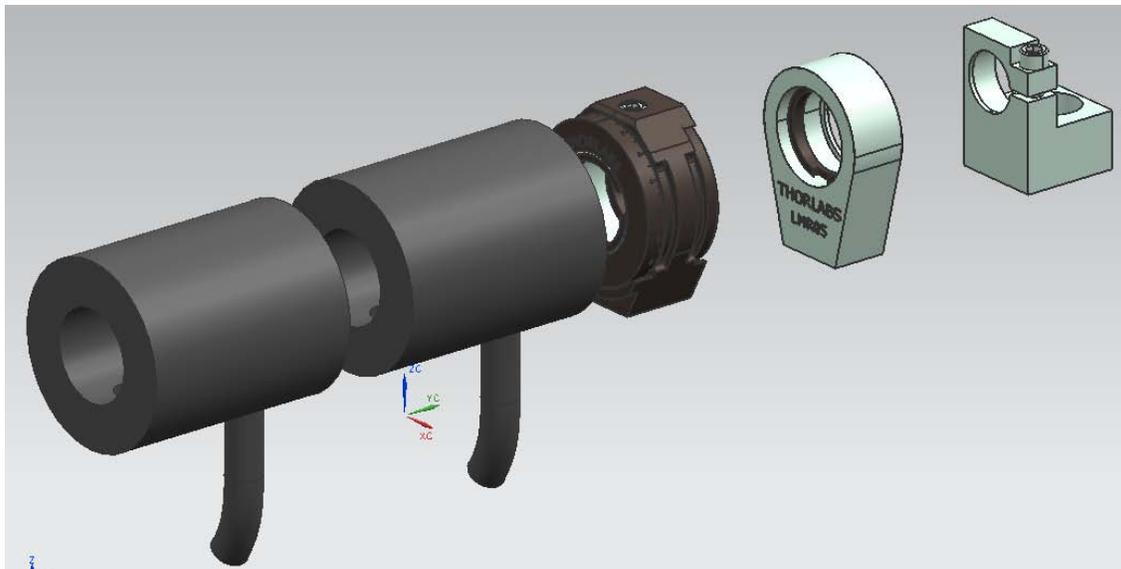


Figura 3.16 Arreglo óptico del láser.

La Figura 3.16 muestran los elementos para el arreglo de los componentes ópticos del sensor, los cuales son: Un fotodetector, una lente, un polarizador y dos retardadores variables. Al igual que en el caso del láser estos se ubican colocados en línea, uno detrás de otro en el orden mencionado.

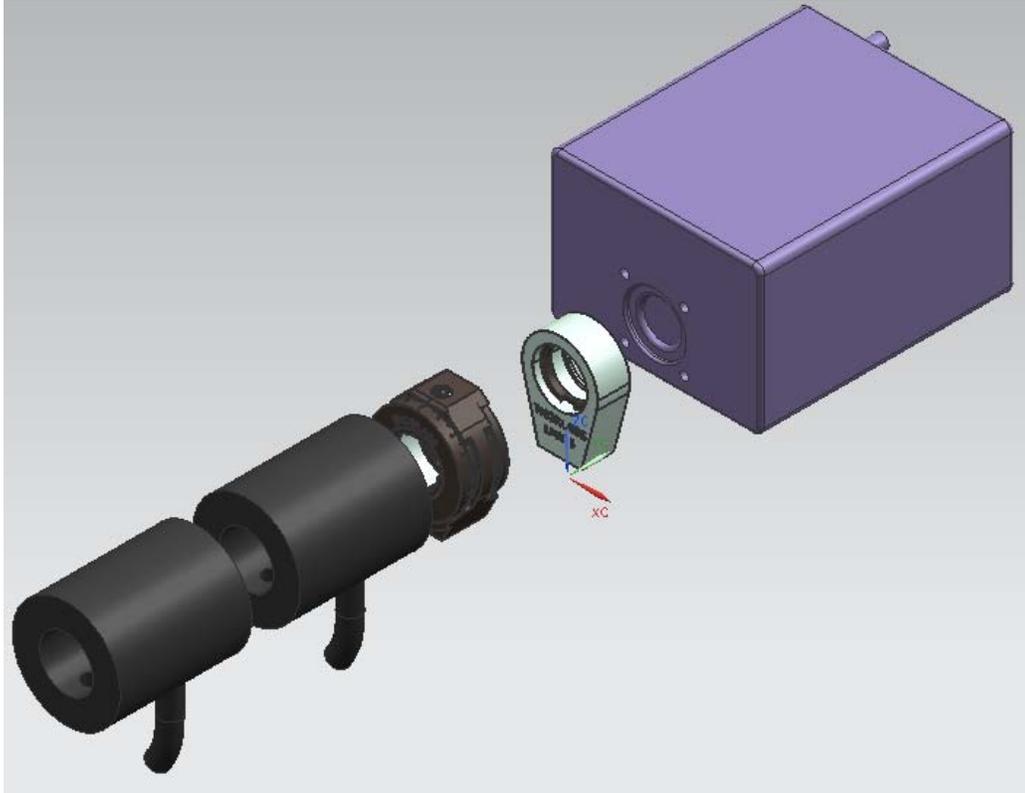


Figura 3.17 Arreglo óptico del sensor.

3.3 COMUNICACIÓN ENTRE EL EQUIPO Y LA COMPUTADORA.

En la Figura 3.17 se muestra el esquema de comunicación entre las partes del equipo y la computadora que se encargará de la automatización del equipo.

Se ha determinado el uso de servomotores de la compañía Yaskawa® como los actuadores que posicionan los brazos del esparcómetro. Estos cuentan con un módulo de control (Servopack) el cual se comunica con la computadora por medio de una tarjeta PCI y a través de la cual el programa LabView® puede dar instrucciones de posicionamiento a los servomotores. De esta forma se simplifica el desarrollo del control para dichos actuadores y se enfocan los esfuerzos al desarrollo del programa para automatizar la toma de lecturas del esparcómetro, cómo se muestra en el capítulo 5.

Las conexiones físicas entre los servomotores, los sensores de referencia, los finales de carrera y la computadora se realizan al interior de un *gabinete de control*. Por último el sensor se comunica directamente a la computadora por medio de una tarjeta integrada para dicho fin.

En el esquema de la Figura 3.17 se muestran las conexiones de los servomotores en color verde, las conexiones de los sensores y finales de carrera en morado y las conexiones con los componentes ópticos en amarillo. El cableado de estas conexiones se dirige al gabinete de control por medio de una canaleta que se coloca en el lugar donde es instalado el equipo. Del gabinete de control salen los cables que se comunican con la tarjeta PCI que está integrada al interior del CPU de la computadora.

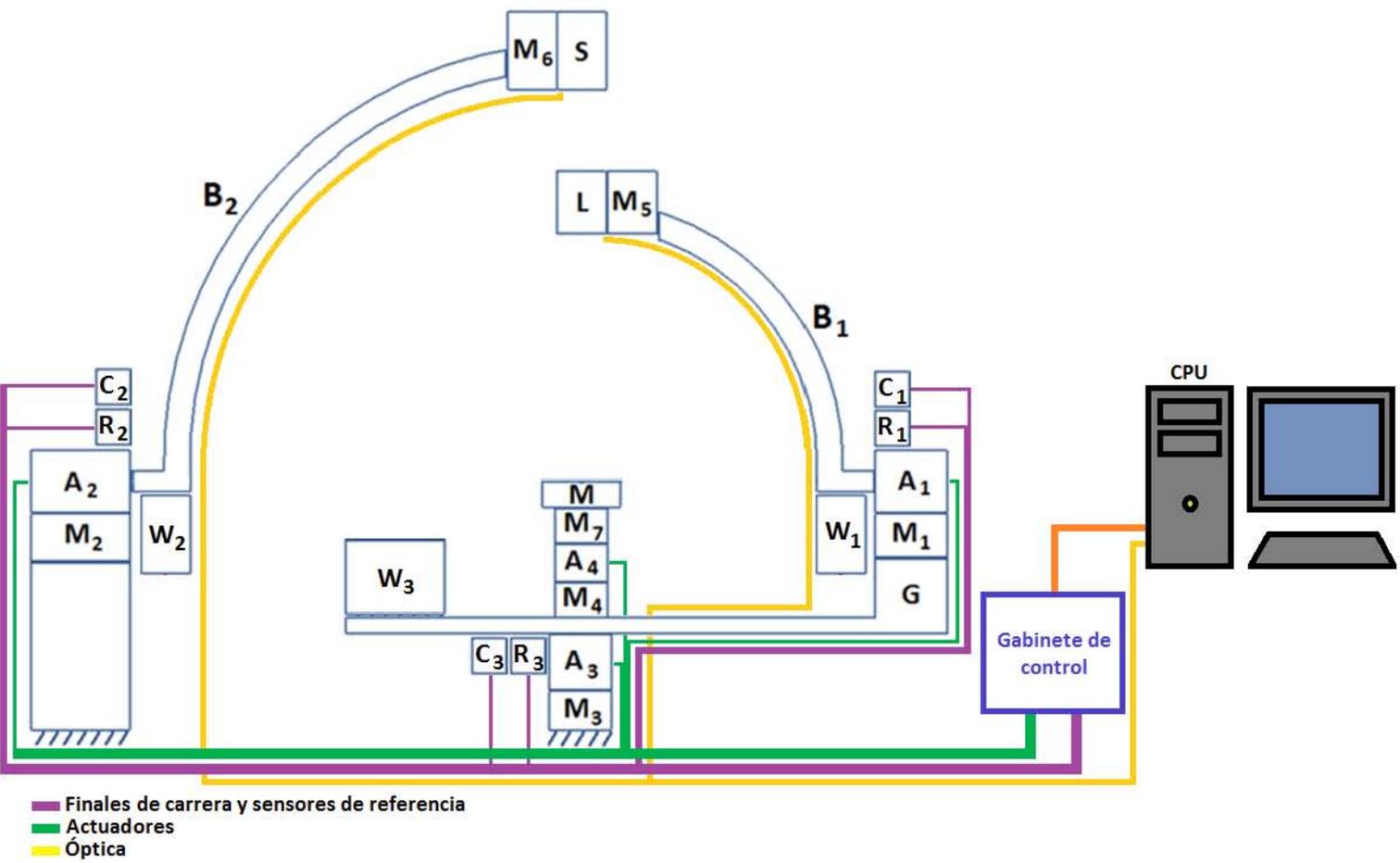


Figura 3.18 Esquema de comunicación del esparcímetro.

Capítulo 4
Diseño de detalle

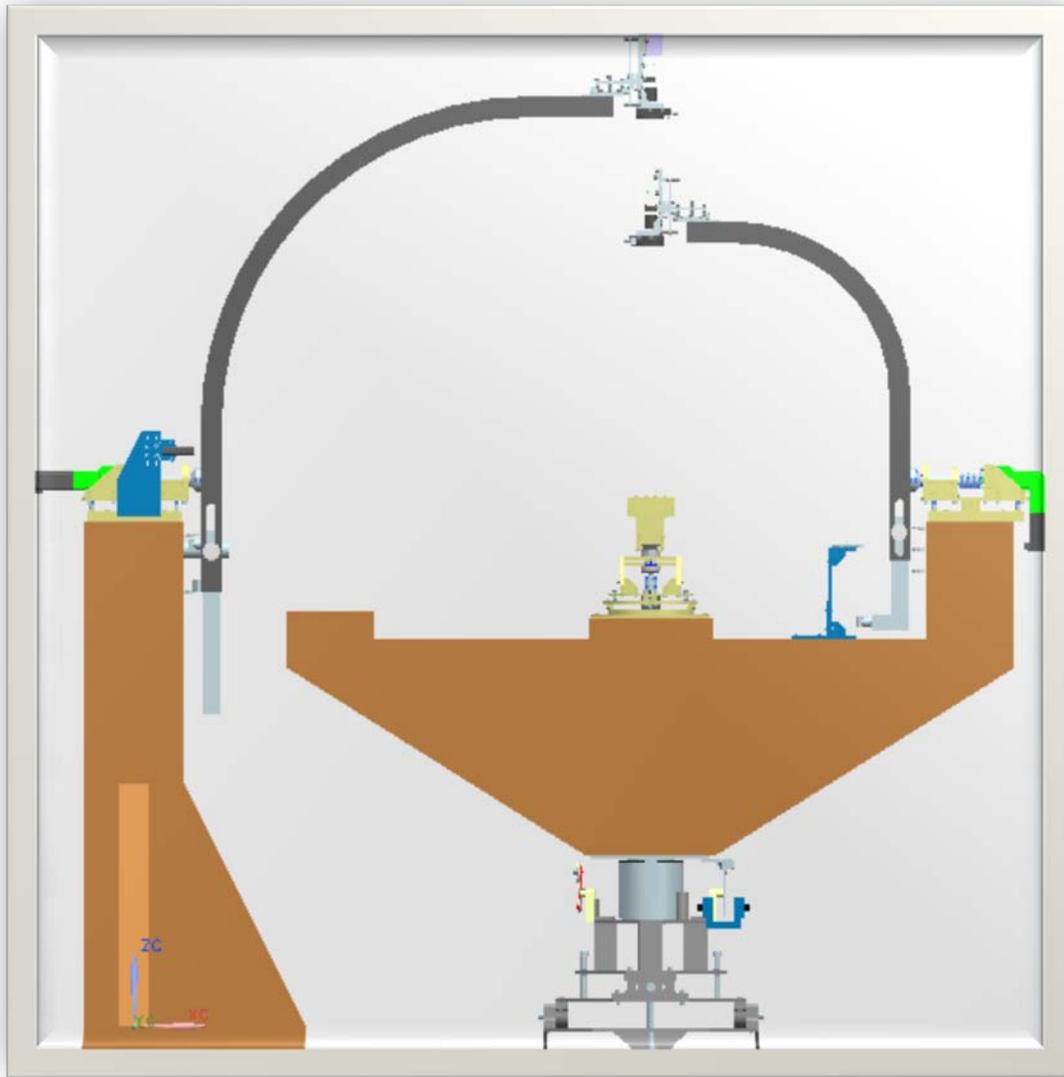


Imagen donde se pueden apreciar el ensamble completo del diseño.

CAPÍTULO 4 DISEÑO DE DETALLE

Se definen los componentes comerciales de los servomotores, reductores de velocidad, sensores de referencia y finales de carrera. Se muestran los diseños finales de los diversos ensambles que constituyen al esparcómetro con una descripción general. Por último se presenta el ensamble completo del esparcómetro.

4.1 SERVOMOTORES Y REDUCTORES DE VELOCIDAD DEL ESPARCÍMETRO.

Los actuadores seleccionados para el esparcómetro son dos modelos de la marca Yaskawa®. El primero es el servomotor SMJV01A3A21 que será empleado en los movimientos de los brazos B_1 , B_2 y para el giro de la muestra, el segundo es el modelo SGDVR90A11A que se empleará para el movimiento del brazo G.

El modelo SMJV01A3A21 fue el modelo comercial de Yaskawa® más pequeño disponible en el mercado al momento de realizar la búsqueda de actuadores. Este es empleado con un reductor de velocidad. Se eligió un servomotor del tamaño más pequeño disponible, ya que las dimensiones de éste afectan directamente las dimensiones del brazo B_2 y el área de trabajo final de esparcómetro.

Por otro lado, el modelo SGDVR90A11A es un servomotor *Direct drive*, es decir, es de implementación directa, con lo cual se simplifica en gran medida el acoplamiento entre el servomotor y el brazo G.



Figura 4.1 Servomotor Yaskawa SMJV01A3A21. Cortesía de Yaskawa.

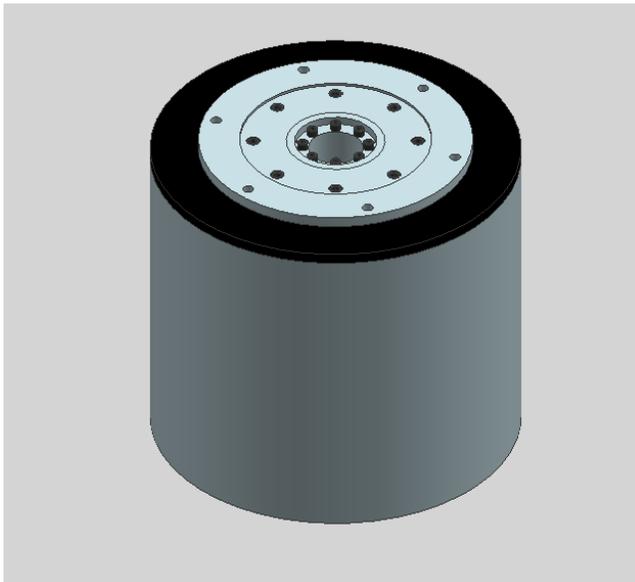


Figura 4.2 Servomotor Yaskawa SGDVR90A11A. Modelado en programa de CAD.

En los brazos B_1 y B_2 se incorporan reductores de velocidad con la finalidad de aumentar el par proporcionado por los servomotores Yaskawa®. Para el brazo B_1 se emplea el reductor de velocidad ABR-060-050-S2-P1 y para el brazo B_2 el modelo AB-060-070-S2-P1, ambos de la marca Apex Dynamics Inc.. Estos reductores de velocidad están hechos a la medida para el ensamble directo con los servomotores. El primer modelo es un reductor de ángulo recto para colocar el servomotor en posición vertical, de esta forma el área de desplazamiento del brazo G disminuye y se reducen las dimensiones del brazo B_2 .



Figura 4.3 Reductor de velocidad ABR-060-070-S2-P1. Cortesía de Apex Dynamics, Inc.

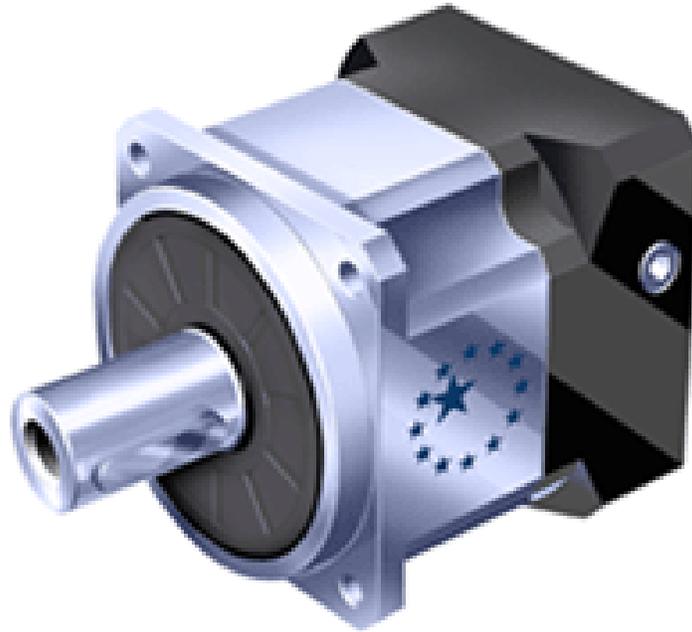


Figura 4.4 Reductor de velocidad AB-060-050-S2-P1. Cortesía de Apex Dynamics, Inc.

4.2 SENSORES DE REFERENCIA Y FINALES DE CARRERA.

Los sensores de referencia son el medio con el cual la computadora conocerá la posición absoluta de los tres brazos del esparcímetro. Se eligieron los sensores fotoeléctricos EATON para incorporarlos a este equipo por su fácil montaje y mínimo de conexiones eléctricas que se simplifica a unas cuantas conexiones de alimentación y señales de salida, que además, trabajan en un rango de voltaje, de 10 a 30 VCD, con lo cual pueden ser leídos directamente por los *Servopacks* de los servomotores. Los modelos de estos sensores son: 11100R6517 y 12100R6517 (fuente y detector).



Figura 4.5 Sensores fotoeléctricos. Cortesía de EATON.

4.3 MECANISMO DE ALINEACIÓN M_1 .

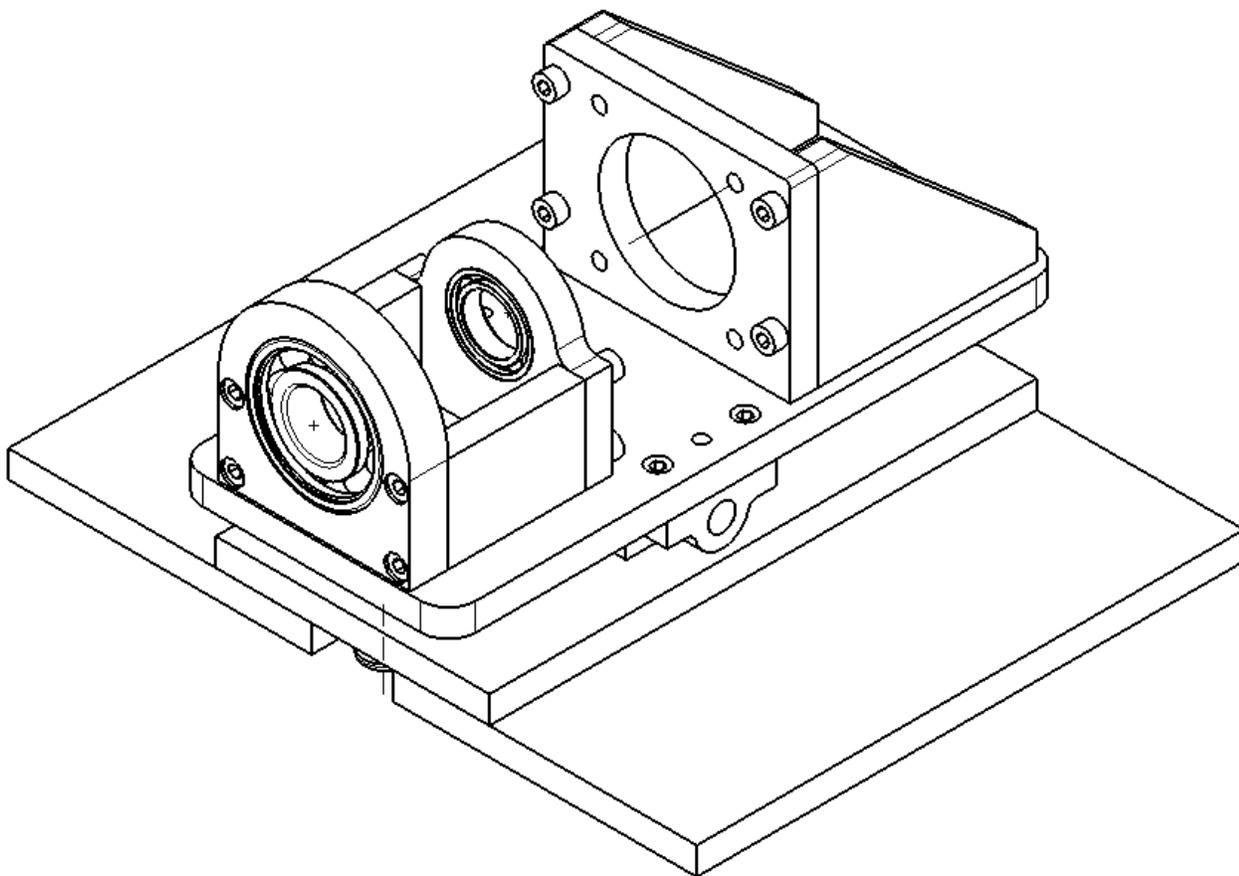


Figura 4.6 Vista isométrica del mecanismo de alineación M_1 .

Descripción del mecanismo

Este mecanismo está constituido por 3 placas P1, P2 y P3 que cumplen la función de alinear el eje de la flecha del brazo B_1 a través del ajuste de los tornillos T1 y T2.

Los piezas S1 y S3 alojan los rodamientos que sujeta a la flecha del brazo. Las piezas S2 brindan estabilidad a las placas S1 y S3.

La pieza S4 es utilizada para colocar el reductor de velocidad. La pieza S5 sirve de apoyo a la pieza S4. Las dimensiones de las piezas S1, S3 y S4 logran que las flechas del brazo B_1 y el reductor de velocidad sean colienales.

