



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA TOMAR MEDICIONES DE LAS PROPIEDADES DE UN MATERIAL TERMOELÉCTRICO DE PELÍCULA DELGADA INTRODUCIENDO PARÁMETROS DE TEMPERATURA Y FLEXIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

AUTORES:

PILLAJO RAMOS CHRISTIAN ALFREDO
christian.pillajo01@epn.edu.ec

DE LA CADENA PRADO ERICK JOSUÉ
erick.delacadena@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ZAMBRANO OREJUELA OSCAR IVÁN, M.Sc.
ivan.zambrano@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. GRANJA RAMÍREZ MARIO GERMAN, M.Sc.
mario.granja@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los autores **Christian Alfredo Pillajo Ramos y Erick Josué de la Cadena Prado**, bajo mi supervisión.

Ing. Iván Zambrano Orejuela
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Mario Granja Ramírez
CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Christian Alfredo Pillajo Ramos y Erick Josué de la Cadena Prado**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Christian Alfredo Pillajo Ramos

Erick Josué de la Cadena Prado

DEDICATORIA

A mi madre que se merece esto y mucho más. Gracias por ser la mejor madre.

A mi tío, que fue el precursor de iniciar este gran reto y que ahora está velando por mí desde el cielo.

Erick

Dedico este trabajo enteramente a toda mi familia: a mis padres por igual ya que si no hubiese tendido su apoyo y consejo no habría seguido una carrera universitaria, a mis hermanos Alex, Santiago y Verónica por siempre estar ahí cuando lo necesito, a mis sobrinos que me brindaron una carcajada con sus ocurrencias y a mi amigo Erick que me ha dado su apoyo incondicional siempre.

Christian

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a mi familia por brindarme su apoyo en todo momento de mi vida.

A mis amigos, en especial a Liz, Fer, Daya y Alexa. Es bueno saber que existen buenas personas en este mundo. Son lo mejor.

Agradezco a mi gran amigo Christian y a toda su familia, gracias por ayudarme en los momentos más difíciles.

Agradezco enormemente a mis amigos: Lenin, Guillo, Ricardo, Fabricio, Vini, Jorge y Edison por ser las maravillas personas que son y por estar ahí cuando más lo he necesitado.

A grupo de “Los Camaradas”, y “Chupemos Cabrones” por compartir buenos momentos, y malos también. Se los estima muchachos.

Al camarada, por ser mi primer amigo en la facultad y espero que estés en un mejor lugar ahora.

A las personas que creyeron en mí y a las que no también, pues me dieron más fortaleza de demostrarles que si se puede.

Agradezco a todas las personas de que una u otra manera apoyaron en este proyecto. Gracias totales.

Erick

Agradezco enormemente a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de titulación: a los colaboradores de la Metalmecánica de San Bartolo por su ayuda y amistad desinteresada, a los profesionales del laboratorio de Materiales Condensados, a los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica que indirectamente aportaron con el conocimiento necesario para el desarrollo de este trabajo y al Doctor Edwin Acosta por compartir sus conocimiento y experiencias.

Christian

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcance.....	2
Acrónimos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Termoelectricidad.....	3
1.1.1. Efecto Seebeck.....	3
1.1.2. Efecto Peltier.....	4
1.1.3. Efecto Thomson.....	4
1.1.3.1. Relaciones de Thomson (Kelvin).....	5
1.1.4. Efecto Nernst and Ettinghausen.....	5
1.2. Generación termoeléctrica.....	5
1.2.1. Eficiencia máxima permitida en un TED.....	6
1.2.2. Factor de mérito Z.....	6
1.3. Materiales termoeléctricos.....	8
1.3.1. Características del material analizado.....	9
1.3.2. Propiedades mecánicas.....	11
1.3.2.1. Propiedades mecánicas del silicio microcristalino.....	11

1.3.2.2. Propiedades del Kapton	11
1.3.3. Composición química	11
1.4. Tipos de semiconductores	11
1.4.1. Semiconductores intrínsecos	11
1.4.2. Semiconductores extrínsecos	12
1.4.2.1. Semiconductores de tipo N	12
1.4.2.2. Semiconductores de tipo P	12
1.5. Resistividad eléctrica	13
1.6. Efecto Hall	14
1.6.1. El voltaje de Hall	14
1.6.2. Movilidad de Hall	14
1.7. Técnica de Van Der Pauw (TVDP)	14
1.7.1.1. Geometría de la muestra	16
1.7.2. Resistencia de un dispositivo bajo medición	17
1.7.3. Contacto Metal – semiconductor	17
1.7.4. Equipos requeridos para TVPD	19
1.8. Distribución de los puntos en la superficie de prueba	20
1.9. Estados de doblado del material	20
1.9.1. Flexión de la película	21
1.9.2. Transferencia de calor por conducción	21
1.9.3. Transferencia de calor por convección	22
1.9.4. Transferencia de calor por radiación	22
1.10. Máquinas disponibles en el mercado	22
1.10.3. Sistemas de acople similares	24
1.11. Elementos mecánicos que conforman una ECOEE	24
1.11.1. Guía de cola de Milano	25
1.11.2. Guía de bolas lineales	25
1.11.2.1. Fuerzas resultantes	26
1.11.2.2. Capacidad de carga estática	26