Las piezas C y la flecha B permiten el giro de la parte superior del mecanismo para corregir la inclinación de la flecha del brazo B_1 .

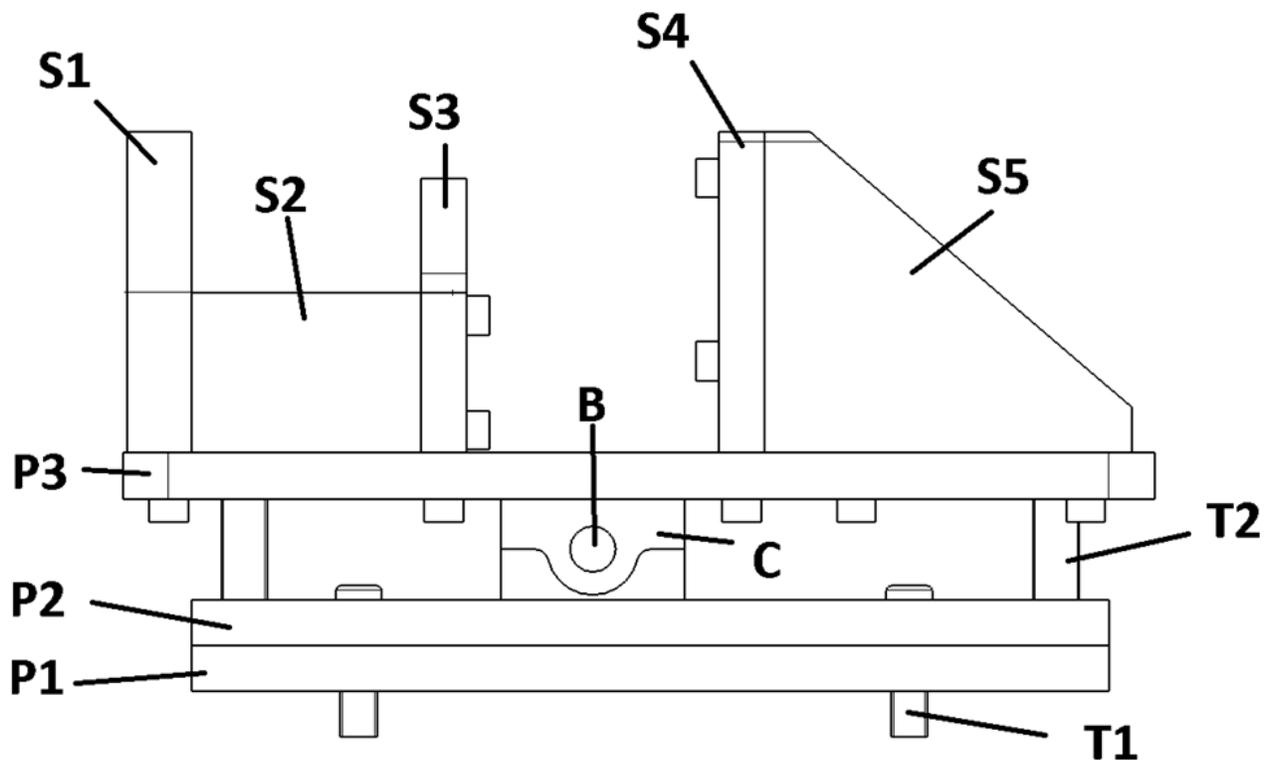


Figura 4.7 Vista lateral del mecanismo de alineación M1.

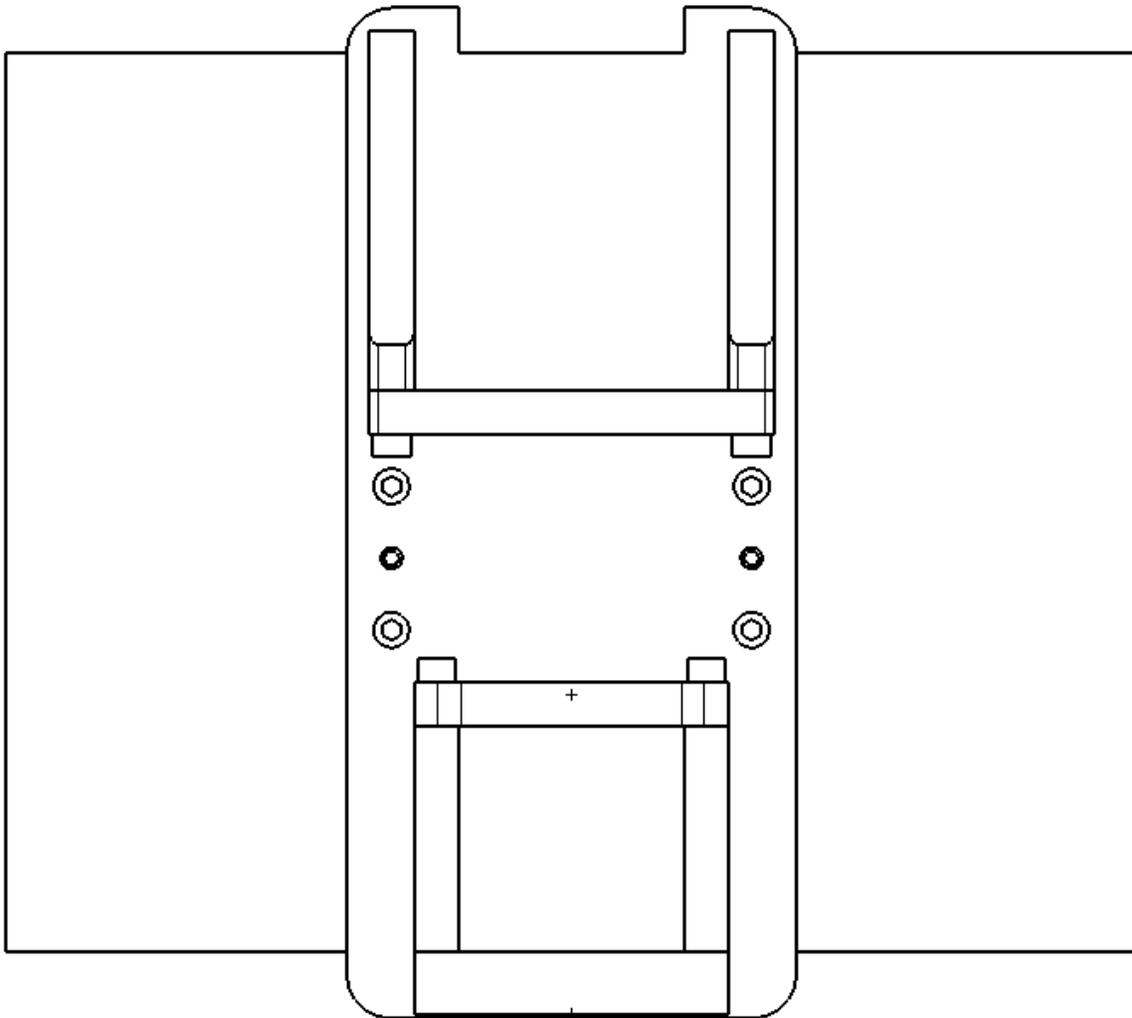


Figura 4.8 Vista superior del mecanismo de alineación M1.

4.4 MECANISMO DE ALINEACIÓN M₂.

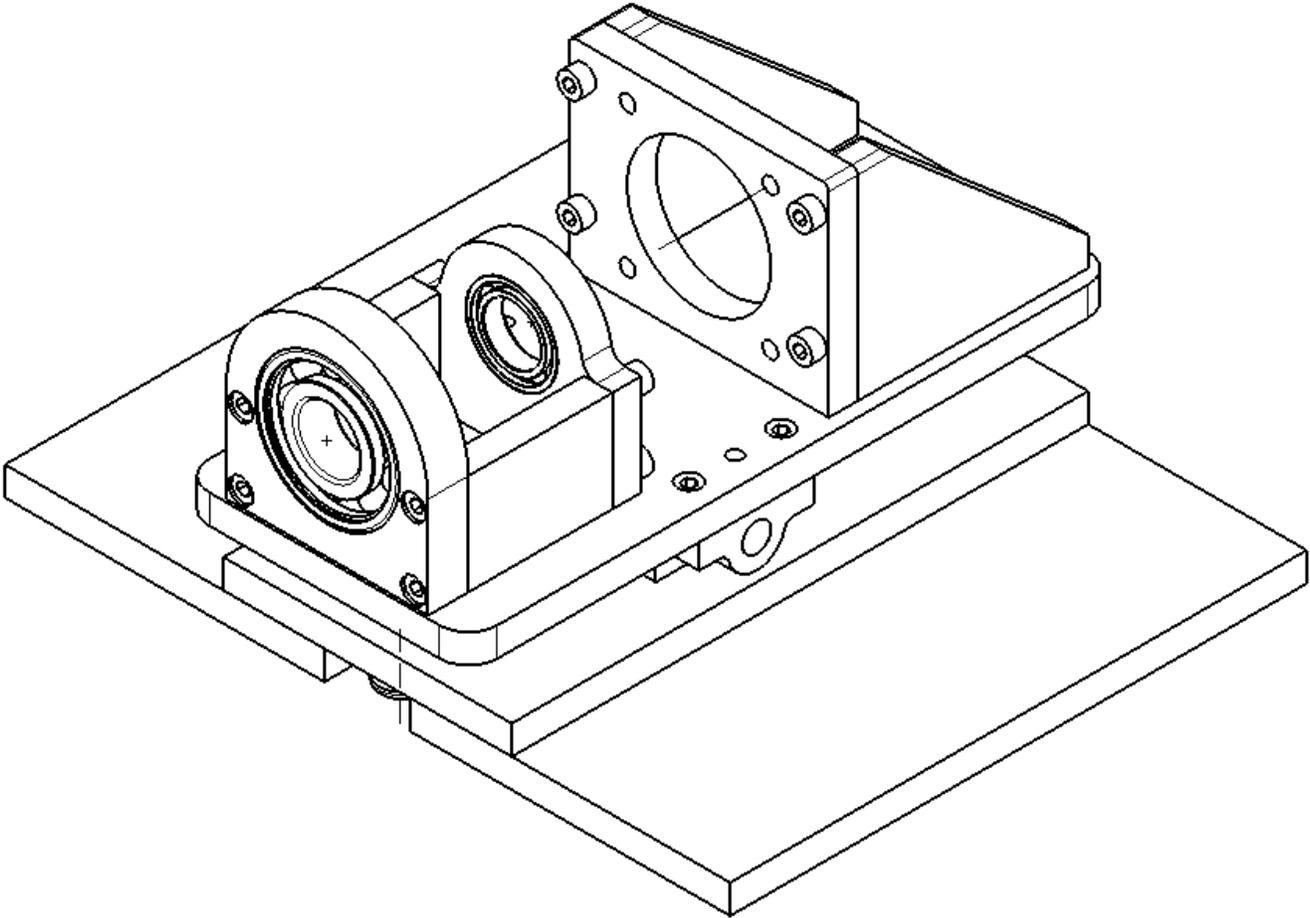


Figura 4.9 Vista isométrica del mecanismo de alineación M₂.

Descripción del mecanismo

Es un diseño similar al del mecanismo M₁, con dos diferencias: la placa P3 carece de la ranura localizada en el lado extremo donde se coloca el reductor de velocidad; y la placa P1 contiene dos ranuras adicionales para el ajuste y fijación del subensamble que sujeta a los sensores fotoeléctricos.

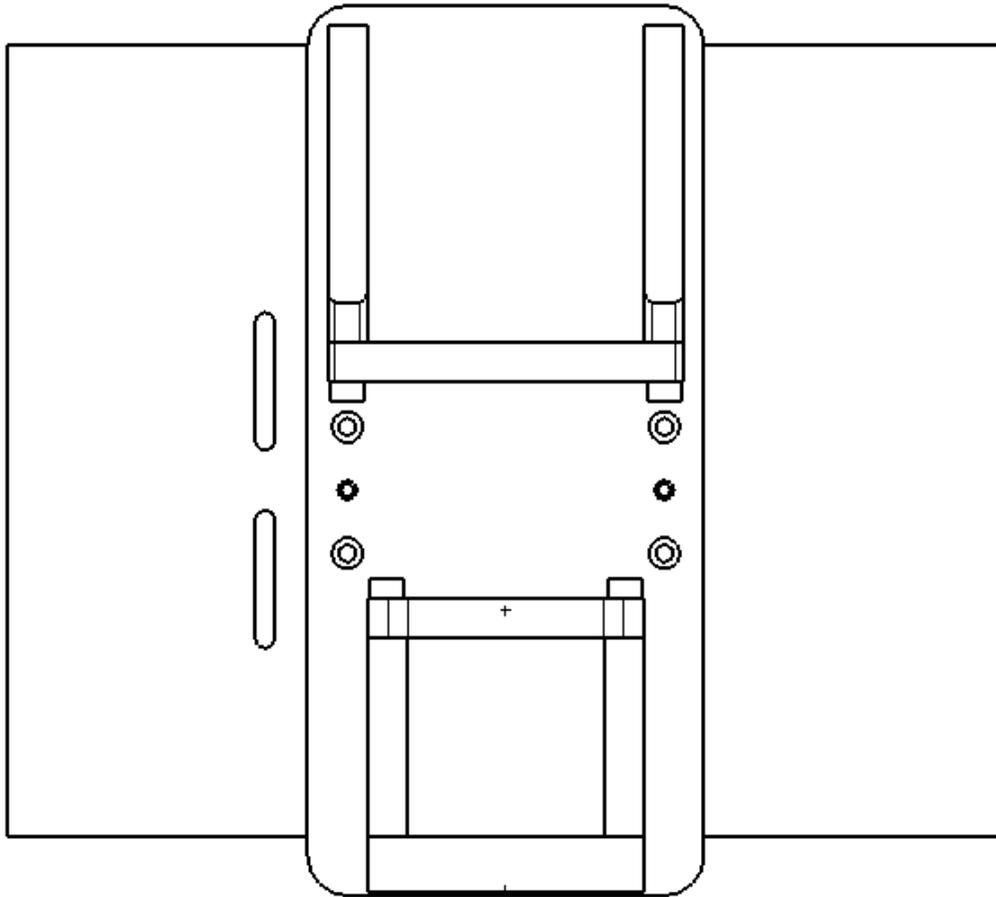


Figura 4.10 Vista superior del mecanismo de alineación M2.

4.5 MECANISMO DE ALINEACIÓN M3.

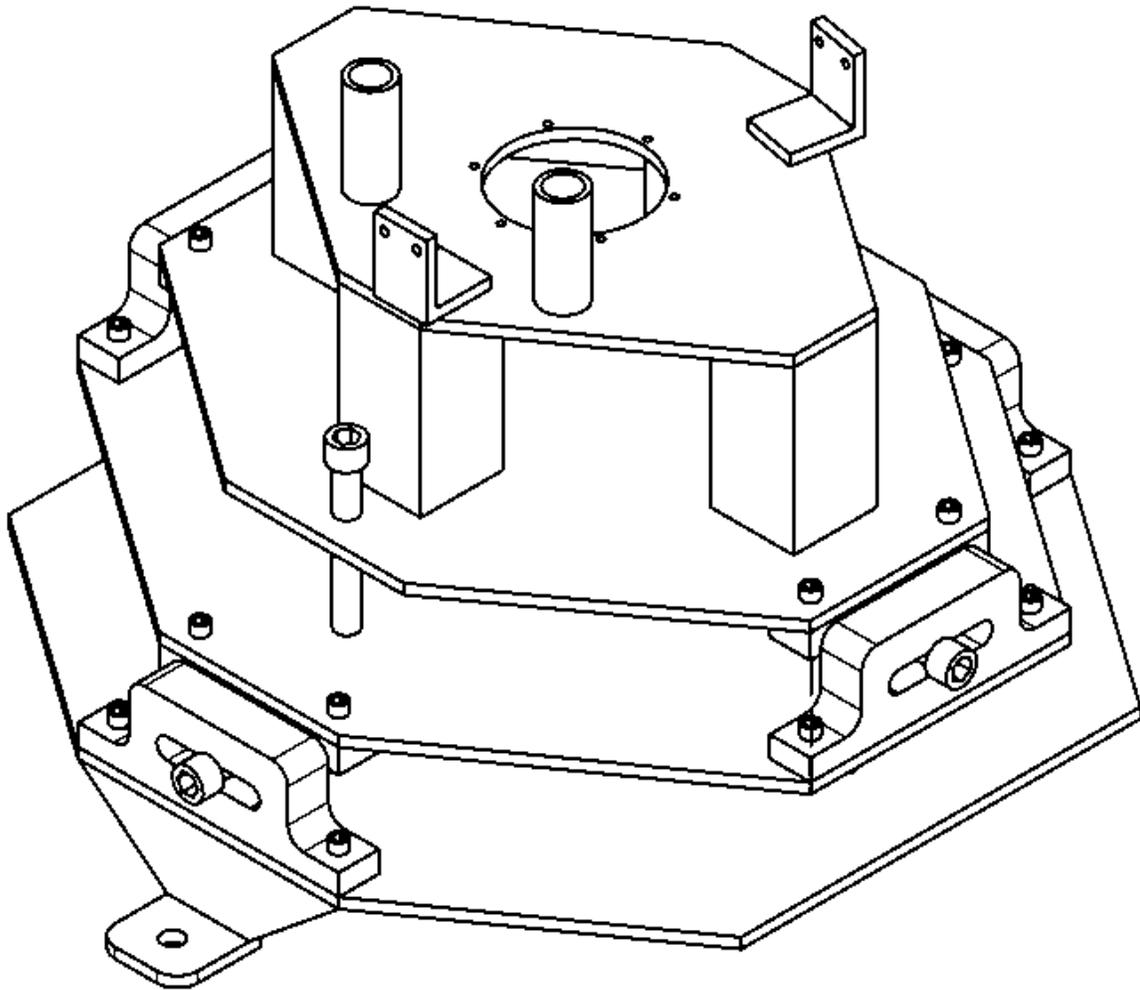


Figura 4.11 Vista isométrica del mecanismo de alineación M3.

Descripción del mecanismo

Este mecanismo está formado por 4 placas: P1, P2, P3 y P4. La placa P4 contiene unas pestañas barrenadas con las que se fijará el equipo al suelo. Las placas P2 y P3 pueden desplazarse e inclinarse por medio de las pizas laterales y los tornillos Allen, los tornillos verticales permiten ajustar y fijar la inclinación de dichas placas.

La placa P1 se encuentra unida a la placa P2 por medio de cuatro columnas que permiten el paso de los cables del servomotor que va montado en la parte superior. También se

encuentran soldados dos tubos que sirven para limitar el rango de movimiento del brazo G, y dos piezas que servirán para sujetar los finales de carrera y el ensamble de los sensor de referencia del brazo G.

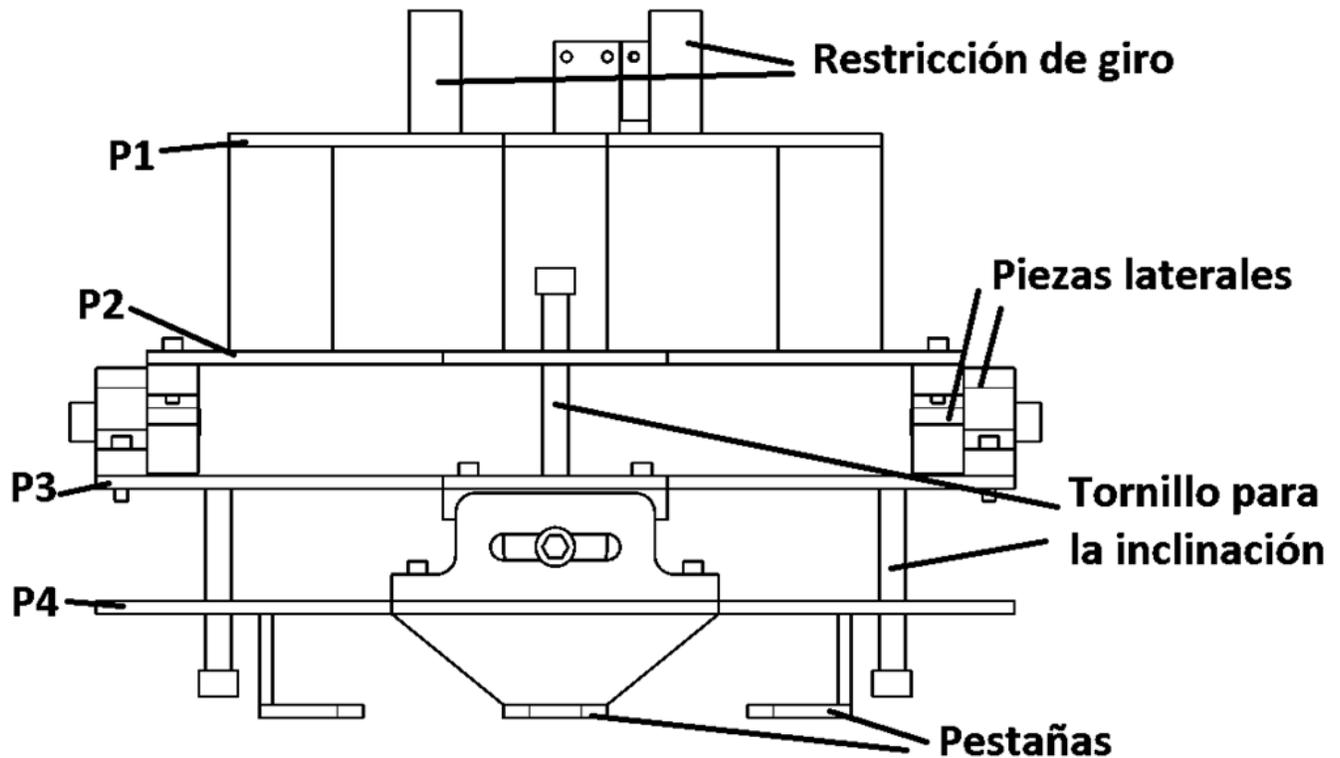


Figura 4.12 Vista lateral del mecanismo de alineación M3

4.6 MECANISMO DE ALINEACIÓN M4.

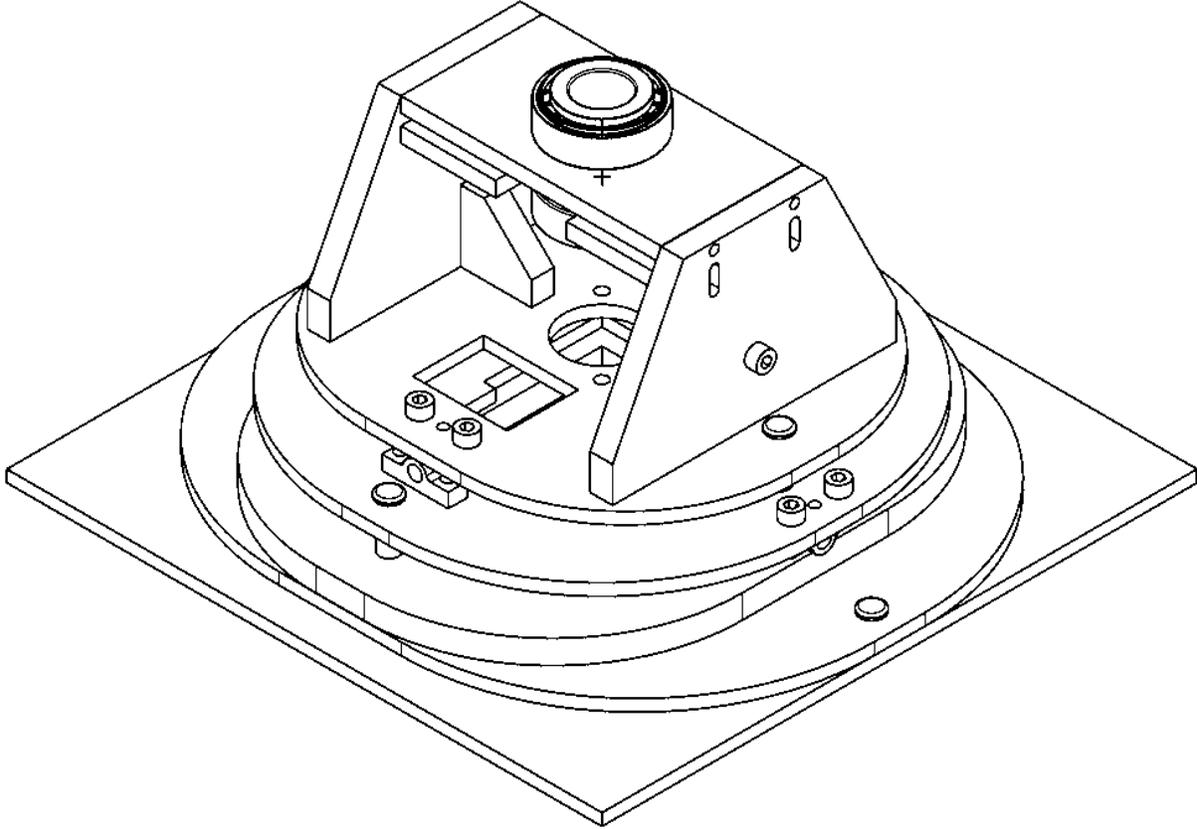


Figura 4.13 Vista isométrica del mecanismo de alineación M4.

Descripción del mecanismo

El mecanismo se forma de 7 placas horizontales: P1,P2,P3,P4,P5,P6 y P7. La placa P1 se fija al brazo G, la placa P2 y P3 se desplazan entre sí perpendicularmente y las placas P4 y P5 pueden variar su ángulo de inclinación. Estas placas se fijan por medio de varios tornillos.

Las placas P6 y P7 contienen a los rodamientos que ajustan a la flecha para el giro de la muestra. Estas placas son sostenidas por por las placas P8 y obtienen estabilidad a través de las placas P9.

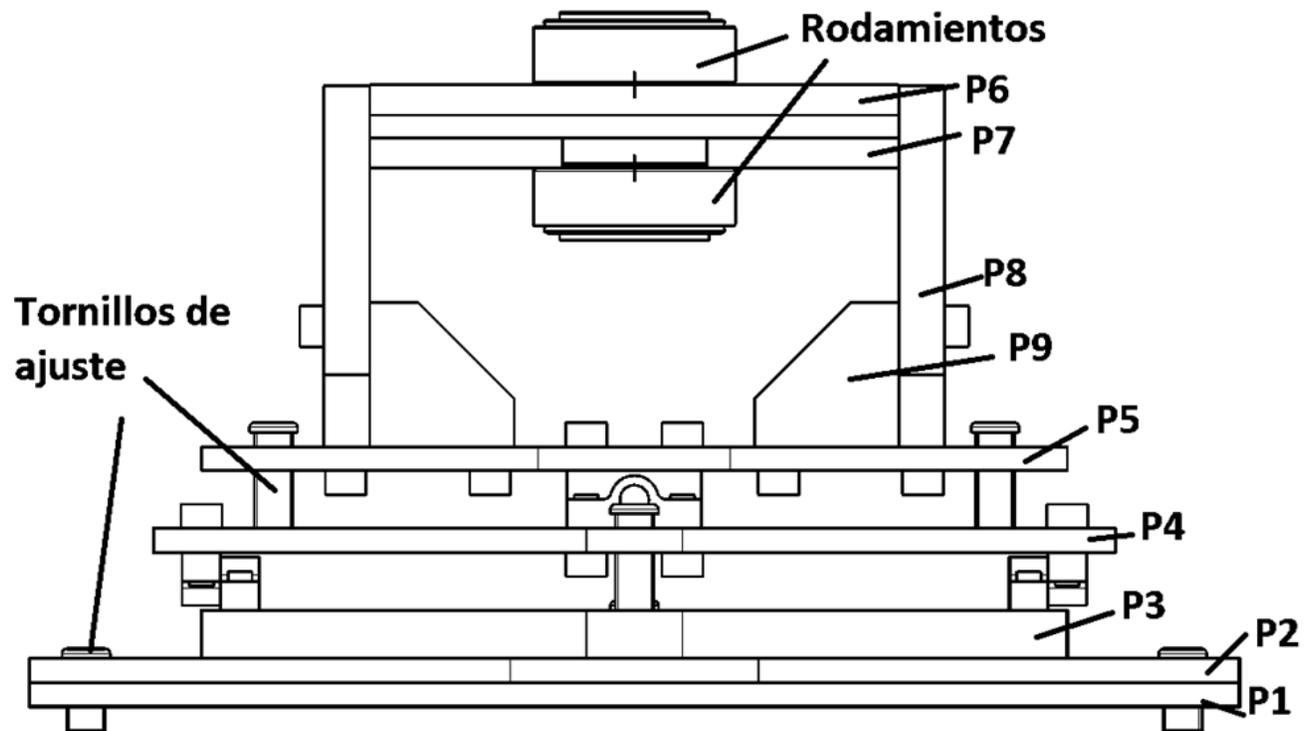


Figura 4.14 Vista lateral del mecanismo de alineación M4.

4.7 MECANISMO DE ALINEACIÓN M5.

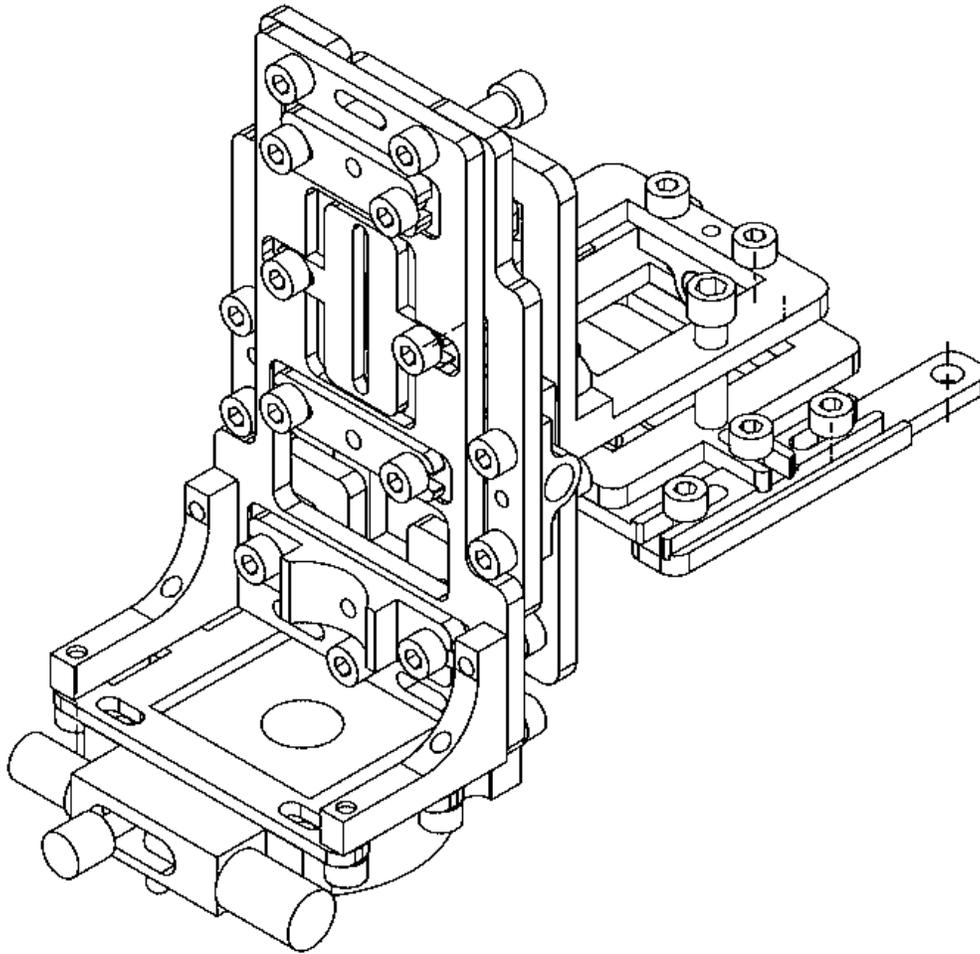


Figura 4.15 Vista isométrica del mecanismo de alineación M5.

Descripción del mecanismo

El mecanismo contiene dos placas de inclinación que se ajustan por medio de tornillos, cuenta con dos placas que pueden deslizarse en dos direcciones en el plano y se sujetan por medio de tornillos. En el extremo inferior se incluyó una platina rotacional que sirve para rotar uno de los retardadores 45° con respecto de la posición del otro.

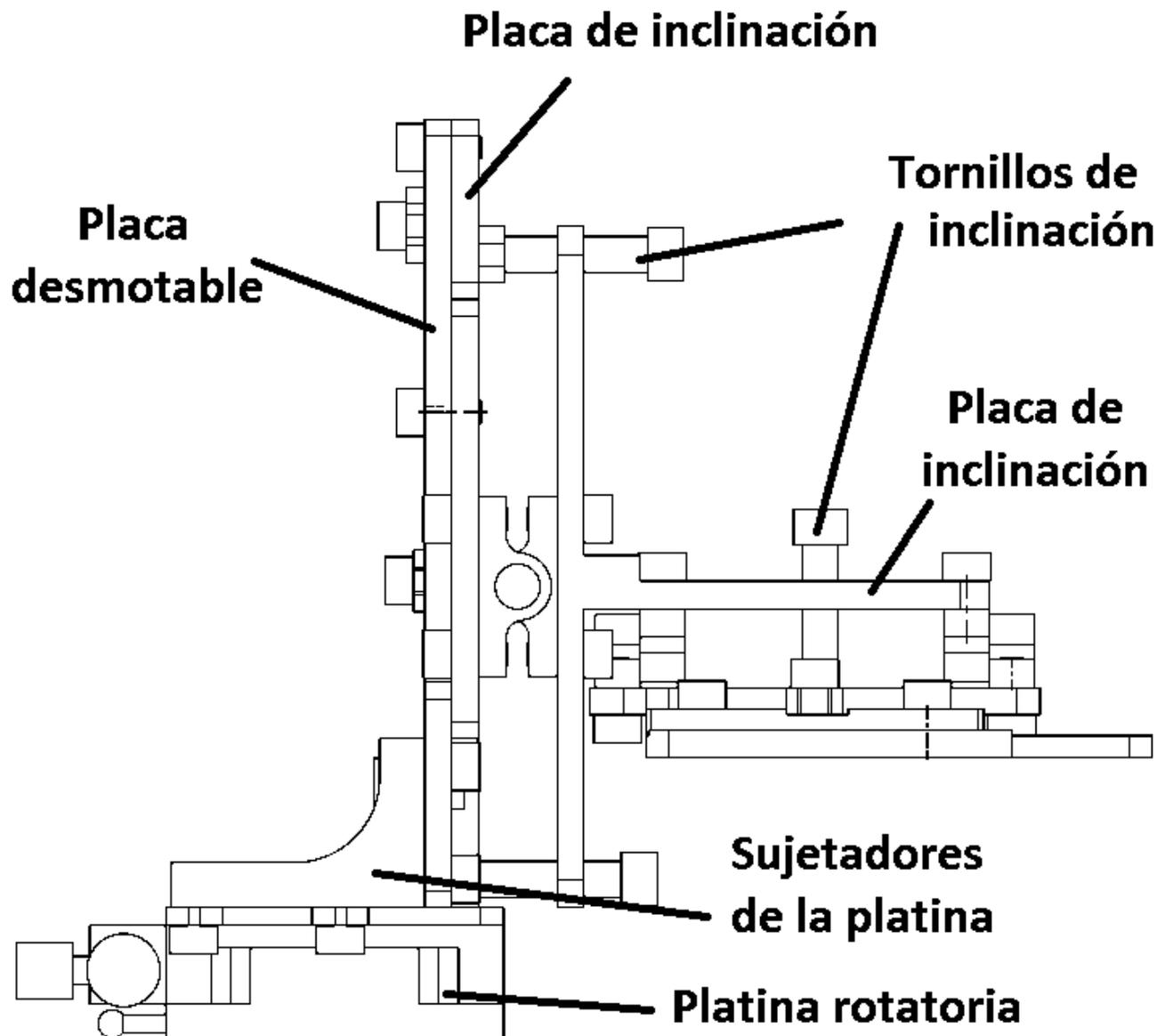


Figura 4.16 Vista lateral del mecanismo de alineación M5.

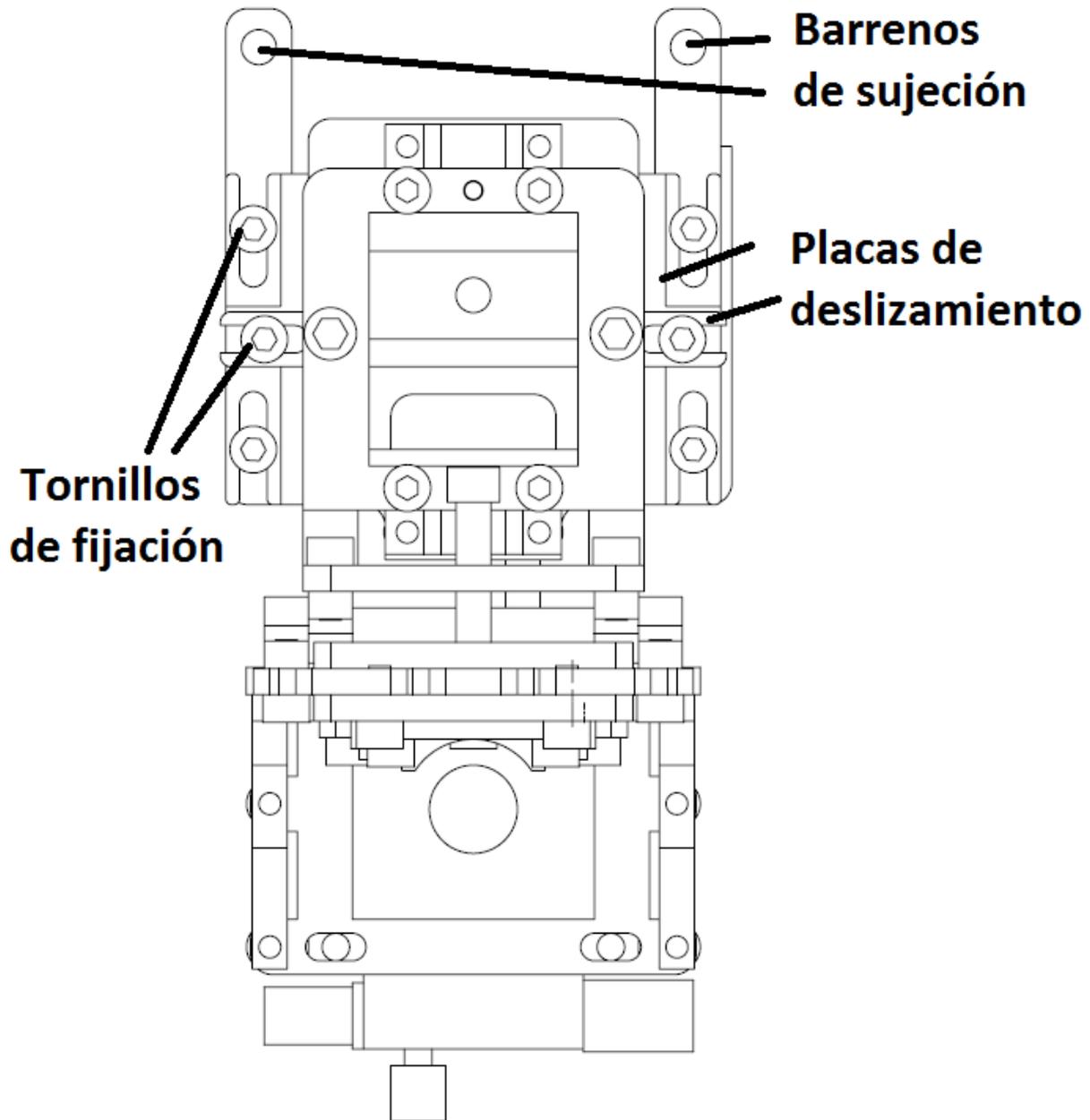


Figura 4.17 Vista superior del mecanismo de alineación M5

El mecanismo cuenta con una placa desmontable (Figura 4.18) que facilita la incorporación y manipulación de los componentes ópticos por parte del usuario del esparcímeter, sin que se vea afectada la alineación del equipo. La placa incorpora placas que compensan las diferencias de altura de los componentes ópticos y permiten ajustes en la alineación.

Esta placa cuenta con una ranura en la parte superior y dos en la parte inferior para colocarla a 180° y así invertir el sentido en que apunta el láser para dirigirlo hacia el sensor*.

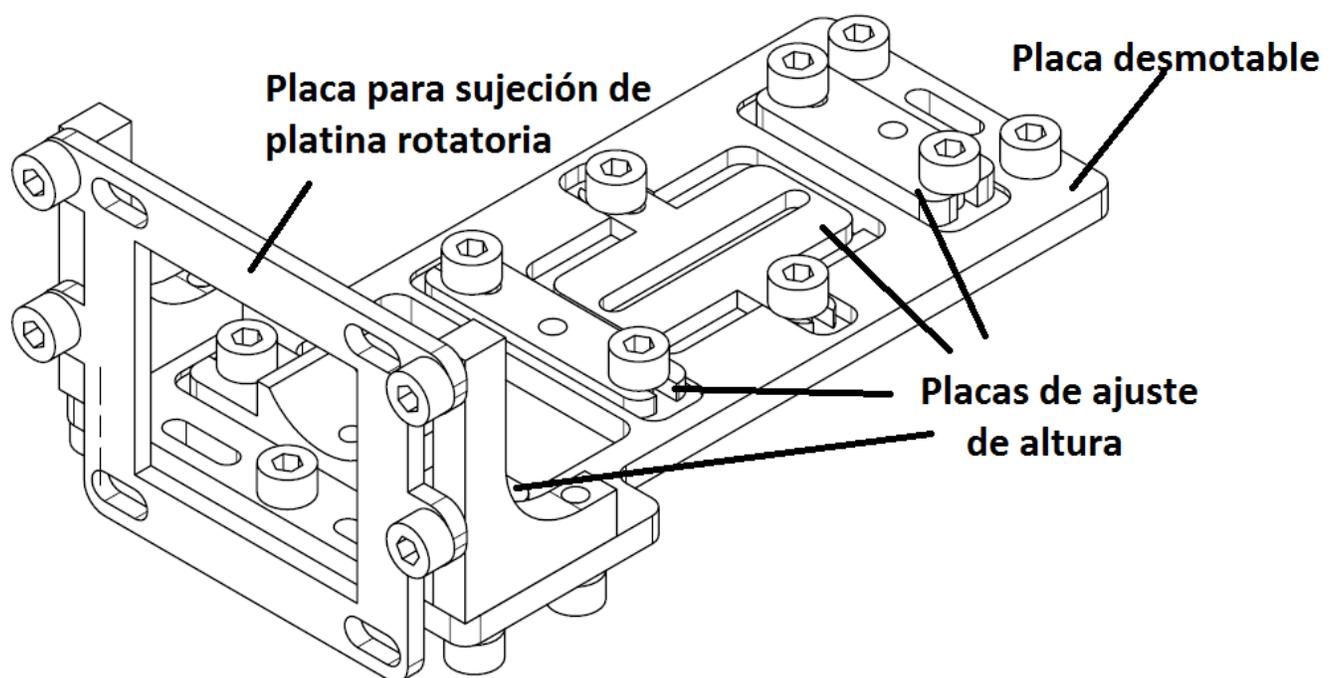


Figura 4.18 Placa desmontable del mecanismo de alineación M5.

*Este requerimiento surgió después de avanzar en el diseño del mecanismo y fue incorporado en un rediseño del mismo. Esta prueba se realiza como verificación del experimento, tiene relación con el método de calibración óptica. Y es ajeno al funcionamiento del esparcímeter.

4.8 MECANISMO DE ALINEACIÓN M6.

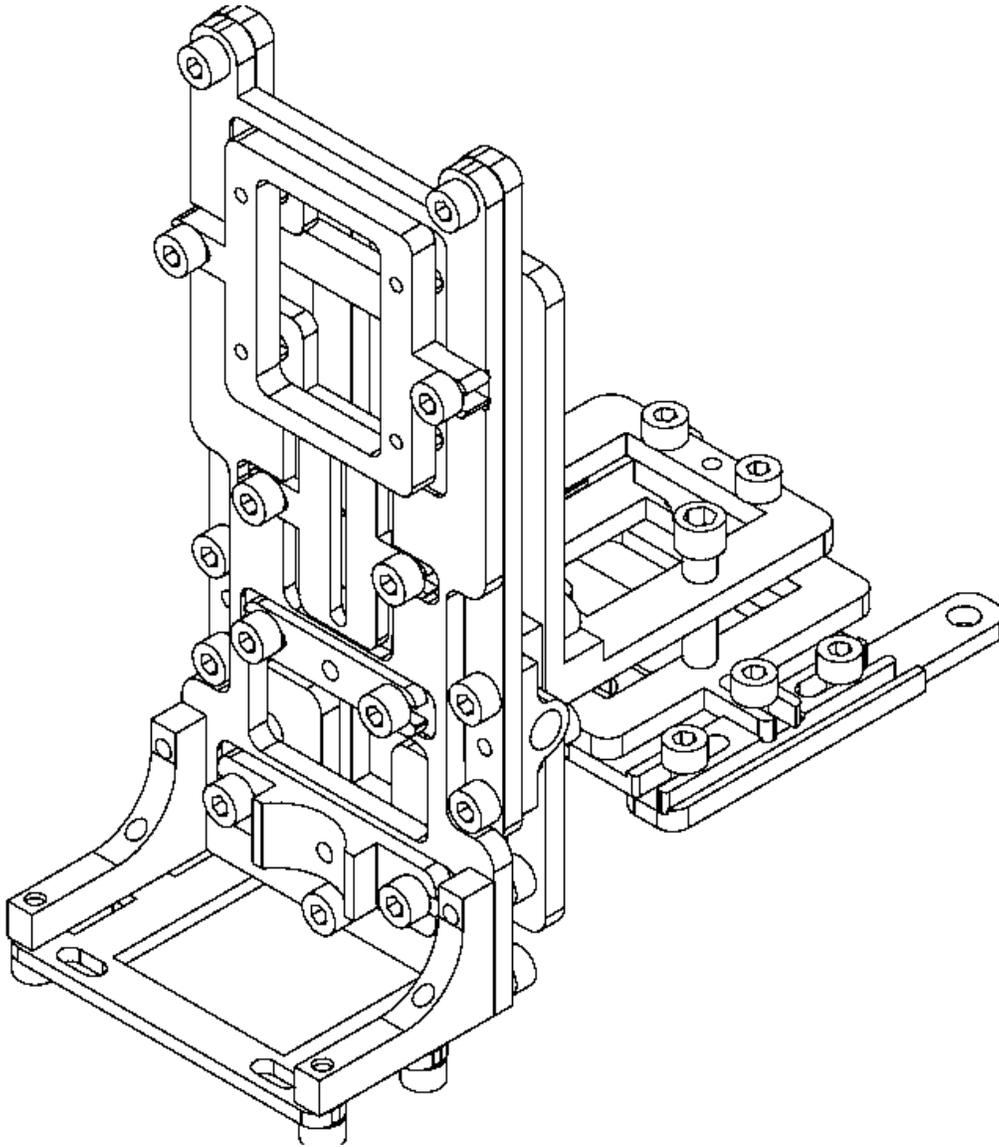


Figura 4.19 Vista isométrica del mecanismo de alineación M6.

Descripción del mecanismo

Este mecanismo tiene una forma y modo de emplearse similar al mecanismo de alineación M5, variando sólo algunas de las medidas y diferenciando en la forma de la placa desmontable y las placas de ajuste de altura.