1.11.2.3. Capacidad de carga dinámica.....	26
1.11.2.4. Capacidad de carga efectiva.....	27
1.11.2.5. Carga dinámica equivalente.....	27
1.11.2.6. Factor de seguridad estático S_0	27
1.11.3. Tornillo de potencia.....	28
1.11.4. Uniones soldadas.....	29
1.11.5. Deformación en dos capas.....	29
2. METODOLOGÍA.....	30
2.1. Diagrama de flujo.....	30
2.2. Casa de la calidad.....	30
2.2.1. Voz del usuario.....	30
2.2.2. Voz del ingeniero.....	31
2.2.3. Análisis de resultados.....	31
2.2.4. Conclusiones de la casa de calidad.....	32
2.3. Especificaciones técnicas.....	33
2.4. Análisis funcional.....	34
2.4.1. Diagrama funcional.....	34
2.5. Estructura modular.....	35
2.5.1. Módulo 1 (Posicionamiento y flexión de la probeta).....	35
2.5.1.1. Centrar superficie curva.....	36
2.5.1.1.1. Guía cola de milano.....	36
2.5.1.1.2. Rodamientos lineales.....	37
2.5.1.1.3. Guía de bolas lineales.....	37
2.5.1.2. Establecer superficie curva.....	38
2.5.1.2.1. Superficie curva reticulada.....	38
2.5.1.2.2. Bloques de curvatura.....	39
2.5.1.2.3. Mordazas paralelas.....	39
2.5.1.3. Posicionar probeta de MSTPD.....	40
2.5.1.4. Flexionar probeta.....	41

2.5.1.4.1. Placa de sujeción reticulada.....	41
2.5.1.4.2. Placas de sujeción simple	41
2.5.1.5. Fijar la probeta	42
2.5.1.6. Alternativas de módulos	42
2.5.1.7. Evaluación y selección de los módulos	43
2.5.2. Módulo 2 (Calentamiento y control de la temperatura de la superficie de prueba) .	45
2.5.2.1. Optimizar contacto térmico entre superficies disimiles	45
2.5.2.2. Calentar superficie curva a una temperatura de prueba.....	46
2.5.2.2.1. Calentamiento por inducción.....	46
2.5.2.2.2. Calentamiento por resistencia eléctrica.....	47
2.5.2.2.3. Calentamiento en volumen aislado	47
2.5.2.3. Controlar temperatura de superficie de prueba	48
2.5.2.4. Compensar gradiente de temperatura en la superficie de prueba	48
2.5.2.5. Aislar zona de prueba del ambiente exterior	48
2.5.2.6. Alternativas de módulos	49
2.5.2.7. Evaluación y selección de los módulos	49
2.5.3. Módulo 3 (Posicionamiento de los contactos eléctricos)	51
2.5.3.1. Aislar eléctricamente entre contactos eléctricos y posicionadores	52
2.5.3.2. Verificar no continuidad entre contactos eléctricos y posicionadores	52
2.5.3.3. Configurar el equipo (Keithley 2400) como fuente de corriente y setear a 1 mA .	52
2.5.3.4. Configurar el voltímetro en micro – voltios	52
2.5.3.5. Posicionar contactos eléctricos en cada esquina de la probeta.....	52
2.5.3.5.1. Rotación en los contactos y posicionadores.....	53
2.5.3.5.2. Rotación en la base magnética y posicionadores.....	53
2.5.3.6. Presionar los contactos posicionados sobre la probeta.....	54
2.5.3.6.1. Elevador de tornillo de potencia	54
2.5.3.6.1. Elevador de conjunto piñón – cremallera	55
2.5.3.7. Realizar prueba de linealidad variando la corriente suministrada para verificar contacto óhmico.....	56