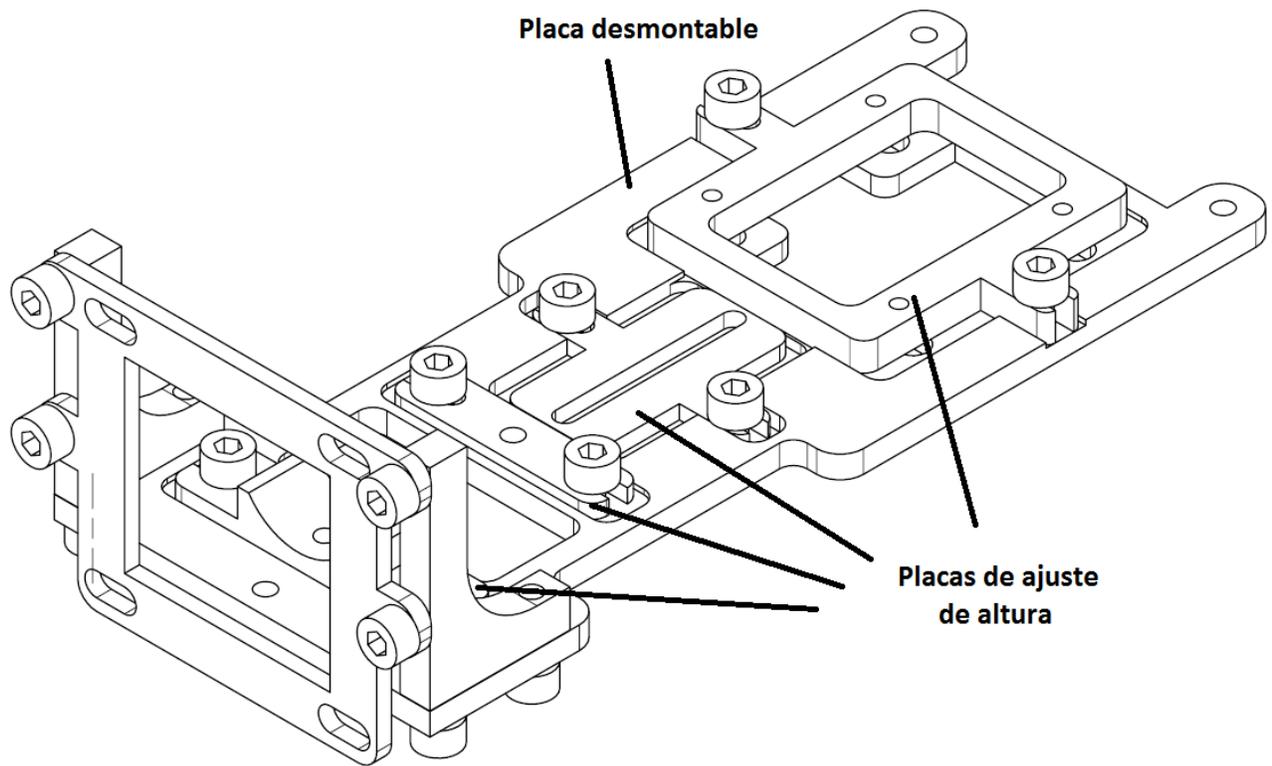


Figura 4.20 Placa desmontable del mecanismo de alineación M6

4.9 MECANISMO DE AJUSTE M7.

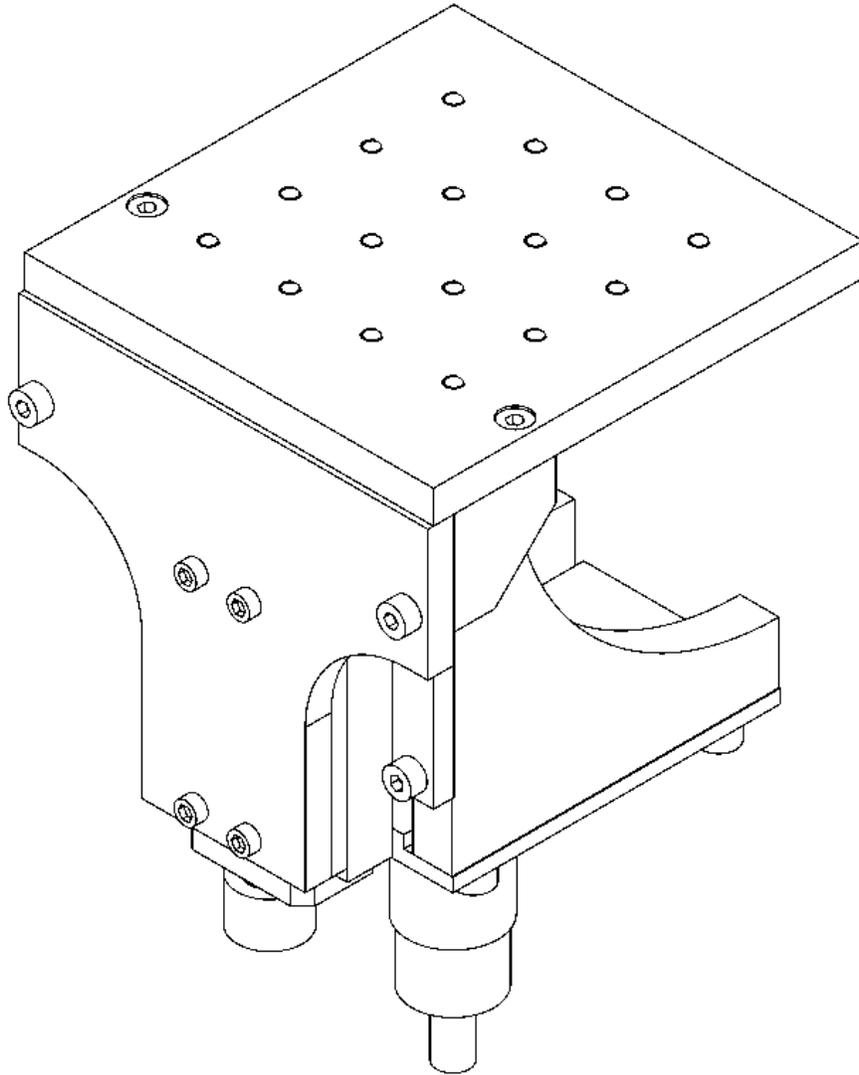


Figura 4.21 Vista isométrica del mecanismo de ajuste M7.

Descripción del mecanismo

Este mecanismo contiene básicamente una flecha para el giro de la muestra, una placa para el montaje de la muestra y una platina para variar la posición de la muestra.

La flecha se une a la placa P1 que contiene las placas P2 que sujeta a la platina. Las placas P3 y la placa para montaje de la muestra son perpendiculares y se unen por medio de la pieza P4. La platina sujeta a la placa P3.

La muestra se fija al mecanismo haciendo uso de alguno de los barrenos del arreglo que tiene la placa para montaje de la muestra.

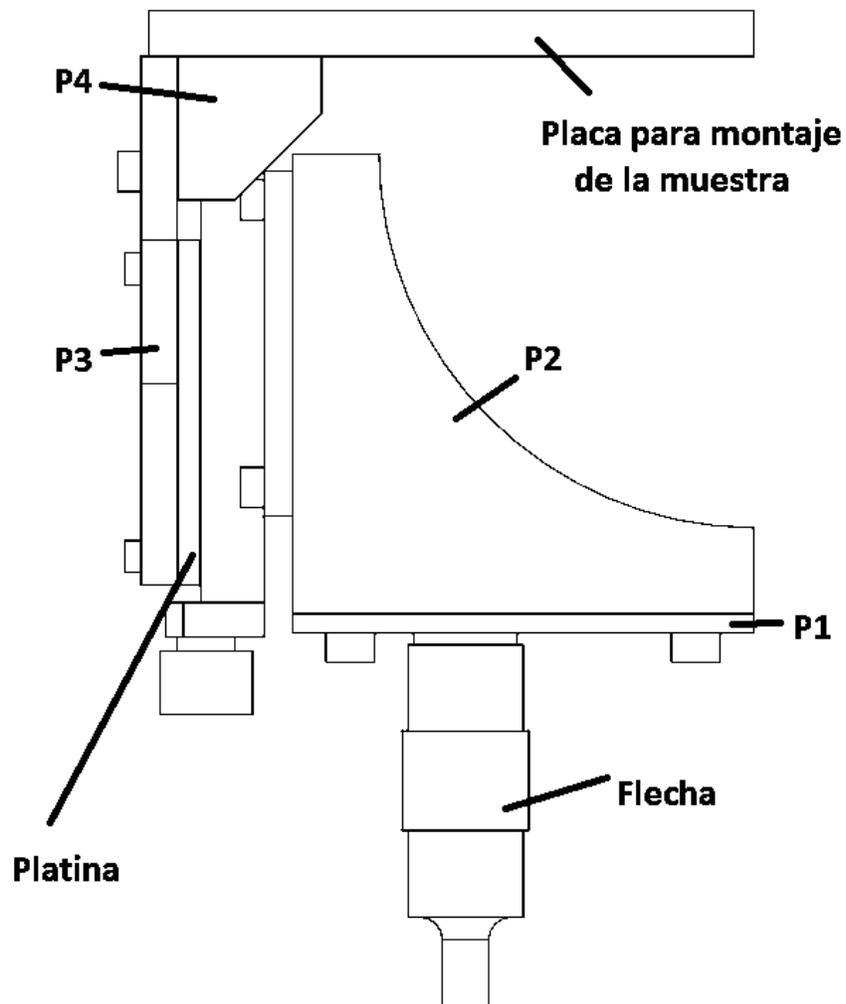


Figura 4.22 Vista lateral del mecanismo de ajuste M7.

4.10 SUJECIÓN DE SENSORES DE REFERENCIA PARA EL BRAZO B_1 (SSRB₁)

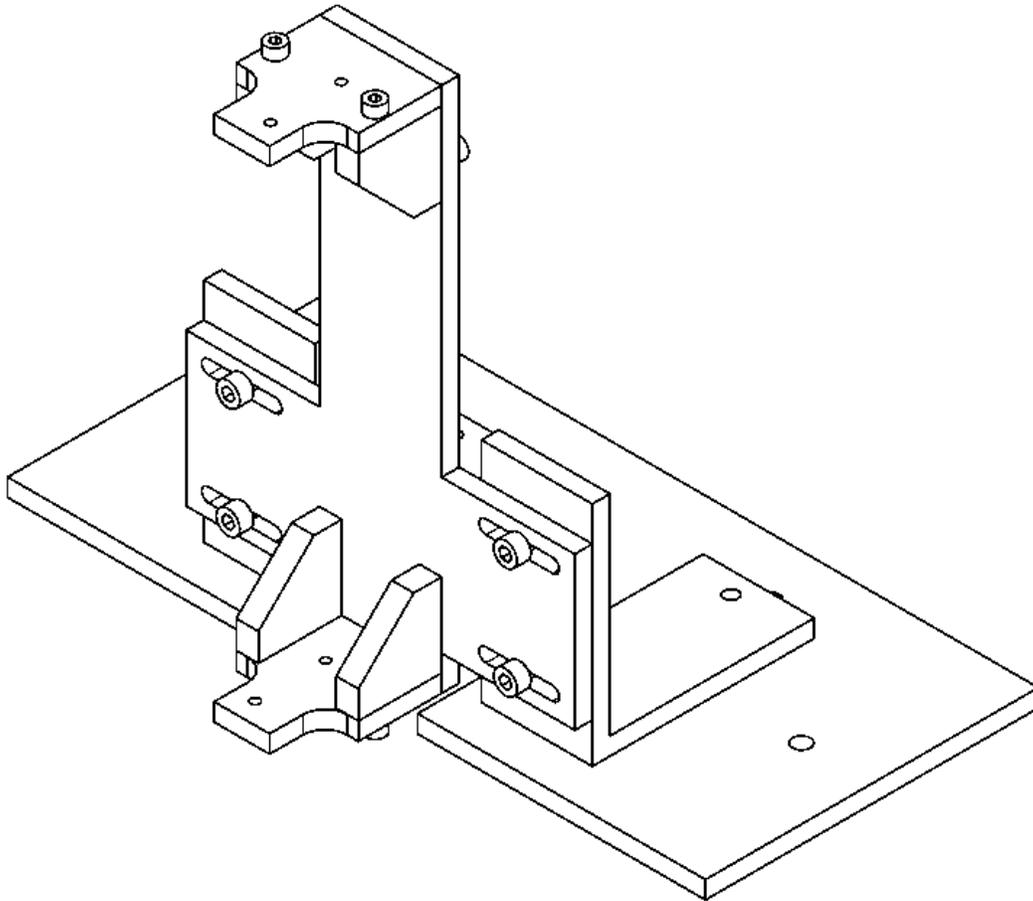


Figura 4.23 Vista isométrica del ensamblaje SSRB₁.

Descripción del ensamblaje

Este mecanismo está formado por la placa P1 que se fija al ensamblaje al brazo G. Los ángulos A1 orientan la placa P2 de forma perpendicular a la placa P1. Las piezas P3 unen las placas P4 donde se fijan los sensores fotoeléctricos (de referencia).

Las ranuras que tienen las placas P2 y P1 permiten variar la posición de los sensores con la finalidad de ajustar la referencia del brazo B_1 .

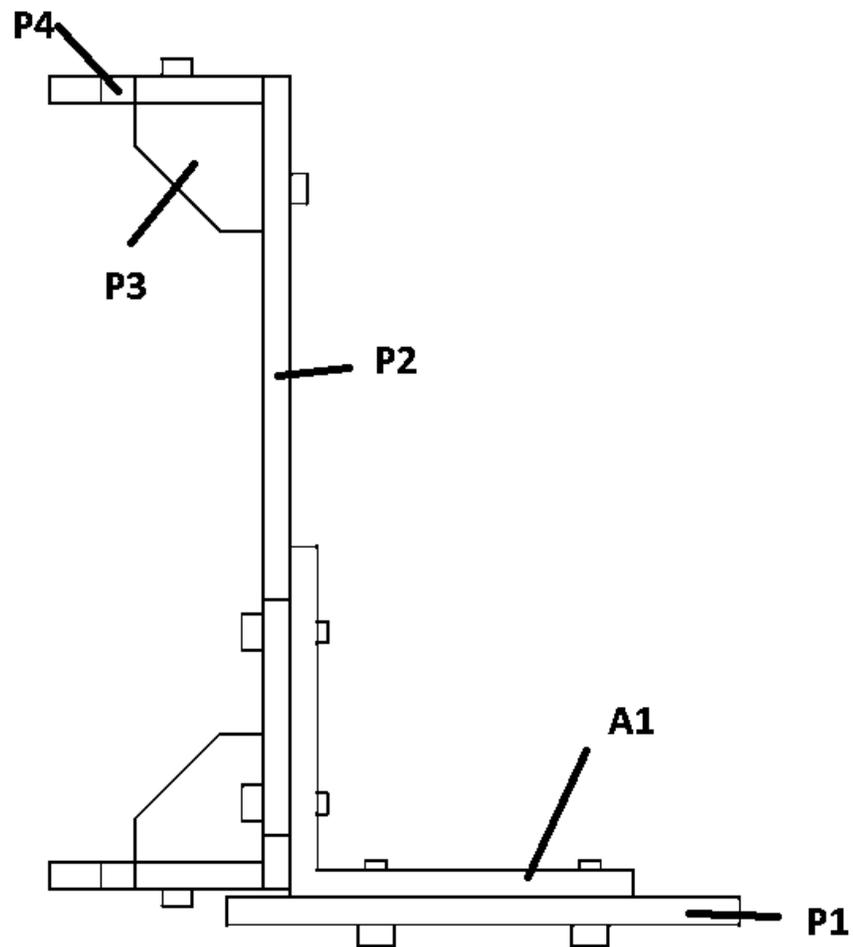


Figura 4.24 Vista lateral del ensamble de SSRB₁

4.10 SUJECIÓN DE SENSORES DE REFERENCIA PARA EL BRAZO B₂.

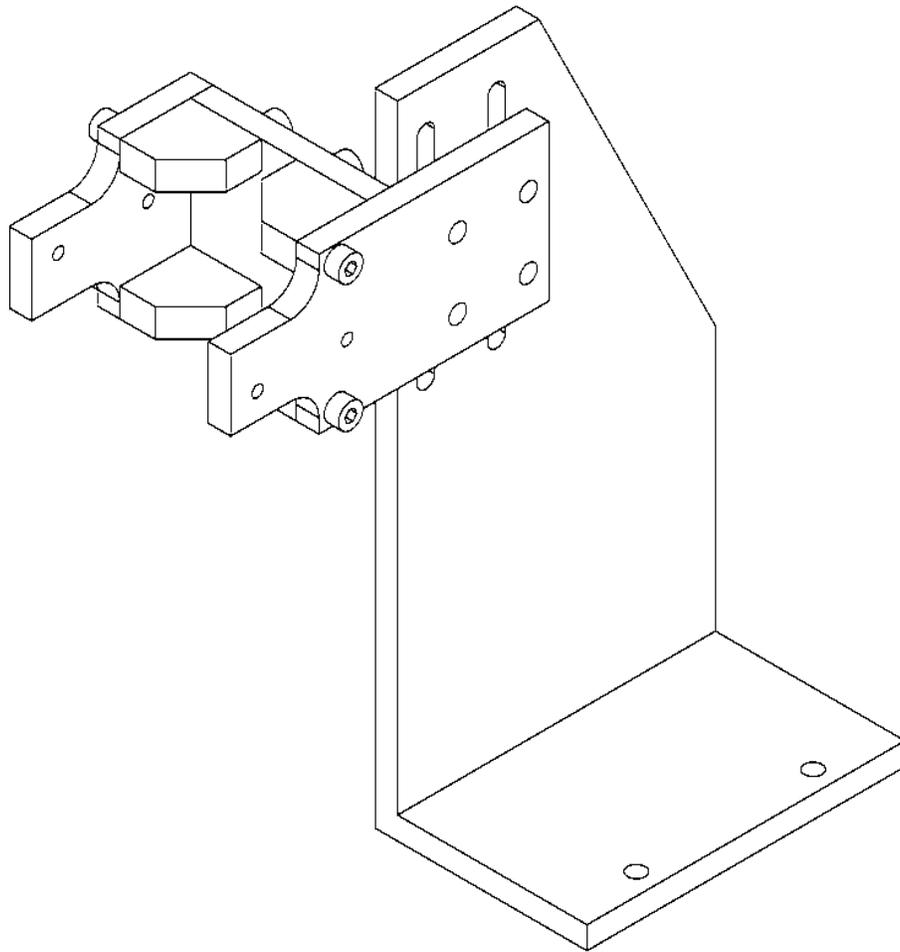


Figura 4.25 Vista isométrica del ensamblaje SSRB₂.

Descripción del ensamblaje:

Este ensamblaje se sujeta a la placa del mecanismo M1 por medio de la pieza P1. En las piezas P4 y P3 se colocan los sensores fotoeléctricos.

Las piezas P5 mantienen unidas las piezas P4 y P3 a la placa P2. Con las ranuras de la placa P1 se ajusta la posición de referencia a 90° para el brazo B₂.

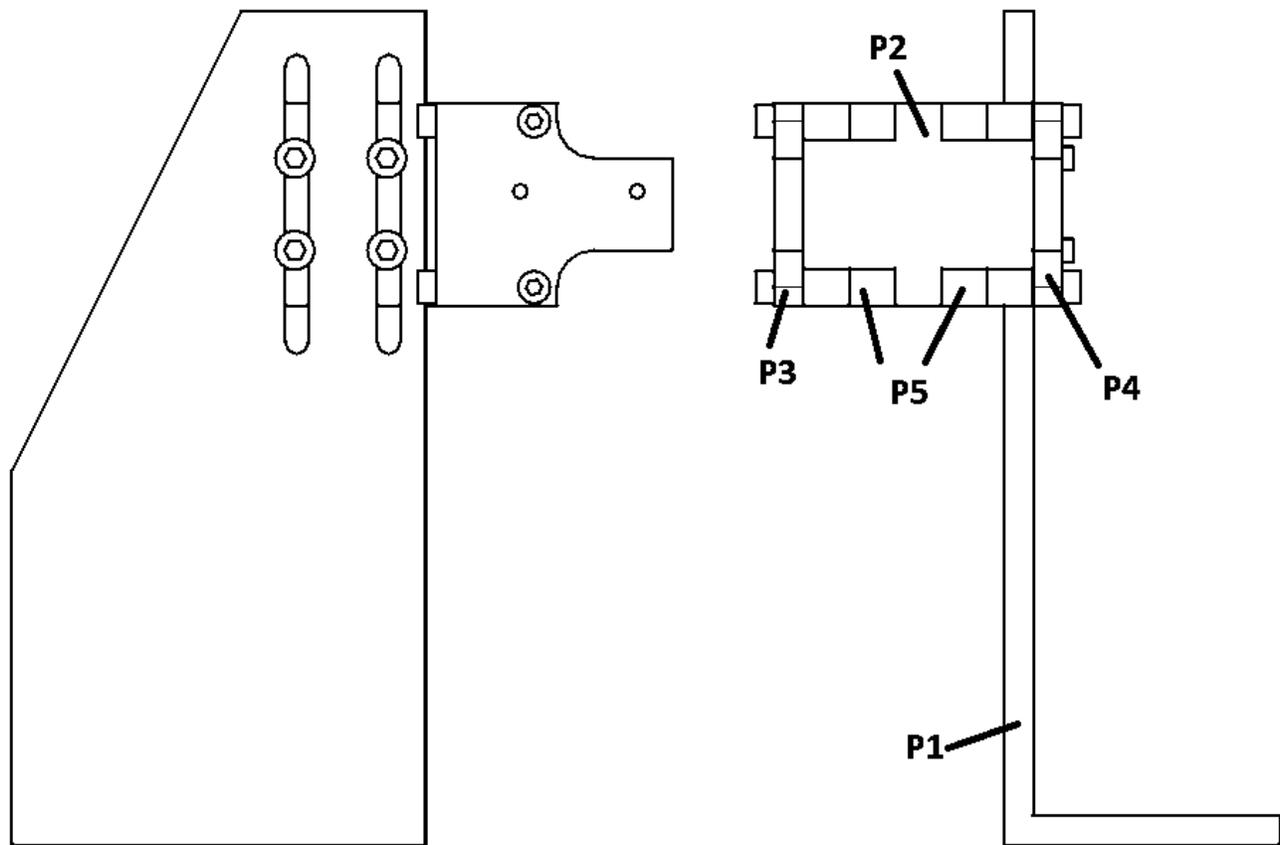


Figura 4.26 Vista lateral y frontal del ensamble SSRB₂.

4.11 SUJECIÓN DE SENSORES DE REFERENCIA PARA EL BRAZO G

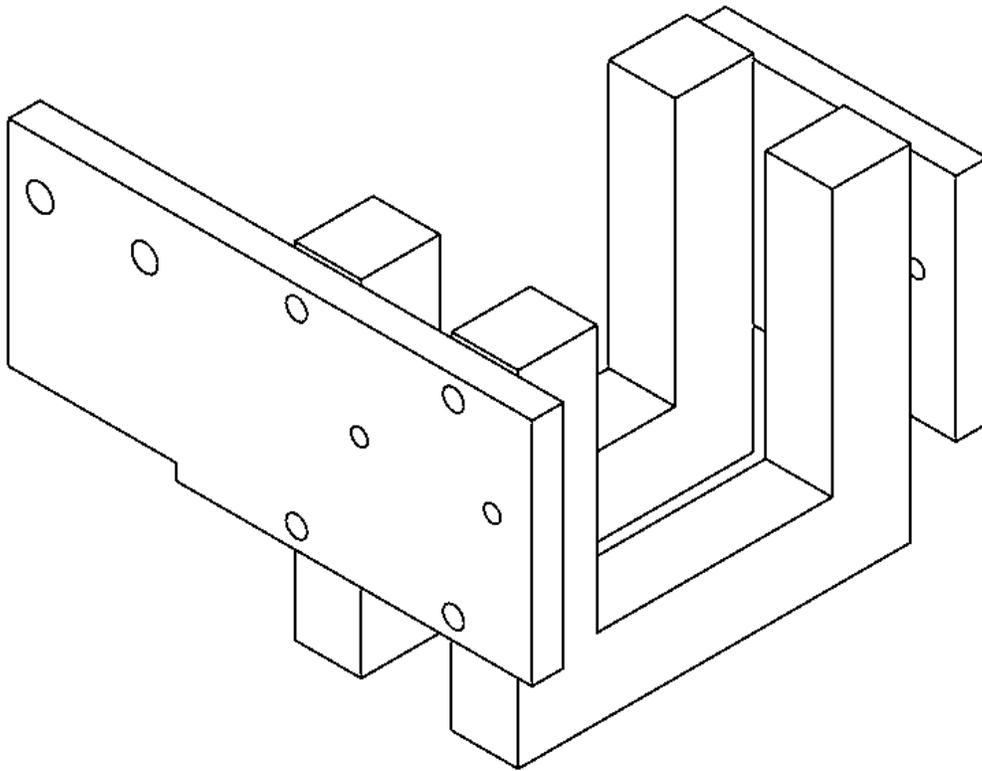


Figura 4.27 Vista isométrica del ensamblaje SSRBG.

Descripción del ensamblaje.

En este mecanismo se colocan los sensores fotoeléctricos sobre las placas P1 y P2. Estas se unen por medio de las piezas P3. La placa P1 se une al mecanismo de alineación M3.

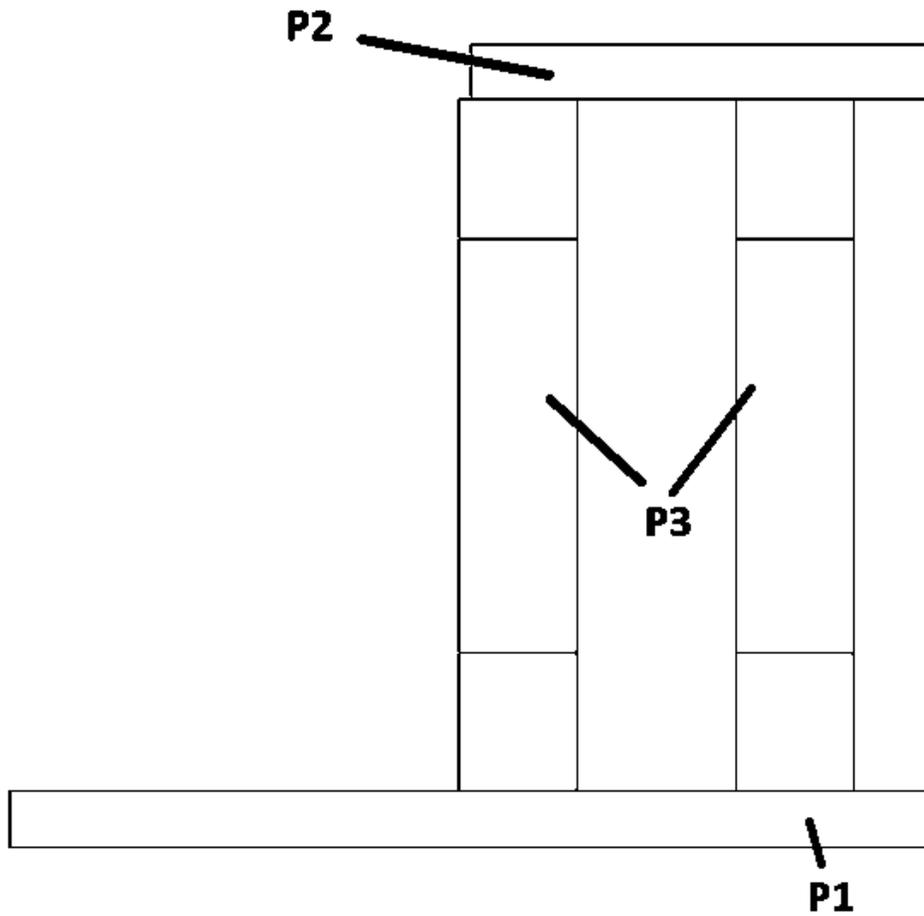


Figura 4.28 Vista superior del ensamble SSRBG.

4.12 BRAZO B1.

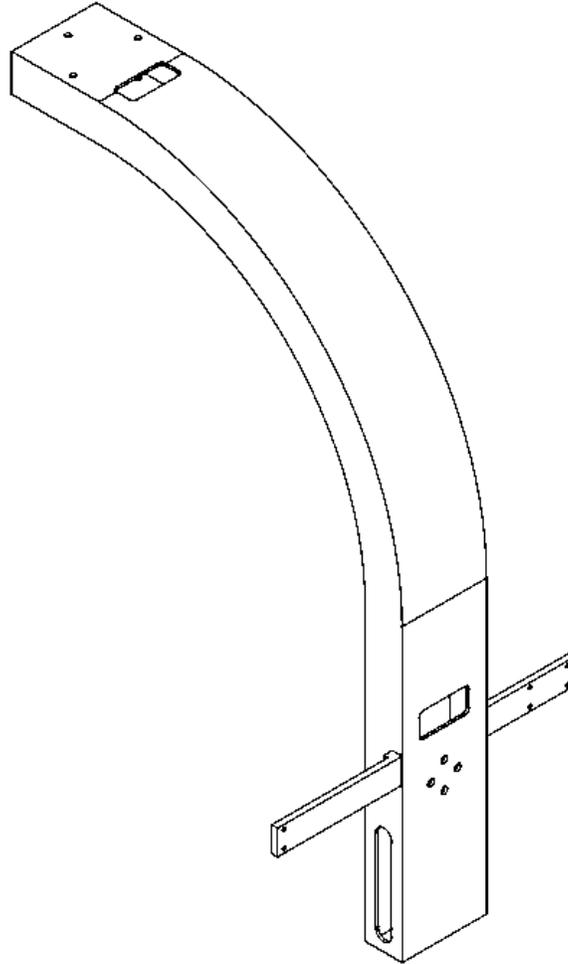


Figura 4.29 Vista isométrica del Brazo B1.

Descripción de la pieza.

Este brazo contiene cuatro barrenos en las paredes inferiores para ensamblarlo por medio de tornillos a una flecha. Contiene tres barrenos en las paredes de la parte superior para incorporar el mecanismo de alineación M5. Tanto en la parte superior como inferior tiene una ranura para resguardar los cables de los componentes ópticos. Las ranuras laterales sirven para ajustar y sujetar el contrapeso con tornillos. Por último, contiene dos piezas laterales con barrenos, para incorporar levas que sirven para activar los finales de carrera.

4.13 BRAZO B2.

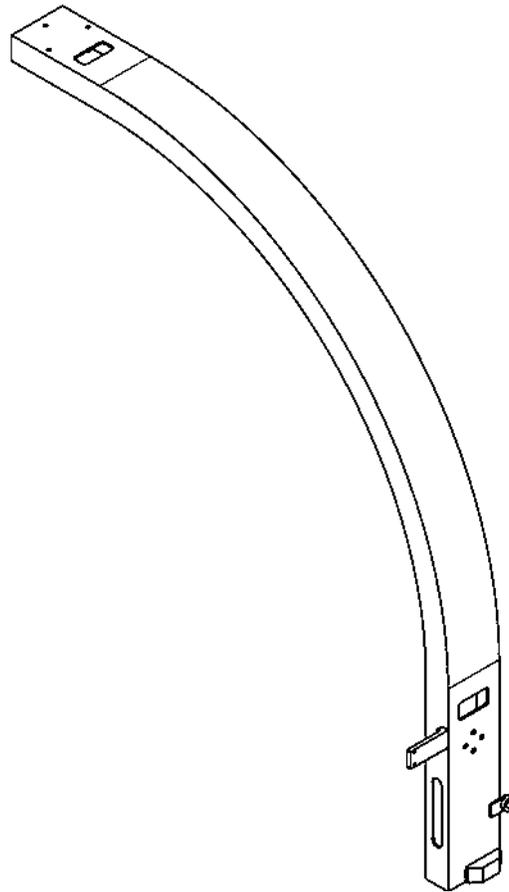


Figura 4.30 Vista isométrica del Brazo B2.

Descripción de la pieza.

Al igual que el brazo B_1 tiene barrenos para el ensamble de una flecha en la parte inferior y ranuras para el paso de los cables de los componentes ópticos, en la parte superior tiene barrenos para incorporar el mecanismo de alineación M6. Tiene ranuras laterales para el ajuste y sujeción del contrapeso. Contiene una pieza para la incorporación de una leva y tiene una leva integrada en la pared inferior. Por último, contiene una pieza para la sujeción de un obstructor para los sensores fotoeléctricos.

4.14 BRAZO G.

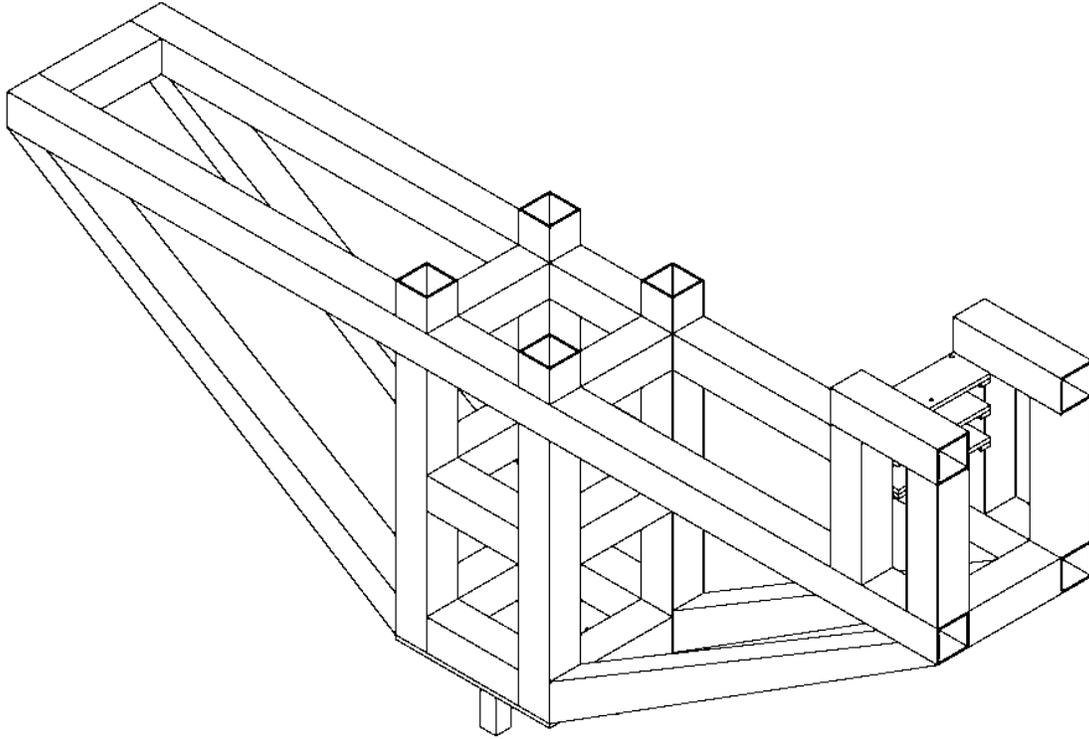


Figura 4.31 Vista isométrica del Brazo G.

Descripción del ensamble.

Esta pieza es una estructura que soporta en un extremo al mecanismo de alineación M1, en el otro un contrapeso y en la parte central el mecanismo de alineación M4.

Contiene dos placas para la incorporación de los finales de carrera del brazo B_1 . En la parte inferior tiene una placa barrenada para fijar el brazo al servomotor. Una pieza tubular unida a dicha placa restringe el rango de movimiento (en conjunto con la pieza del mecanismo de alineación M3). Una pieza en la parte inferior sirve para incorporar una leva que acciona los finales de carrera de este brazo.

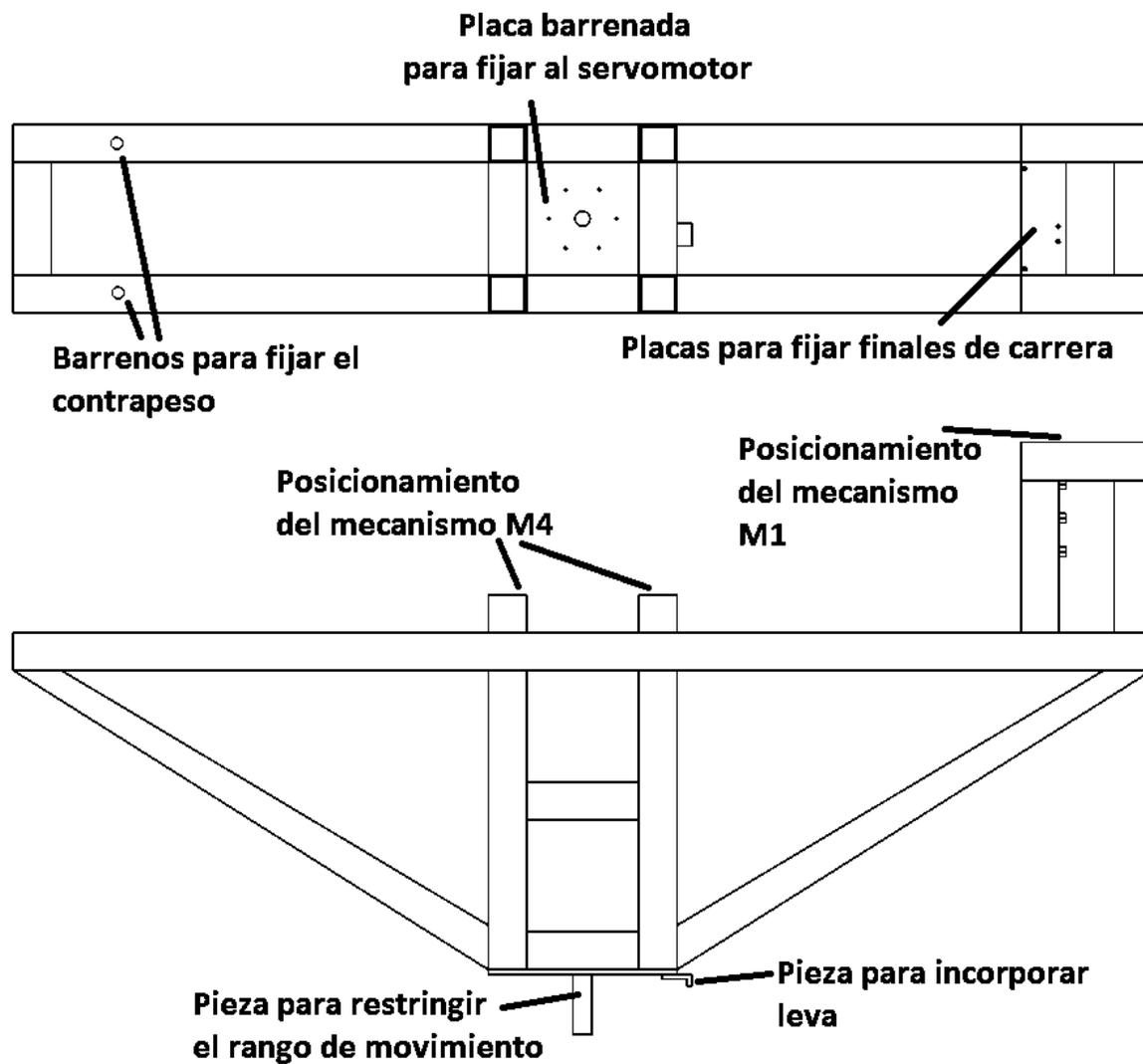


Figura 4.32 Vista superior y frontal del Brazo G.

4.15 PEDESTAL.

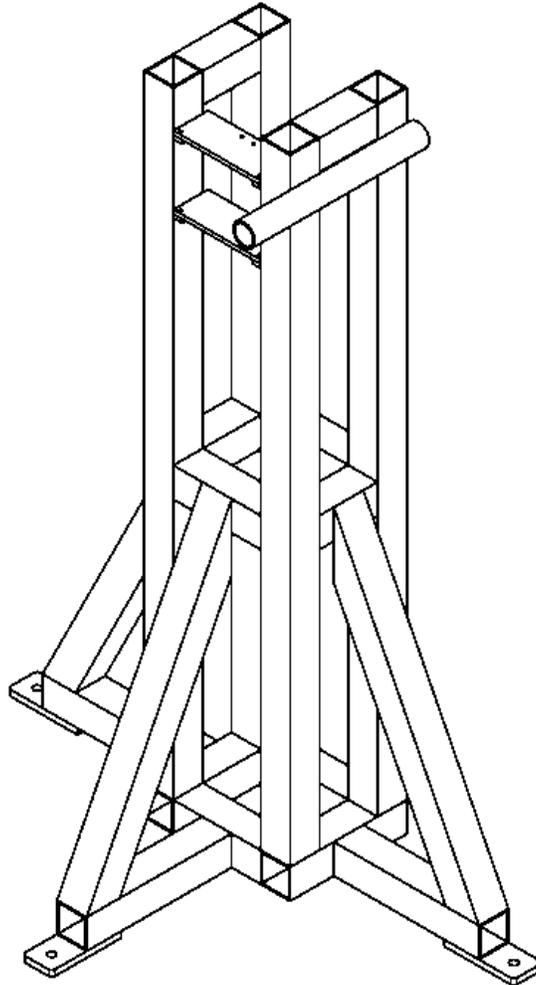


Figura 4.33 Vista isométrica del Pedestal.

Descripción del ensamble.

Esta pieza es una estructura que mantiene fija y proporciona altura al mecanismo de alineación M2 para quedar al nivel del resto del equipo.

Contiene tres pestañas en la parte inferior para ser fijada al suelo, dos placas en la parte superior para colocar los finales de carrera del brazo B_2 , y una pieza en la parte lateral que sirve para restringir el rango de movimiento del brazo B_2 .

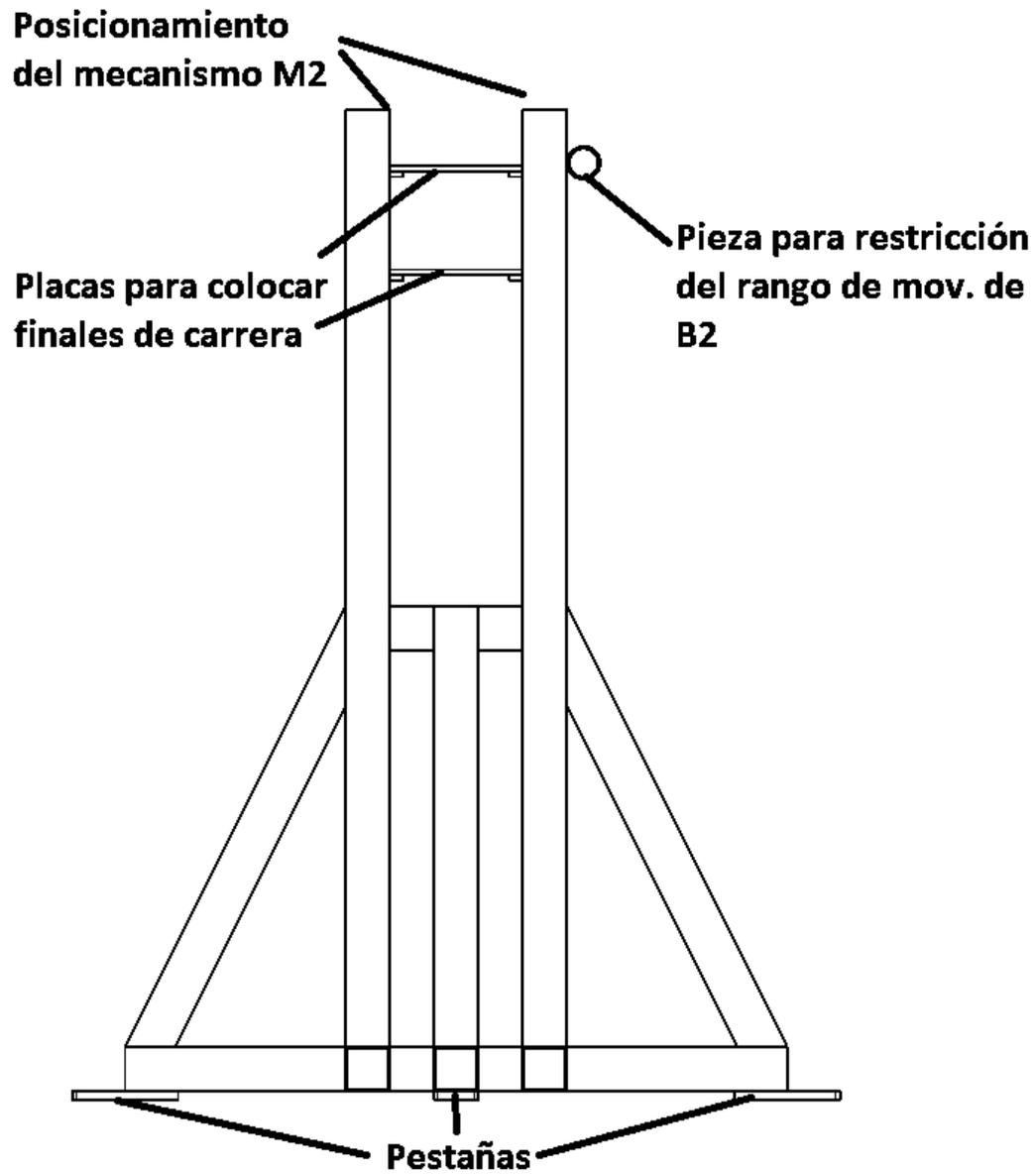


Figura 4.34 Vista frontal del Pedestal.

4.16 ENSAMBLE TOTAL DEL EQUIPO.

Debido a su arquitectura, el esparcímetro está dividido en dos grandes ensambles. El primero es ha sido denominado *Conjunto lateral*, y el segundo, *Conjunto central*. En la Figura 4.35 se muestra el *Conjunto lateral*, que se encarga del posicionamiento (polar) del sensor, está formado por el *Pedestal*, el *Mecanismo de alineación M_2* , el *Brazo B_2* , el Mecanismo de alineación M_6 , el ensamble de sujeción de los sensores de referencia del brazo B_2 $SSRB_2$, un servomotor, reductor de velocidad, contrapeso, sensores de referencia, finales de carrera (interruptores) y componentes ópticos del sensor.