2.5.3.8. Alternativas de módulos	56
2.5.3.9. Evaluación y selección de los módulos	57
2.5.4. Solución virtual de la máquina para medir resistividad eléctrica superficial.	59
2.6. Diseño y selección de componentes	60
2.6.1. Módulo 1: Posicionamiento y flexión de la probeta.....	60
2.6.1.1. Diseño de correderas de bolas lineal	60
2.6.1.1.1. Longitud del rail.....	60
2.6.1.1.2. Carrera.....	61
2.6.1.1.3. Número de elementos rodantes	61
2.6.1.1.4. Longitud de la jaula	61
2.6.1.1.5. Longitud del transporte de carga.....	61
2.6.1.1.6. Cargas en corredera superior.....	62
2.6.1.1.7. Cargas en corredera inferior	66
2.6.1.1.8. Mecanismo de avance: corredera superior.....	71
2.6.1.1.9. Mecanismo de avance: corredera inferior	73
2.6.1.2. Establecimiento de los radios de curvatura	76
2.6.2. Módulo 2: Calentamiento y control.....	78
2.6.2.1. Posición del calentador	78
2.6.2.2. Potencia de los calentadores y espesor del aislamiento térmico	79
2.6.2.3. Curvas de control del sistema	83
2.6.3. Módulo 3: Posicionamiento de los contactos eléctricos.....	88
2.6.3.1. Diseño del elevador	88
2.6.3.1.1. Cálculo del eje de elevación.....	88
2.6.3.1.1.1. Criterio de Euler	93
2.6.3.1.1.2. Cálculo del límite a la fatiga del eje de elevación	94
2.6.3.1.1.3. Cálculo de tornillo de potencia	95
2.6.3.2. Posicionadores	97
2.2. Costos	103
2.2.1. Costos de Insumos	103

2.2.2.	Costos de materiales	104
2.2.3.	Costos de elementos normalizados.....	105
2.2.4.	Costo total del diseño y construcción de la máquina	105
2.3.	Proceso experimental.....	106
2.3.1.	Deformación vs el radio de curvatura.....	107
2.4.	Protocolo de pruebas y mediciones.....	107
2.4.1.	Protocolo de pruebas	108
2.4.1.1.	Objetivo.....	108
2.4.1.2.	Responsable	108
2.4.1.3.	Conjunto de actividades	108
2.4.1.4.	Entradas	110
2.4.1.5.	Salidas	110
2.4.2.	Protocolo de mediciones.....	110
2.4.2.1.	Objetivo.....	110
2.4.2.2.	Responsable	110
2.4.2.3.	Sugerencias para el manejo de muestras	110
2.4.2.4.	Conjunto de actividades	110
2.4.2.5.	Entradas	113
2.4.2.6.	Salidas	113
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	114
3.1.	Resultados	114
3.2.	Discusión.....	121
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	123
4.1.	CONCLUSIONES.....	123
4.2.	RECOMENDACIONES	124
	Referencias Bibliográficas	125
	ANEXOS.....	129
I.	Propiedades mecánicas y composición química del material.....	129
II.	Cada de la calidad	130

III. Estructura funcional	131
IV. Corredera de bolas lineal	133
V. Engranajes	138
VI. Cuerdas	138
VII. Eje de elevación	138
VIII. Tornillo de potencia	142
IX. Análisis térmico.....	144
X. Características del sensor de temperatura.....	144
XI. Costos	145
XII. Mediciones de la Resistividad.....	146
XIII. Planos de la máquina	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Desarrollo de la investigación de la termoelectricidad.	3
Figura 1.2. Efecto Seebeck.....	3
Figura 1.3. Efecto termoeléctrico: a) Seebeck, b) Peltier.	6
Figura 1.4. Eficiencia generativa vs temperatura de un termopar.....	7
Figura 1.5. Parámetros de factor de mérito en función de la concentración de cargas.....	8
Figura 1.6. Factor de mérito de materiales termoeléctricos.....	9
Figura 1.7. Esquema del crecimiento del $\mu\text{-Si: H}$ en un sustrato.	10
Figura 1.8. a) Dimensiones de las probetas, b) Espesor del material.....	10
Figura 1.9. Fracción de volumen de cristales (%) y su tamaño vs temperatura de recocido.	11
Figura 1.10. Estructura cristalina de un semiconductor intrínseco, compuesta solamente por átomos.....	12
Figura 1.11. Representación bidimensional de un semiconductor tipo-n (a) y tipo-p (b)...	13
Figura 1.12. Material isotrópico.	14
Figura 1.13. Esquema de la configuración usada en la determinación del voltaje de Hall.	14
Figura 1.14. a) Esquema de la TVDP (Fuente: [18]), b) Aplicación de la TVDP en TED.	15
Figura 1.15. Esquema del procedimiento para la TVDP.....	15
Figura 1.16. Geometrías de las muestras para mediciones de MVDP y efecto Hall.	16
Figura 1.17. Arreglo para medir resistencia por 2 puntas (a) y cuatro puntas (b).	17
Figura 1.18. Diagrama de bandas para un contacto metal – semiconductor.	18
Figura 1.19. Curvas características V vs I de contacto metal – semiconductor.	19
Figura 1.20. Distribución de puntos: a) superficie plana, b) superficie curva.	20
Figura 1.21. a) Estado de doblado Cóncavo hacia abajo MSTSPD, b) Estado de prueba cóncavo hacia arriba MSTSPD.	21
Figura 1.22. Flexión de la probeta cóncava hacia abajo.	21
Figura 1.23. Estación de caracterización de obleas circuitos y semiconductores FormFactor / Cascade Microtech	23