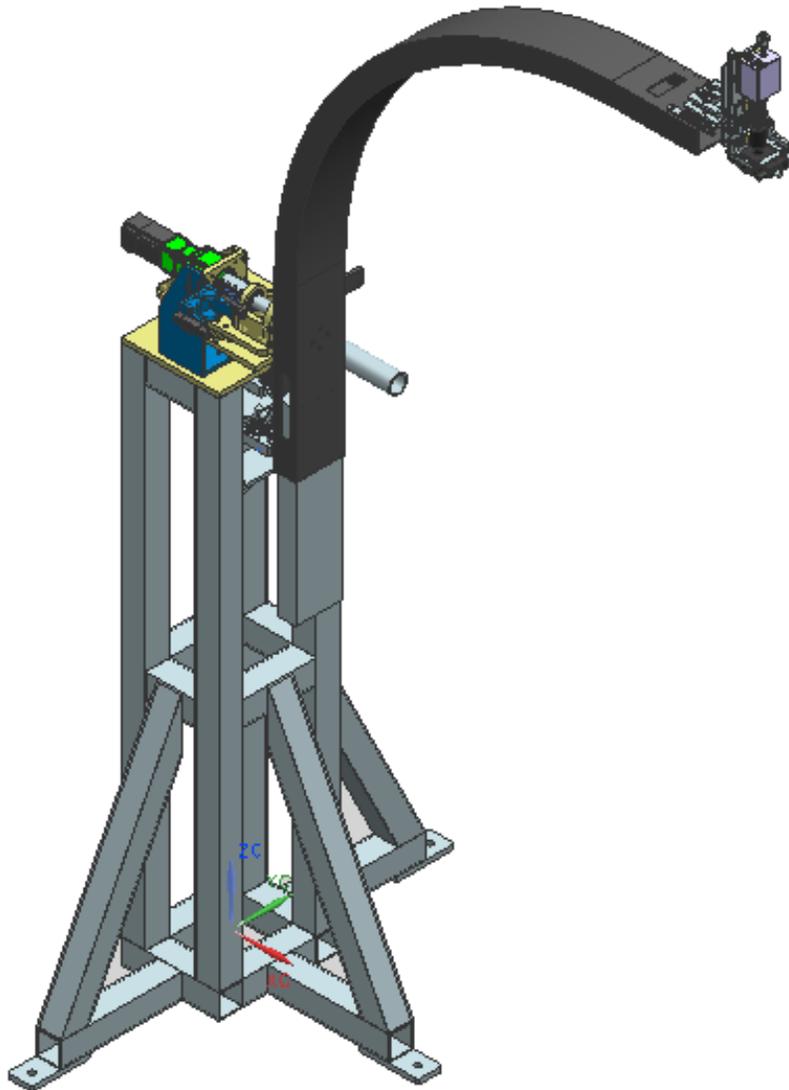


Figura 4.35 Ensamble del conjunto lateral del esparcímetro

En la Figura 4.36 se muestra el ensamble del *Conjunto Central* del esparcómetro, responsable de la emisión del láser y del posicionamiento azimutal del sensor con respecto de la muestra. Este conjunto está formado por: Los mecanismos de alineación M1, M3, M4, M5 y M7, el ensamble para la sujeción de los sensores de referencia del brazo B1 y G ($SSRB_2$, $SSRBG$), los brazos B1 y G, tres servomotores (uno de ellos es del tipo *Direct Drive* empleado para el brazo G), sensores de referencia y finales de carrera en los brazos B_2 y G, y componentes ópticos del láser.

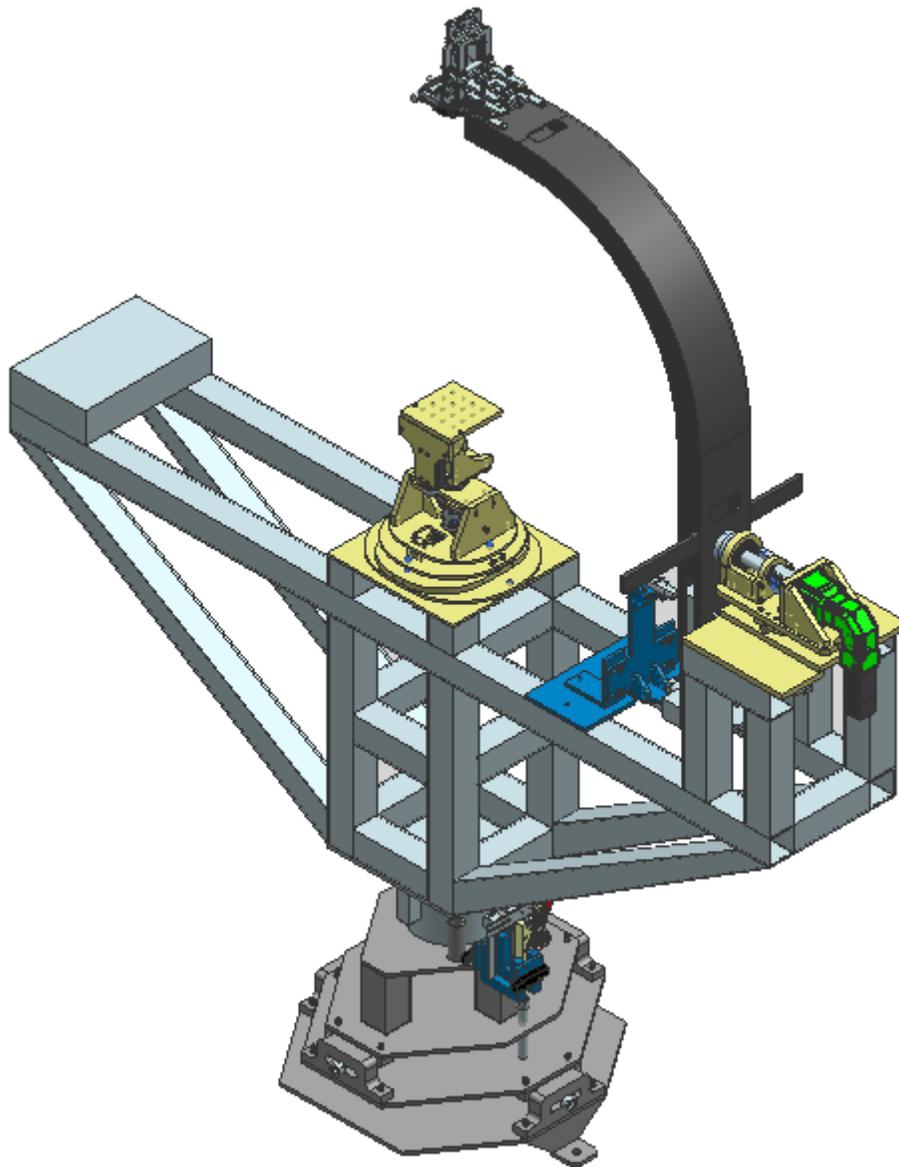


Figura 4.36 Ensamble del conjunto central del esparcómetro.

Finalmente puede apreciarse en la Figura 4.37 el ensamble completo del esparcímetero*

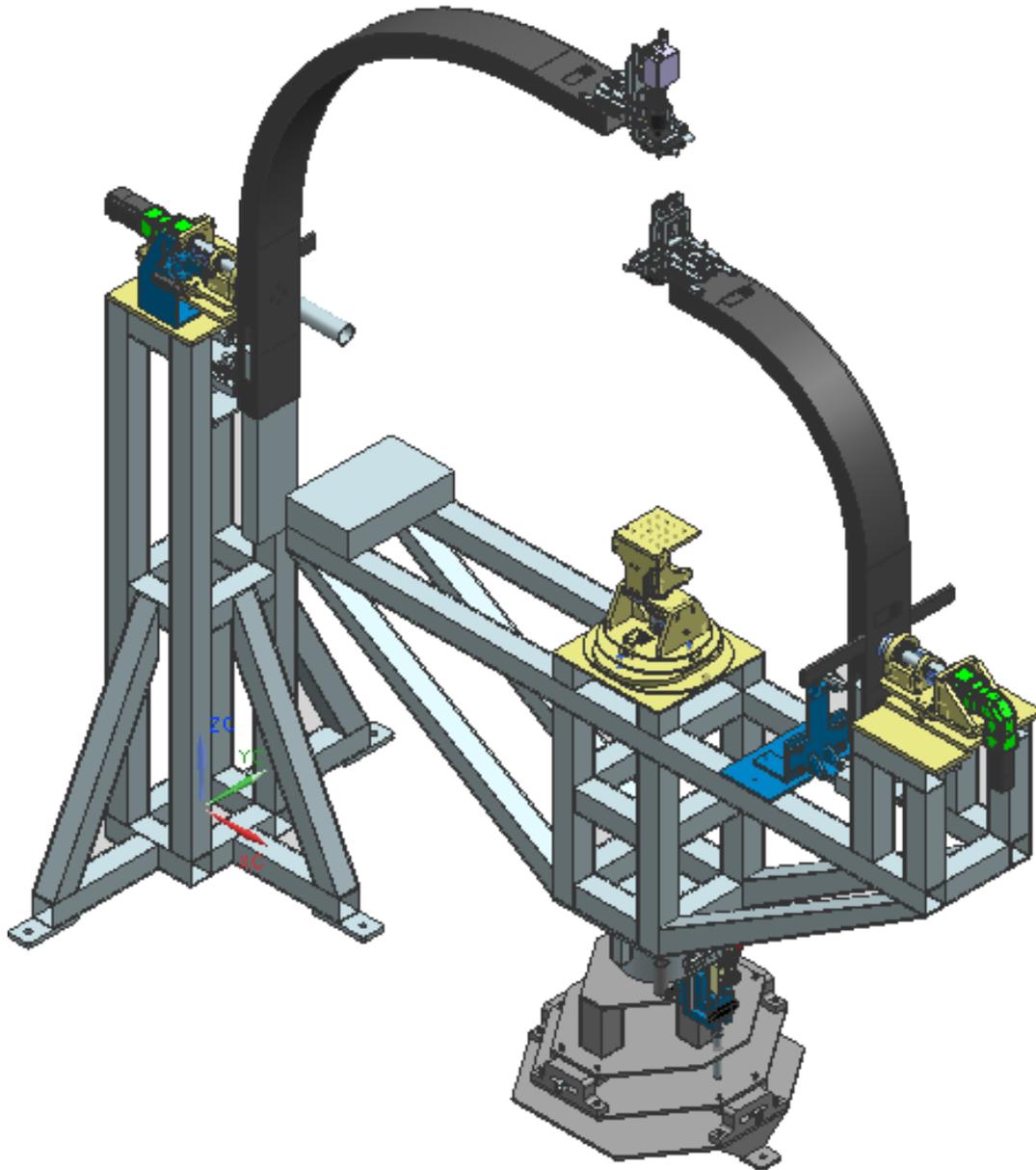


Figura 4.37 Ensamble total del esparcímetero.

*Sin incluir la computadora, el direccionamiento de los cables y el gabinete de control.

4.17 MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA.

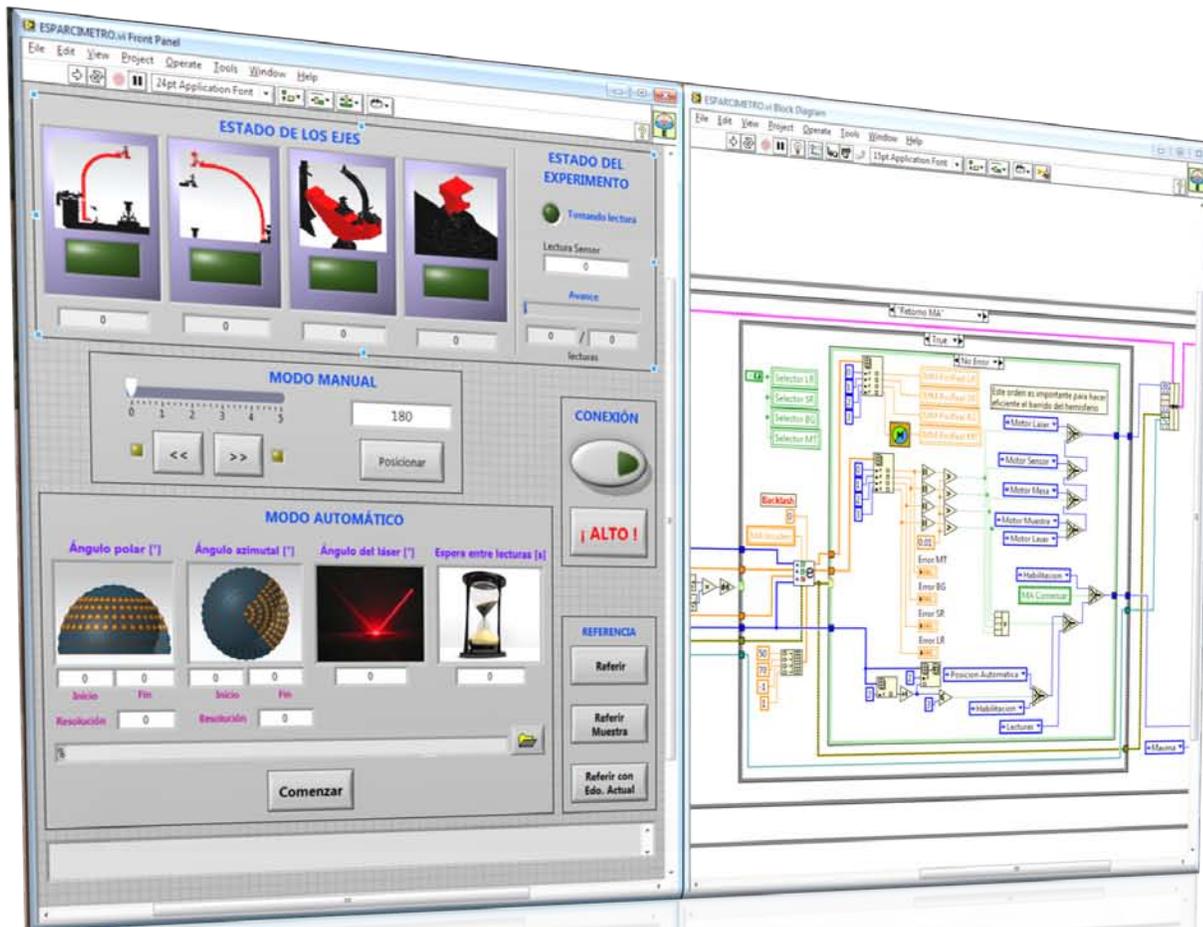
Se determinó el uso de diversos materiales para la construcción del esparcómetro, entre los cuales se encuentran principalmente el aluminio, acero inoxidable y acrílico. Estos materiales fueron seleccionados para cada pieza considerando su función, posición, ensamble con otras piezas, proceso de manufactura a emplearse para su construcción, disponibilidad de material en el mercado, etc.

Los procesos de manufactura que se consideraron para la construcción del equipo son aquellos que se emplean en el taller del CCADET. Los cuales comprenden principalmente: corte por chorro de agua, soldadura, maquinado en CNC, torneado y fresado.

En este capítulo se muestra de forma general el diseño final del equipo y se presentan sus principales componentes. Se ha omitido incluir planos de fabricación y el detalle de la manufactura de cada una de las piezas en este capítulo, dicha información están contenida en el reporte técnico del proyecto del CCADET.

Capítulo 5
Automatización del equipo

111



Programa realizado en LabView®

En el lado izquierdo se observan los controles de la interfaz de usuario, en el lado derecho la programación.

CAPÍTULO 5 AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO

Se describe la forma cómo se comunican los sensores, los *Servopacks* y la computadora del esparcímetro. Se presentan y explican las partes que componen la interfaz de usuario en el programa. Se describe la estructura del programa. Finalmente se explica la secuencia de movimientos y la corrección de errores de *backlash* en el equipo.

5.1 COMUNICACIÓN ENTRE SENSORES, *SERVOPACKS* Y COMPUTADORA.

El esparcímetro cuenta con varios sensores fotoeléctricos e interruptores que se comunican por medio de cables, los cuales son dirigidos a través de canaletas que los mantendrán en posición y los resguardarán de daños como podrían ser pisadas y acumulación excesiva de polvo. Las terminales de los cables se conectan a una tarjeta de circuito impreso a través de la cual se comunican los tres conectores de los *ServoPacks* de los brazos B_1 , B_2 y G, y a una fuente de 12 [V] que está colocada en el gabinete de control.

Cada uno de los conectores de los *ServoPacks* cuenta con 25 terminales, con base en la información obtenida de las *datasheets* de los *ServoPacks* resultan de utilidad para el diseño las terminales correspondientes al POT, NOT y EXT1.

P-OT – Positive Over Travel es la función del ServoPack que desactiva el movimiento de los servomotores en caso de activarse (o desactivarse) la conexión con su correspondiente terminal mientras el servomotor gira en sentido antihorario.

N-OT – Negative Over Travel es la función que desactiva el movimiento de los servomotores en caso de activarse (o desactivarse) la conexión con su correspondiente terminal mientras el servomotor gira en sentido horario.

Se emplean los finales de carrera (interruptores) para el uso de las funciones de POT y NOT.

EXT-1 – Es una de varias entradas digitales (o analógicas dependiendo cómo sea configurada) del ServoPack a la cual se conectarán los sensores fotoeléctricos, esta entrada es leída en el programa del esparcímetero realizado en LabView®.

Los ServoPacks reciben la información de los sensores y los finales de carrera por medio de los conectores. Los ServoPacks a su vez, se comunican con la computadora a través de la tarjeta PCI (JAPMC-NT110). La configuración de los ServoPacks se realiza en la computadora por medio de un Software proporcionado por la compañía fabricante.

5.2 INTERFAZ DE USUARIO

En la Figura 5.1 se muestra la interfaz con la que el usuario operará el esparcímetero. La interfaz está formada por cinco bloques de control:

1. Estado de los ejes y Estado del experimento
2. Modo manual
3. Conexión
4. Referencia
5. Modo automático

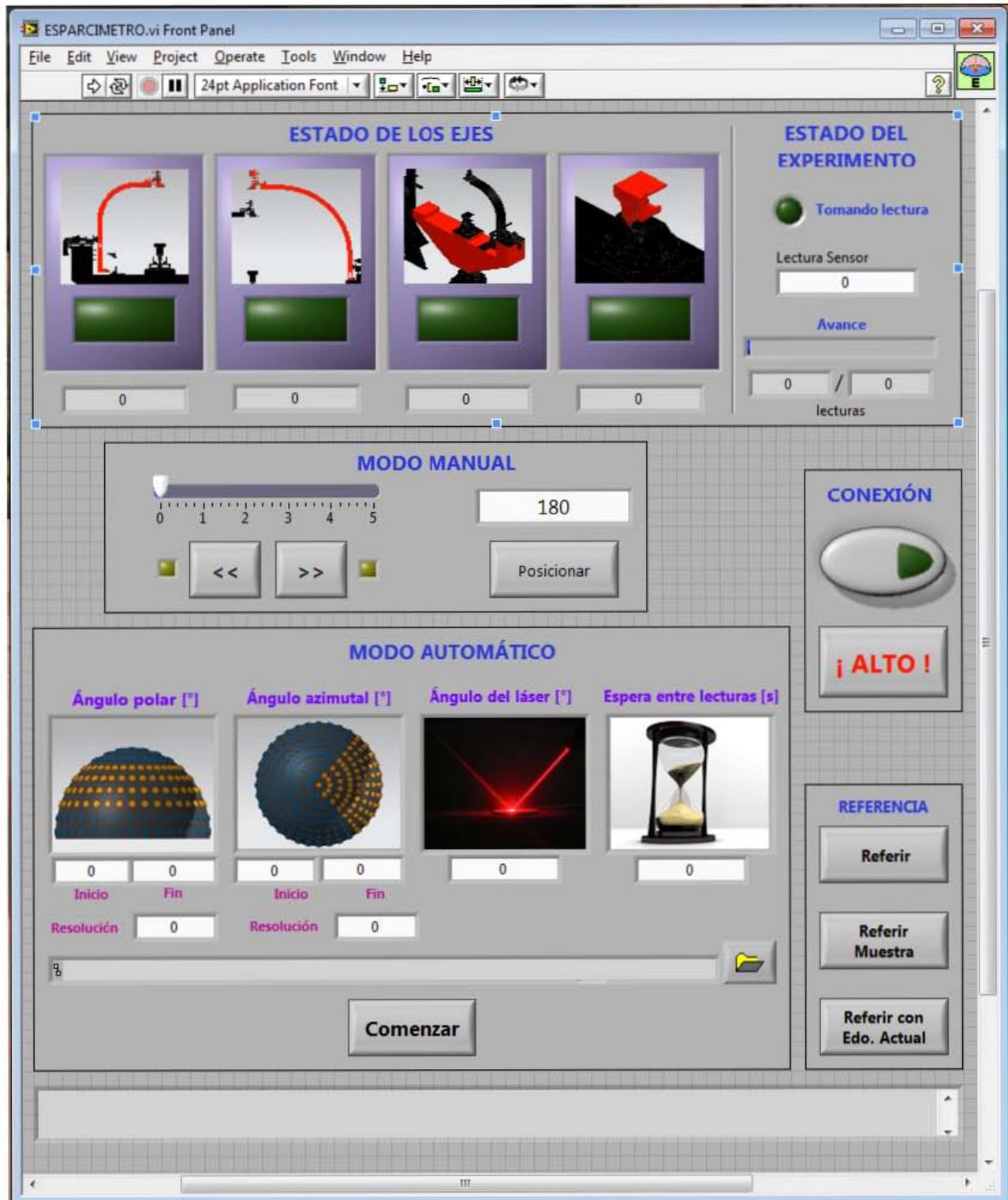


Figura 5.1 Interfaz de usuario.

En los bloques de *Conexión y referencia* el usuario puede establecer la comunicación entre el programa y los ServoPacks, puede mandar la orden para buscar la referencia, establecer la posición inicial de la muestra, o tomar la posición actual como referencia (esta opción es útil para realizar la calibración y la caracterización del equipo) y puede detener el programa en caso de alguna falla.

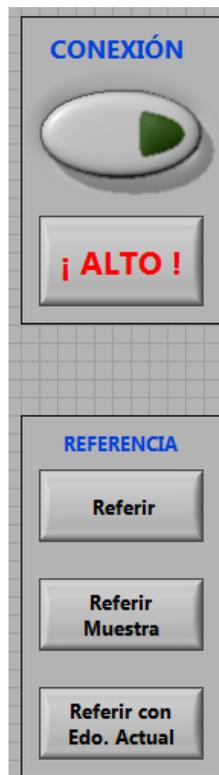


Figura 5.2 Bloque de *Conexión y referencia*.

El bloque de *Modo automático* contiene los indicadores y los controles para la ejecución automática del posicionamiento y la toma de lecturas del sensor.

El usuario proporciona los datos de: ángulo de incidencia del láser, rango del barrido del sensor, el paso para cada posición angular del sensor (resolución), el tiempo de espera para la toma de lecturas y la ubicación dónde desea que se almacene la información en la computadora.



Figura 5.3 Bloque de *Modo automático*.

A su vez, el usuario recibe la información de: Posición de los ejes que componen al esparcímetro, número y el avance en las lecturas, y el estado de la lectura. Por medio del botón Comenzar, el usuario indica al programa la realización del experimento.

117

En la parte inferior de la interfaz se incluye una sección de información con la cual se orienta al usuario sobre el uso del programa y las acciones que este realiza cuando interactúa con algún control.

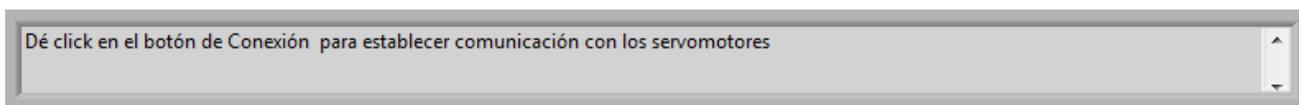


Figura 5.4 Sección de información.

En el *Modo Manual* el usuario puede mover cada uno de los brazos del esparcímetro de forma individual (previa selección en el bloque de Estado de los ejes). Puede mover los actuadores tanto por velocidad como por posición, puede elegir el sentido de giro y variar la velocidad con la que se mueven.

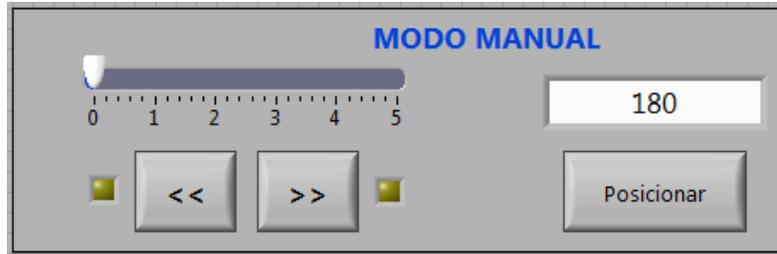


Figura 5.5 Bloque de *Modo Manual*.

En el *Estado de los Ejes* el usuario puede seleccionar el eje del esparcímetro que desea mover en el modo manual, se le brinda la información de la posición absoluta de todos los ejes. Púee controlar el encendido y el apagado de cada servomotor de manera independiente. Esta parte de la interfaz además brinda información al usuario de las ejecuciones que realiza el programa cuando se utiliza en modo automático

Por último en el *Estado del Experimento* se informa al usuario sobre el avance del programa en la ejecución en modo automático, informa el número de lecturas a tomar, si el sensor está tomando lectura y el último valor que leyó.

118



Figura 5.6 Bloques del *Estado de los ejes* y *Estado del experimento*.

5.3 ESTRUCTURA PROGRAMA DEL ESPARCÍMETRO.

El programa del esparcímetero está basado en una máquina de estados. En la Figura 5.7 se muestra una simplificación de dicho diagrama. Se han omitido los valores de entradas y salidas por la enorme cantidad de datos de los controles en la interfaz de usuario.



119

Figura 5.7 Diagrama de estados (simplificado) del programa.

En general el programa una vez que inicia, espera la instrucción del usuario para establecer la conexión con los *ServoPacks* en el estado de *Inactivo*. Una vez que el usuario ha pedido al programa realizar la conexión, pasa al estado *Conexión*. Si la conexión resulta exitosa, pasa al estado de *Retorno*, en caso de falla, regresará al estado *Inactivo* dónde sólo espera la instrucción del usuario para finalizar. En este caso el usuario tendrá que atender el aviso que el programa le indique.

Una vez en el estado de *Retorno*, en función de las acciones del usuario en los controles, el programa puede pasar al estado: *Mover por velocidad*, *Mover por posición*, *Referencia*, *Automático* o *Desconexión*. Estos estados corresponden a las acciones para que el esparcímetro sea operado de forma manual, automática y a la búsqueda de la referencia (de forma automática también).

En las Figuras 5.8 y 5.9 se muestran algunas de las pantallas del programa de LabView®.

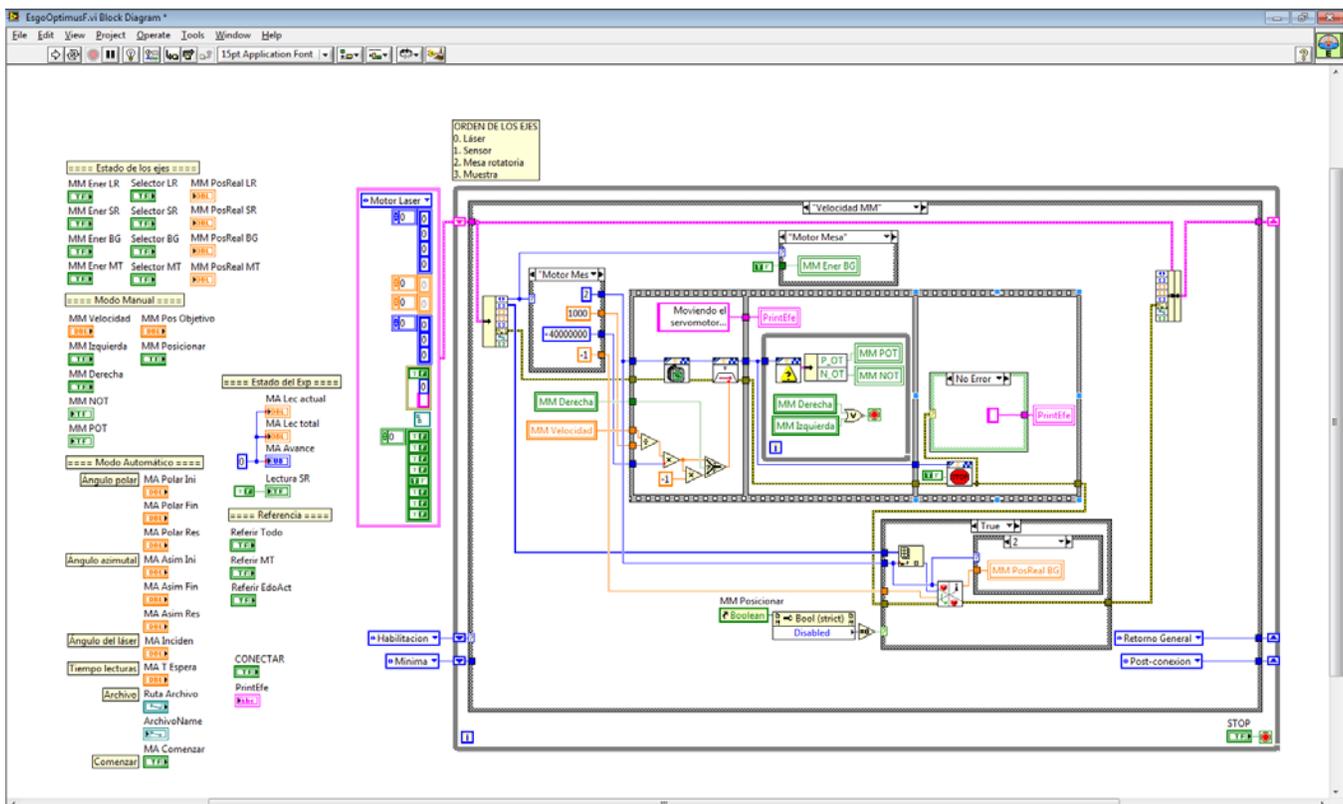


Figura 5.8 Pantalla del código del programa.

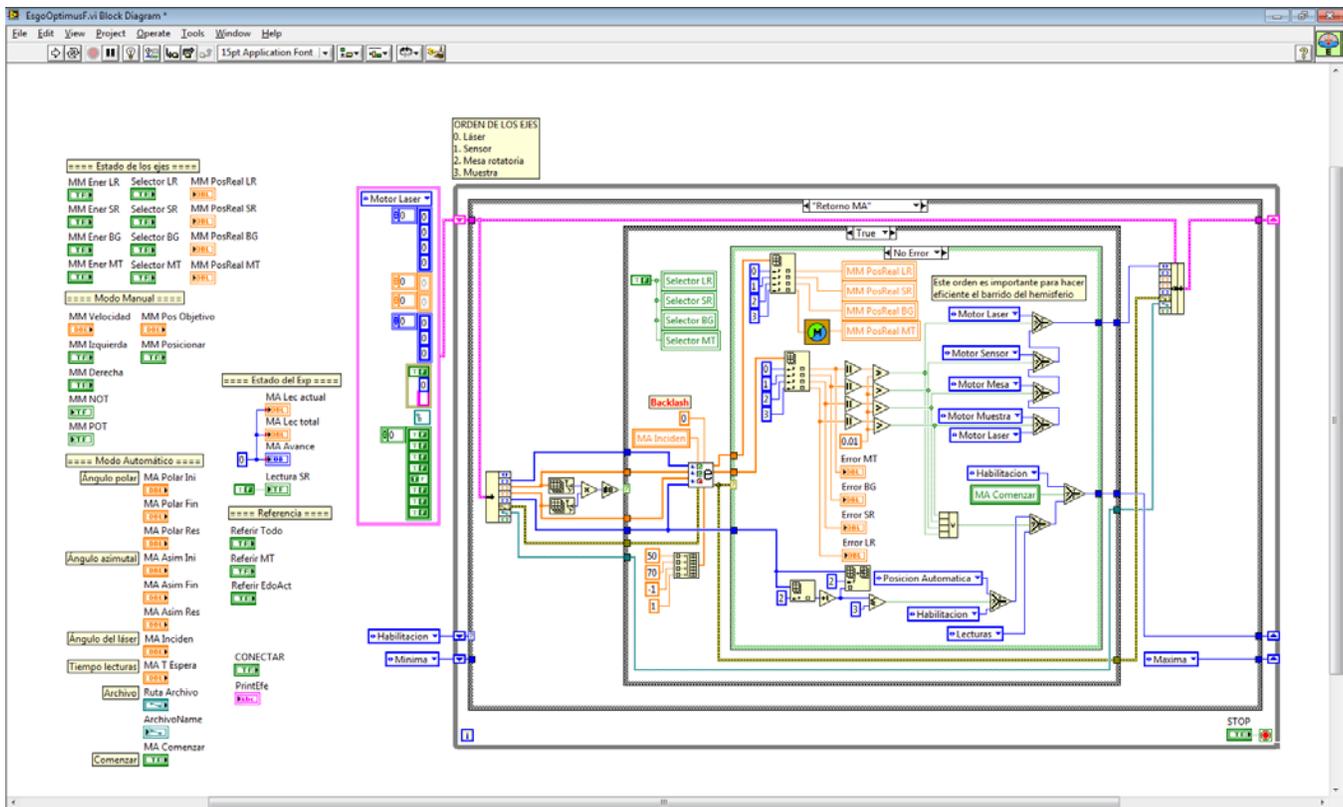


Figura 5.9 Pantalla del código del programa.

121

5.4 CONSIDERACIONES EN EL PROGRAMA.

5.4.1 Programa a prueba de errores.

Los controles en LabView[®] tienen opciones de configuración para limitar el ingreso de datos en los cuadros de texto, es decir, en los controles. Con estas opciones, se logra que en el programa del esparcímetro sólo se acepten datos válidos en la realidad para los rangos de movimiento.

Con el uso de las señales de entrada de los finales de carrera (P-OT y N-OT del *ServoPack*) en el programa, se incluyen indicadores en el Modo Manual, para que el usuario sea informado cuando ha llegado al límite permitido para posicionar algún brazo del esparcímetro. Los datos de final de carrera también son considerados en la búsqueda de la referencia y en el Modo automático para que, en caso de presentarse un exceso en la carrera de un brazo, el programa detenga la operación del equipo e informe al usuario sobre lo que ocurrió.

5.4.2 Secuencia de movimientos en Modo Automático.

Con la finalidad de minimizar el tiempo que le toma al equipo el posicionamiento del sensor, se estableció que el orden en el barrido del área para el posicionamiento del sensor fuera, primero posicionar el brazo G, manteniendo fija esta posición, se realizara el barrido del sensor con el brazo B₂.

Las lecturas del sensor con el brazo B₂ se realizan en un sólo sentido (antihorario), una vez que el brazo B₂ termina el recorrido regresa a la posición angular cero, la cual sobrepasa en al menos el valor que se tiene de juego en la salida de la flecha del reductor (*backlash*). De esta forma se evita la presencia del error en el posicionamiento debido al *backlash*.

El brazo G se mueve a la posición siguiente una vez que el brazo B₂ ha concluido el barrido, esto se debe a que el tiempo de posicionamiento del servomotor *Direct Drive* es más tardado. A diferencia del brazo B₂, en el brazo G no se presenta *backlash* debido al acoplamiento directo con el servomotor.

5.4.3 Corrección del error de *backlash* en el brazo B₁.

Como se mencionó en el *Capítulo 3* de este trabajo, la *zona de interferencia* del sensor se eliminó mediante la incorporación de un movimiento de rotación en la muestra y un cambio en la posición del láser. Debido a este último movimiento, se debe considerar la corrección del *backlash* en el brazo B₁. Para ello, se deben de realizar mediciones en la salida de la flecha del reductor de velocidad, una vez conocido el valor del *backlash*, este valor se integra al código del programa del esparcímetero, con este valor se corrige mediante *software* la posición real del láser. En la Figura 5.10 se muestra el lugar del programa donde se consideró incluir este valor.

Resultados 125



Equipo manufacturado durante el proceso de ensamble.

RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos con el diseño del equipo. Se describen los resultados en la manufactura, el ensamblaje parcial, con los elementos ópticos y de todo el equipo. Se muestran las pruebas del desempeño de los mecanismos de alineación del equipo. Se describe la instalación del cableado y los sensores, se verifica el cumplimiento del rango de movimiento de los ejes de movimiento del esparcímetro.

127

6.1 MANUFACTURA DEL EQUIPO

Como se estableció en los requerimientos para el diseño de este equipo, la mayoría de las piezas del esparcímetro fueron manufacturadas al interior del taller del CCADET, estuvieron implicados diversos procesos de manufactura, tal y como se estableció en el diseño de detalle, siendo los principales: corte por chorro de agua, maquinado en CNC, soldadura, torneado y fresado.

Algunos ejemplos de las piezas manufacturadas se muestran en la figura 6.1- 6.4



Figura 6.1 Manufactura de uno de los brazos del esparcómetro empleando corte por chorro de agua.



Figura 6.2 Brazo B_1 del esparcómetro obtenido después de un proceso de soldadura.



Figura 6.3 Trabajadores del CCADET realizando la soldadura del brazo G.

129



Figura 6.4 Diversas piezas del esparcímetero obtenidas por medio de CNC.

6.2 ENSAMBLAJE

Se realizó el ensamblaje cada uno de los mecanismos diseñados, así como también el ensamblaje de todos ellos para formar el dispositivo mecánico completo. Las figuras 6.5 y 6.7 muestran parte del proceso y la forma final del equipo tras realizar estas pruebas de ensamblaje.

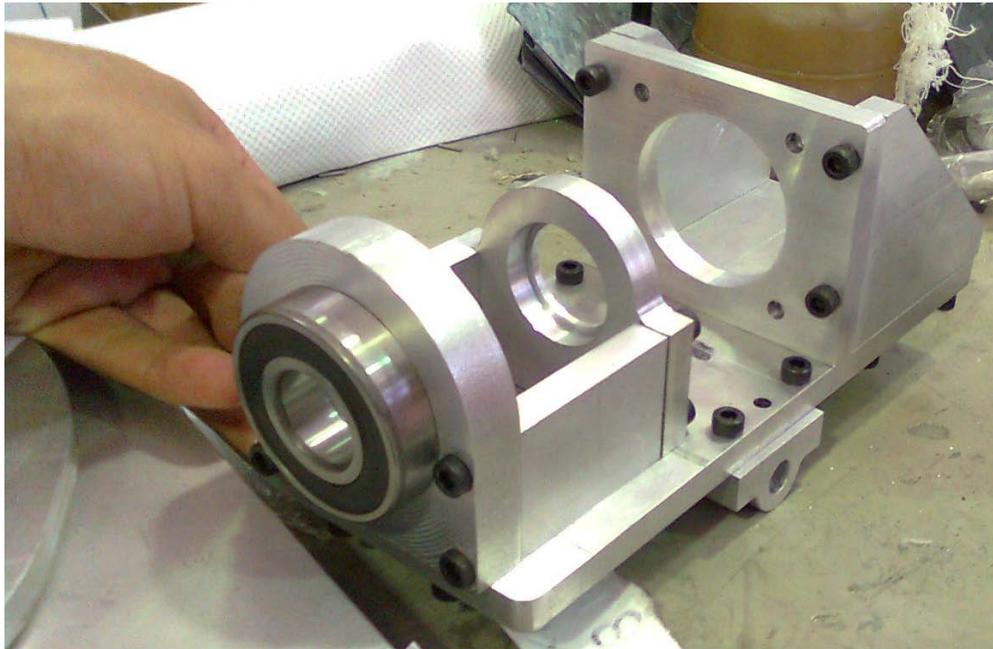


Figura 6.5 Proceso de ensamblaje del mecanismo de alineación M_1

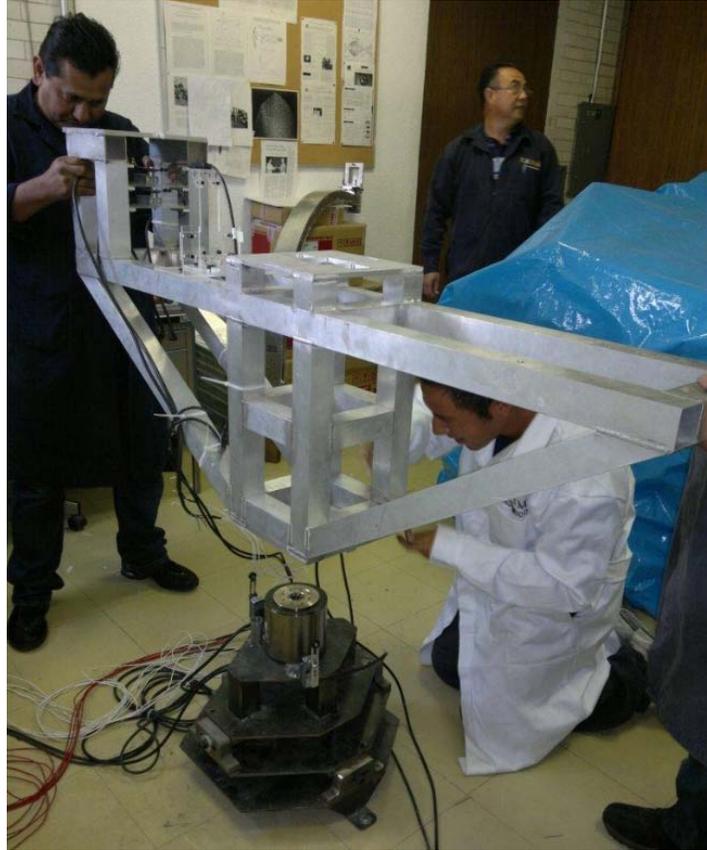


Figura 6.6 Proceso de ensamblaje del brazo G al mecanismo de alineación M_3 .



Figura 6.7 Finalización de la prueba del ensamblaje del equipo.

Como resultado de estas pruebas de ensamblaje, se consiguió comprobar la compatibilidad de las dimensiones de las piezas que se unen o interactúan, así como su funcionalidad al realizar pruebas manuales sobre los ejes de movimiento del esparcímetero para identificar posibles obstrucciones o dificultades del movimiento. Con excepción de algunas piezas, prácticamente todas las piezas presentaron facilidad en su ensamblaje. Las piezas que no pudieron ensamblarse tuvieron que ser modificadas en el taller del centro para permitir su incorporación en el equipo. Posterior a esto, se realizó la modificación en los planos para tener la actualización en el diseño.

6.3 ENSAMBLE DE COMPONENTES ÓPTICOS

Como parte de las pruebas de ensamblaje, se verificó por separado el conjunto de componentes ópticos montados en la placa para la sujeción tanto del conjunto óptico láser, así como del conjunto óptico del sensor. Esto se realizó de esta forma, debido a que en el momento de realizarlas se carecía de cables de comunicación lo suficientemente largos para los dispositivos ópticos. En la figura 6.8 – 6.9 se muestran dichos ensamblajes.



Figura 6.8 Ensamblaje del mecanismo de alineación M5 y los componentes ópticos del láser.

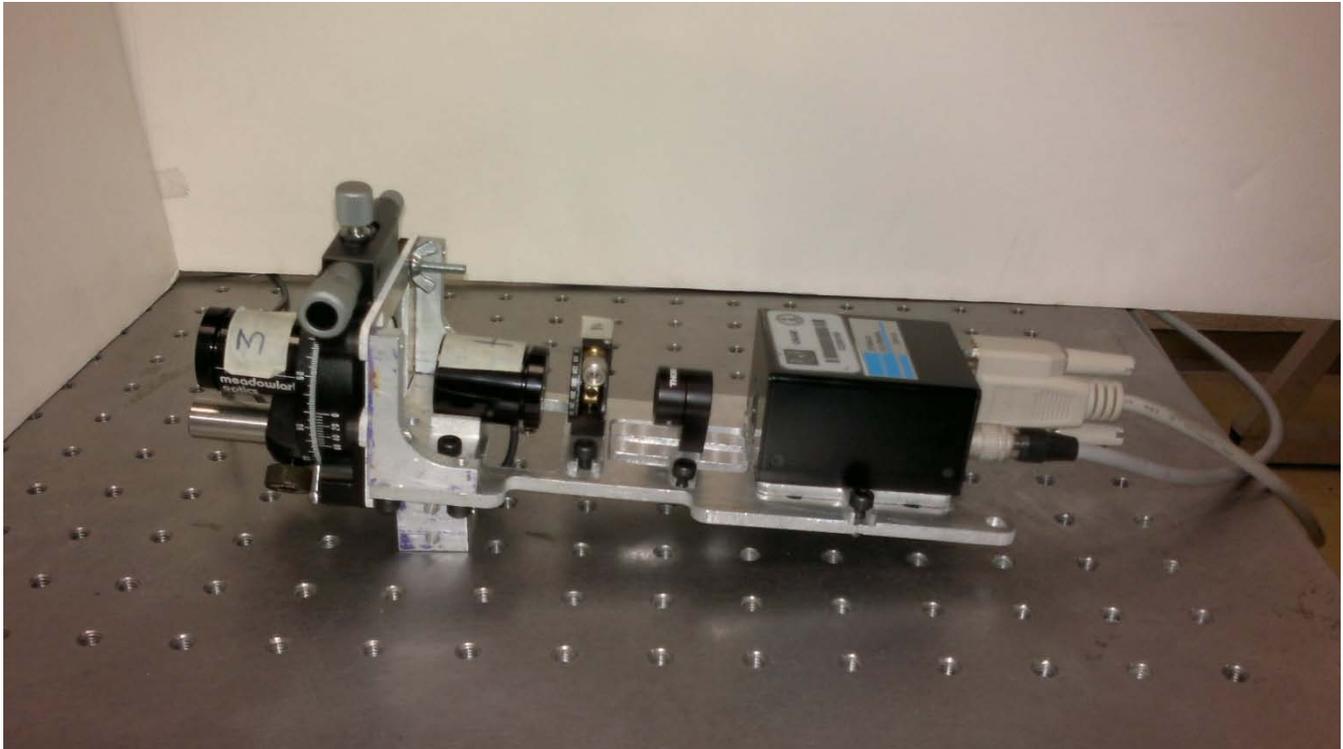


Figura 6.9 Ensamblaje del mecanismo de alineación M6 y los componentes ópticos del sensor.

134

Con estas pruebas de ensamblaje se pudieron identificar algunas fallas en la alineación de las piezas, lo cual se puede fácilmente apreciar por la deformación en la emisión del rayo láser y por la excentricidad de los componentes ópticos del sensor. Esto se ilustra en las figuras 6.10 y 6.11.

Estas desalineaciones se presentan por dos motivos:

1. La altura de las placas niveladoras exceden las dimensiones necesarias para colocar el centro de las circunferencias de los elementos ópticos a la misma altura.
2. Las piezas niveladoras no están ajustadas en el eje transversal al eje óptico del sensor.

Para solucionar el primero de los motivos es necesario realizar un ajuste de las piezas en el taller de manufactura. Para el segundo de ellos se requiere realizar el ajuste manualmente de las piezas, para ello se requiere de un proceso iterativo que se realiza de forma manual y el cual se hace por medio del desplazamiento de las placas niveladoras (el cual se consideró en el diseño).

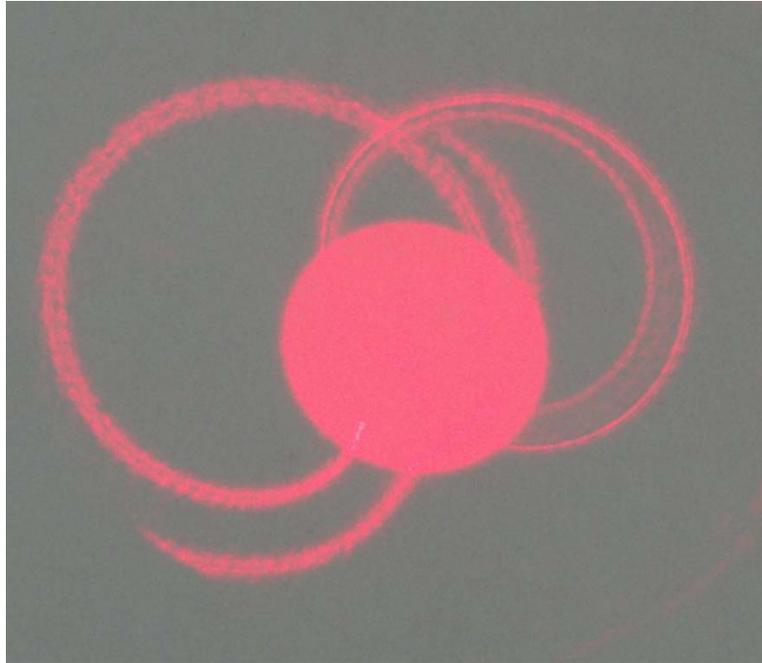


Figura 6.10 Rayo láser emitido a través de los elementos ópticos sujetos en la placa del mecanismo M_1 .

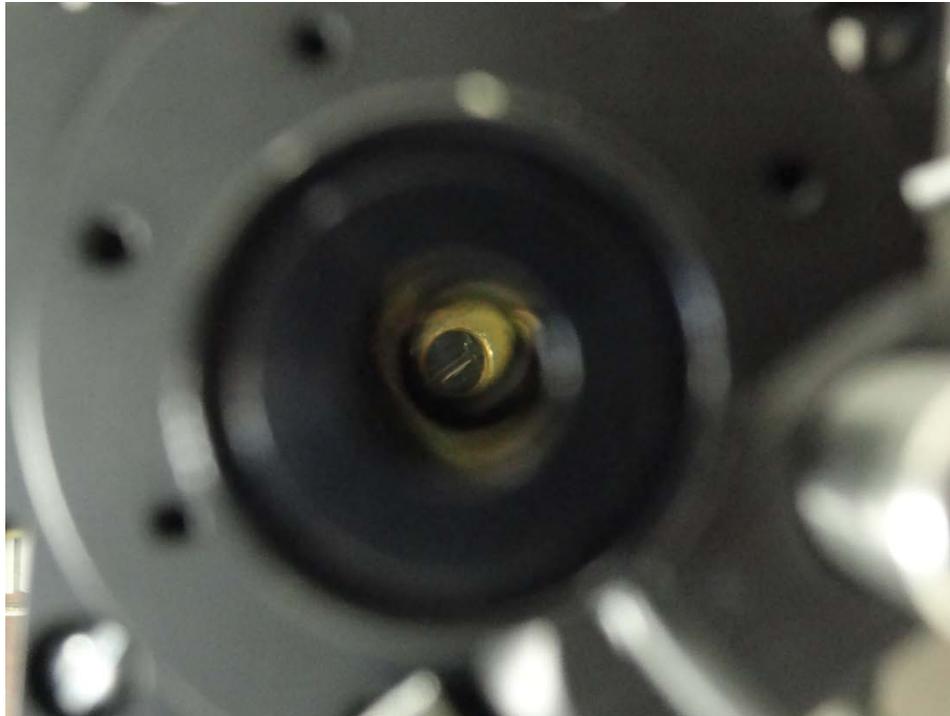


Figura 6.11 Excentricidad presente en la alineación de los elementos ópticos del sensor.

6.4 PRUEBAS DEL DESEMPEÑO DE LOS MECANISMOS DE ALINEACIÓN.

Se realizaron las primeras pruebas para comprobar el funcionamiento de los elementos de alineación del esparcómetro, estas se realizaron con equipo para medir inclinación y excentricidad. En la figura 6.12 – 6.14 se muestra el proceso de alineación de algunos ejes del esparcómetro.



Figura 6.12 Alineación del eje de giro del servomotor del brazo G. En la parte superior del servomotor se muestra el equipo de metrología midiendo una inclinación cero.



Figura 6.13 Alineación del eje de giro del mecanismo de sujeción de la muestra.

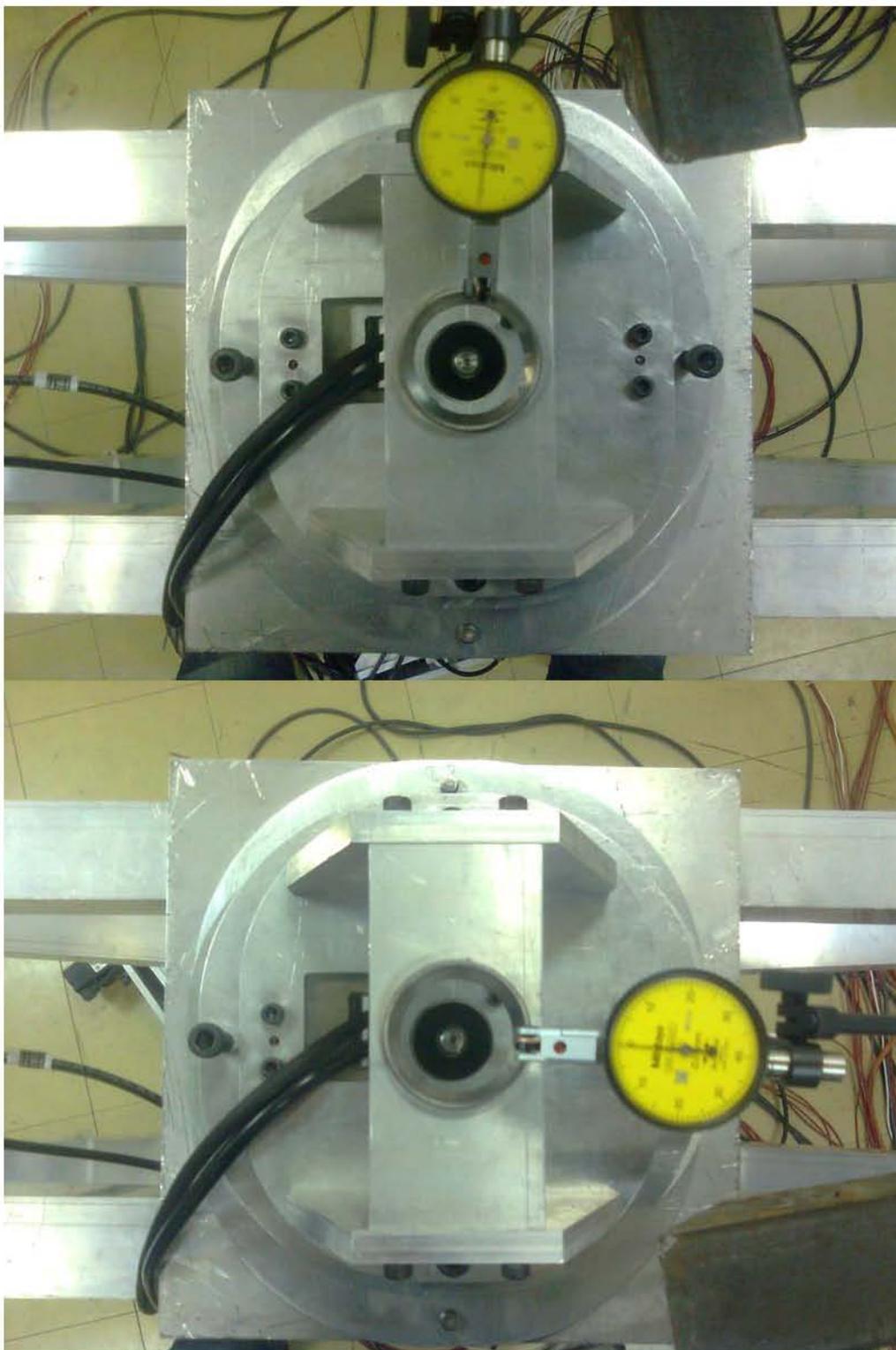


Figura 6.14 Alineación del mecanismo de giro de la muestra con el eje de giro del brazo G.

Con los resultados obtenidos de las lecturas de los dispositivos de metrología se comprobó el correcto funcionamiento de los mecanismos de alineación que se diseñaron, alcanzándose los valores deseados de cero.

6.5 INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y DE SENSADO.

Se realizó la instalación de un gabinete que contiene los elementos de control y alimentación de los servomotores y los sensores fotoeléctricos así como los interruptores para los finales de carrera del equipo. También se realizó el direccionamiento de los cables de los servomotores utilizados por medio de canaletas. En las figuras 6.15 y 6.16 se muestra la instalación realizada.

El direccionamiento de los cables fue uno de los problemas a resolver que no fueron considerados desde un inicio en el diseño del equipo. Como resultado de la instalación del equipo se contempló la incorporación de elementos de sujeción y de contención de los cables, como en el caso de los cables provenientes del brazo G, los cuales fueron contenidos dentro de un tubo flexible de acero (Figura 6.16).

Por otra parte, se comprobó el correcto funcionamiento de los interruptores como finales de carrera y de los sensores fotoeléctricos para establecer la posición de inicio por medio del programa realizado en LabVIEW® en dónde se pusieron a prueba todos los sensores.

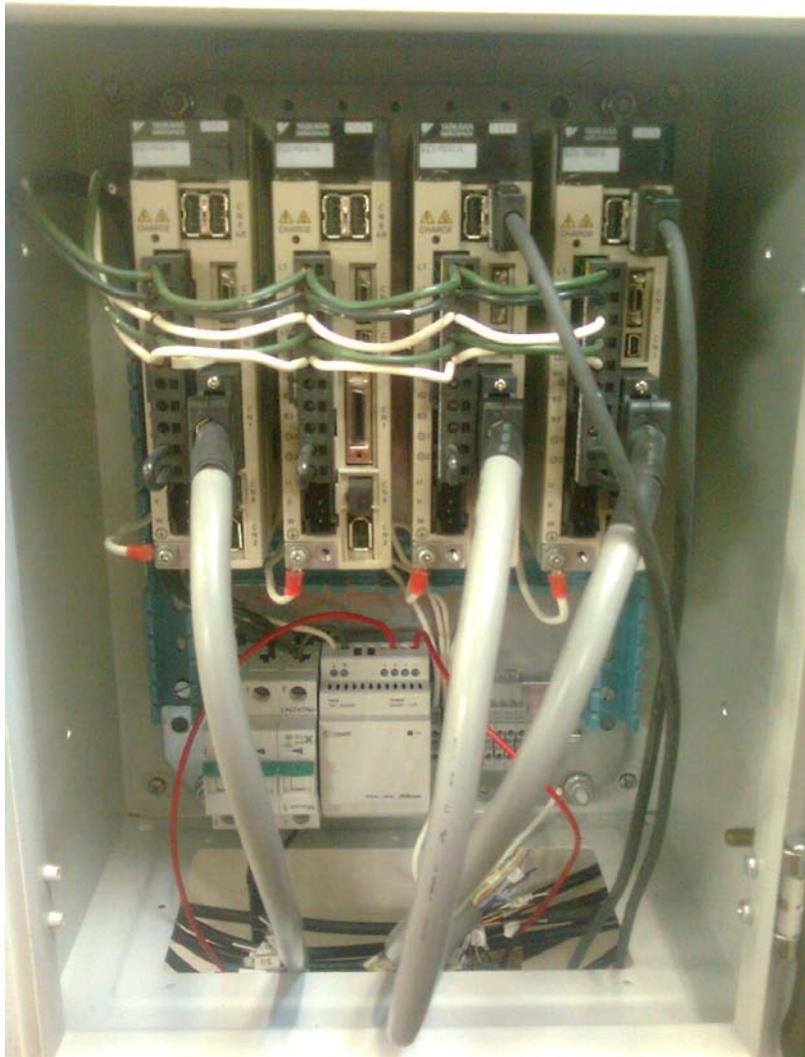


Figura 6.15 Gabinete que contiene los Servopacks.

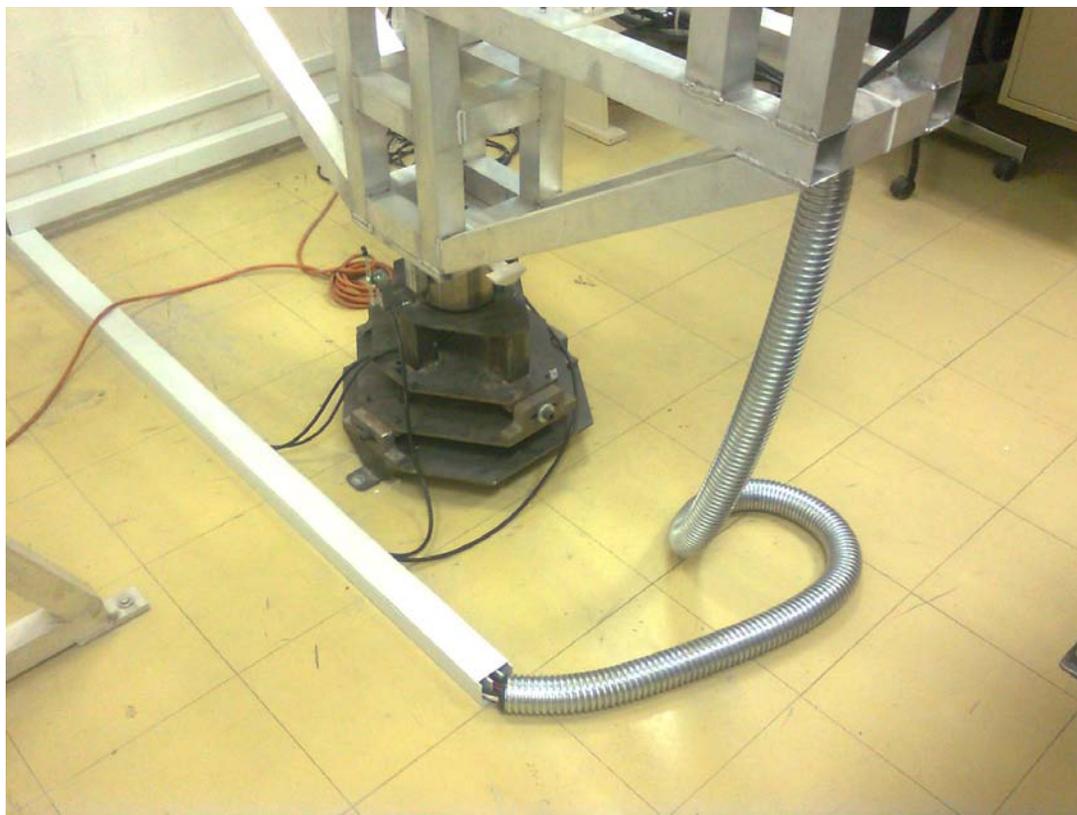


Figura 6.16 Direccionamiento de los cables de los servomotores y los sensores por medio de canaletas.

6.6 PRUEBAS DE MOVIMIENTO.

Con la utilización del programa hecho en LabVIEW® se realizaron pruebas de funcionamiento del recorrido de los ejes de movimiento del esparcómetro, con ello se pudo verificar que dichos los brazos abarcaran el rango de movimiento necesario para cumplir con los requerimientos del equipo. En estas pruebas, todos los brazos exceden los rangos necesarios para cumplir con la función del equipo.

CONCLUSIONES

El objetivo que sustenta este trabajo se definió como *"Desarrollar el prototipo de un instrumento capaz de medir de manera automática el esparcimiento de la luz en superficies rugosas bidimensionales, con el fin de facilitar la obtención de gran cantidad de datos, respondiendo así a las necesidades de los experimentos llevados a cabo por el grupo de sistemas ópticos del CCADET de la UNAM"*

143

El diseño presentado cumple con este objetivo porque:

- *Es un instrumento capaz de medir de manera automática.* Esto se consiguió por medio del dispositivo mecánico con movimiento por medio de servomotores y controlado por una computadora mediante un programa que ejecuta las instrucciones para realizarlo de manera automática.
- *Mide el esparcimiento de la luz en superficies rugosas bidimensionales.* La configuración que fue desarrollada en este trabajo permite la incidencia de un rayo láser en un arco de 0° a 180° con respecto al plano horizontal de la muestra, y el posicionamiento de un sensor en el hemisferio superior de la muestra. Estos movimientos permiten el estudio del esparcimiento de la luz en superficies rugosas de manera bidimensional, es decir, las

lecturas tomadas con el sensor estarán en función de dos variables angulares, que son las que definen la posición del sensor en el hemisferio superior al plano de la muestra.

- *Facilita la obtención de gran cantidad de datos.* Esto se logra por medio del programa que ejecuta el posicionamiento automático de los elementos ópticos en los puntos que se generan con base en la información que introduce el usuario en la interfaz de la computadora. Estos datos se almacenan de manera ordenada en un archivo del tipo "Hoja de cálculo" con lo cual están a disposición para su futuro uso en estudios y análisis de óptica.
- *Responde a las necesidades de los experimentos llevados a cabo por el grupo de sistemas ópticos del CCADET de la UNAM.* El diseño presentado fue diseñado con base en la infraestructura del laboratorio donde se instaló el equipo, contempló mecanismos diseñados para incorporar los elementos ópticos con los que trabaja el grupo de sistemas ópticos del CCADET.

El equipo que se presentó en este trabajo satisface las necesidades expresadas por el Dr. Bruce y que llevaron al establecimiento de especificaciones. La forma en que estas fueron satisfechas se describe a continuación:

Las especificaciones No. 1 y 2 de la resolución angular del láser y el sensor fueron satisfechas por medio del uso de servomotores con alta resolución angular, además de que esta resolución angular se incrementa con el uso de reductores de velocidad entre el motor y la flecha de los brazos que posicionan a B_1 y B_2 .

Las especificaciones No. 3, 4 y 5 del rango de posicionamiento del láser y el sensor fueron verificadas al momento del ensamble del equipo y durante las pruebas de movimiento efectuadas con el programa, en ellas se observó que el equipo cumple (y excede) estos rangos, lo cual garantiza se cumple con esta especificaciones (y las necesidades que dio origen a dichas especificaciones).

Las especificaciones No.6 y 7 de la distancia del láser y el sensor al punto de incidencia sobre la muestra se cumplieron en el concepto seleccionado por medio del adecuado diseño de los brazos B_1 , B_2 y G , cuyas dimensiones geométricas garantizan el posicionamiento de estos elementos a la distancia solicitada.

La especificación No. 8 de la capacidad máxima del grosor de la lectura se cumple con el mecanismo de ajuste de la altura de la muestra tal y como se menciona en el capítulo número 3.

La especificación No. 9 del área de obstrucción del sensor se cumple por medio de la combinación de movimientos del servomotor que gira la muestra y el cambio en la posición en el ángulo de incidencia del láser, tal y como se describe en el capítulo número 3.

La especificación No. 10 y 11 del área de operación del equipo y la altura máxima del equipo se satisface con la geometría del equipo, la cual en las posiciones de mayor extensión (cuando los brazos B_1 y B_2 son puestos de forma paralela y perpendicular a la horizontal) están contenidos dentro de los límites determinados en las especificaciones, estos valores se pueden verificar en los planos de ensamble del reporte técnico del CCADET.

Las especificaciones No. 12 y 13 de los tiempos máximos de posicionamiento del láser y el sensor fueron satisfechas por medio del conjunto de los servomotores, los reductores y el programa realizado en LabVIEW® el cual hace uso de perfiles de velocidad en los servomotores y tiempos de espera variables, de acuerdo al desplazamiento angular que tenga que realizarse y los cuales jamás exceden los 60 y los 30 segundos establecidos.

Finalmente la especificación No. 14 sobre la alimentación del equipo se satisface con el uso de servomotores cuyos Servopacks se alimentan de la toma de 220 [Vca] del laboratorio y la computadora empleada para la automatización con la toma de 127 [Vca].

TRABAJO A FUTURO

Para la total puesta en operación del equipo que se presentó en este trabajo es necesario realizar diversas actividades, las más destacadas son:

147

1. Realizar el ajuste de los componentes ópticos y su integración al ensamble total del equipo (para lo cual se debe de conseguir el material eléctrico adecuado, por ejemplo, cables lo suficientemente largos de acuerdo a la geometría del equipo).
2. Realizar la calibración del equipo, para garantizar la completa alineación del equipo y con ello verificar su correcto funcionamiento una vez que se hayan montado los elementos ópticos.
3. Caracterizar el movimiento angular del equipo, esto con la finalidad de conocer la resolución máxima real de cada eje, el error real y con ello contrastar el desempeño real con el que teóricamente se obtendría.
4. Obtener el valor real del *backlash* de los ejes del brazo B1 y B2 e incorporar este valor en las zonas del programa donde se indica.

5. Incorporar el programa de adquisición de datos del sensor, el cual ya ha sido desarrollado por el grupo de sistemas ópticos, al programa de automatización del equipo.
6. Comprobar el desempeño del programa para identificar y corregir posibles errores durante su ejecución.

Como parte de las áreas de oportunidad este diseño se encuentran:

1. Incluir la sujeción de elementos de alimentación de los componentes ópticos del láser y el sensor en el diseño.
2. Realizar una evaluación para considerar el uso de otros diseños de los mecanismos de alineación del equipo, sobre todo en aquellos cuya arquitectura es predominantemente modular, como el caso de los mecanismos de alineación del láser y el sensor.
3. Incluir en el dispositivo y en el programa el encendido de los elementos ópticos del láser y el sensor para un control total por medio de la computadora.
4. Incorporar una nueva tarjeta de conexión de los cables con las señales de los sensores e interruptores dentro del gabinete.

Optimizar el posicionamiento de los brazos, mediante el cambio en los parámetros de control que pueden ser modificados en los Servopacks, sobre todo para el servomotor que posiciona al brazo G.

REFERENCIAS

- [1] Rodríguez O. (2003). *Esparcimiento de luz visible para superficies rugosas bidimensionales*, Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [2] Ramírez-Duverger, A.S., García-Llamas, R, N. (2004). *Diseño y construcción de un esparcímetero de luz*. Universidad de Sonora. México.
- [3] Hewitt, Paul G (1999). *Física Conceptual*. Addison Wesley Logman. México.
- [4] Tipler. *Física para la ciencia y la tecnología*.
- [5] Sears. *Física universitaria*.
- [6] Neil C. *Esparcimiento de la luz en superficies rugosas bidimensionales* (2008). Protocolo de proyecto. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- [7] Hecht. (2010). *Optics*
- [8] Méndez E.R. (2000). *¿Qué tanto sabemos sobre el esparcimiento de la luz por superficies reales?* Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Tercer Simposium de Óptica y Optoelectrónica. México.
- [9]Rodríguez O (2005). *Cálculo y medición de la matriz de Mueller de un espejo elipsoidal*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- [10]Alles M., Dunne J. (2001). *Application of Laser Scattering and Optical Defect Detection Methods to SIMOX-SOI Wafer*.IEEE International SOI Conference. USA.
- [11]Martínez-Celorio R.A., Espinosa-Luna R., Rivera-Vázquez J.O., Castro Sánchez R. (2005). *Metología para el estudio de tejidos biológicos usando matrices de Mueller*. Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica. México.

- [12] Castro R., Martínez R.A., Martí L., Vega J.T. (2008). *Esparcímetro de resolución angular para tejidos biológicos*. Revista Cubana de Física. Cuba.
- [13] López E., García E., Quirós F., (2005). *Limpieza y conservación del aluminio en los espejos de los telescopios del OAN*.
- [14] Babu C., Baldev R. (2003). *Study of engineering surfaces using laser scattering techniques*. Indira Gandhi Centre for Atomic Research, India.
- [15] Chon B. (1999). *Metrological Application of Laser Scattering*. Korea Research Institute of Standards and Science. Korea.
- [16] Wang Haiming (1995). *Desing of a light scatterometer for the measurement of small angle scattering*. Centro de Investigaciones en Óptica. México.
- [17] *Diffuser Calibration Facility*. Goddard Space Flight Center. NASA.
- [18] Ramírez-Duverger A.S. García-Llamas R (2004). *Diseño y construcción de un esparcímetro de luz*. Revista Mexicana de Física. México.
- [19] Shen Y. J. (2003). *A scatterometer for measuring the bidirectional reflectance and transmittance of semiconductor wafers with rough surfaces*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. University of Florida. USA.
- [20] Quintero-Torres R., Navarro M., Ackerman M., Diels J.C. (2004). *Scatterometer using a bidirectional ring laser*. University of New Mexico. USA.
- [21] Centro de Investigaciones en Óptica. *Anuario 2002*. CONACYT. México.
- [22] Bahar E., Kubik R. (2008). *Description of versatile optical polarimetric scatterometer that measures all 16 elements of the Mueller matrix for reflection and transmission*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. USA.
- [23] Rinder T., Rothe H. (2002). *Modeling of an ARS sensor system in spatial and time domain*. Surface Scattering and Diffraction for Advanced Metrology II, Zu Han Gu and A.A. Maradudin, Editors, Proceedings SPIE.

- [24] Mattison P., Dombrowski M., Lorenz J. (1998). *The hand-held directional reflectometer: an angular imaging device to measure BRDF and HDR in real-time*, Part of the SPIE Conference on Scattering and Surfaces Roughness II. Proceedings SPIE.
- [25] Ford J.N., Tang K., Buckius R.O.(1995). *Fourier Transform Infrared System Measurement of Bidirectional Reflectivity of Diffuse and Grooved Surfaces*. Journal of Heat Transfer.
- [26] Juarez J. (2008). *Diseño de configuración de un robot cortador de cuero*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- [27] <http://www.educaplus.org/luz/polarizacion.html>.