Figura 1.24. Estación de caracterización de obleas circuitos y semiconductores Wentworth Labs.....	23
Figura 1.25. Sistema doblador de probetas para acoplar a estación de caracterización. .	24
Figura 1.26. Elementos mecánicos de ECOEE.....	25
Figura 1.27. Guía de cola de Milano de ECOEE.....	25
Figura 1.28. Guía deslizante lineal.....	26
Figura 1.29. a) mecanismo de tornillo de potencia, b) fuerzas presentes en un tornillo de potencia.....	28
Figura 1.30. Uniones soldadas.	29
Figura 2.1. Diagrama de flujo.....	30
Figura 2.2. Guía cola de milano.	36
Figura 2.3. Guía con rodamiento lineal.	37
Figura 2.4. Guía de bolas lineales.....	37
Figura 2.5. Superficie curva reticulada.....	38
Figura 2.6. Bloques de curvatura.	39
Figura 2.7. Mecanismo de mordazas paralelas.....	40
Figura 2.8. Placa de sujeción reticulada.....	41
Figura 2.9. Placa de sujeción simple.....	42
Figura 2.10. Calentador por inducción.	46
Figura 2.11. Calentamiento por resistencia eléctrica tipo cartucho.....	47
Figura 2.12. Calentamiento en volumen aislado.	47
Figura 2.13. Rotación en contactos y posicionadores.	53
Figura 2.14. Rotación en base magnética y posicionadores.	54
Figura 2.15. Elevador de tornillo de potencia.	55
Figura 2.16. Elevador de conjunto piñón – cremallera.	55
Figura 2.17. Solución virtual de la máquina para medir resistividad eléctrica superficial. .	59
Figura 2.18. Corredera de bolas lineal.	60
Figura 2.19. Distancias L_T y B_1 del sistema de correderas de bolas lineal.....	62
Figura 2.20. Diagrama de carga de la corredera superior.	63

Figura 2.21. Diagrama de fuerzas de fricción.....	65
Figura 2.22. Corredera inferior: a) vista isométrica, b) vista frontal, c) vista lateral.....	67
Figura 2.23. Transferencia de calor del equipo sometido a 250 °C en las resistencias tipo cartucho.....	70
Figura 2.24. Conjunto piñón – cremallera.	71
Figura 2.25. Diagrama de fuerzas del piñón y cremallera.	71
Figura 2.26. Dimensiones típicas del diente.....	72
Figura 2.27. Mecanismo de avance: corredera superior.	73
Figura 2.28. Conjunto: poleas – cuerda dial.....	74
Figura 2.29. Elemento diferencial de la cuerda.	74
Figura 2.30. Distribución de fuerzas en el cilindro.....	75
Figura 2.31. Longitud de arco.	77
Figura 2.32. Posición de un calentador.....	78
Figura 2.33. Posición del calentador.	79
Figura 2.34. Posición para dos calentadores.	79
Figura 2.35. Parámetros de simulación.....	80
Figura 2.36. Temperatura en la zona de prueba: modelo 3D.	82
Figura 2.37. Elementos de aislamiento térmico.....	83
Figura 2.38. Volumen representativo de control.....	84
Figura 2.39. Sistema de lazo cerrado.	86
Figura 2.40. Sistema de lazo cerrado.	86
Figura 2.41. Curvas de estabilidad para controlador: PID, PI y PD.	87
Figura 2.42. Modelo del eje elevador.....	88
Figura 2.43. Sección transversal del eje elevador.....	89
Figura 2.44. Fuerzas actuantes eje elevador.	89
Figura 2.45. Reacciones y momentos del eje.....	90
Figura 2.46. Diagramas en el plano XZ: a) Restricciones, b) fuerza cortante, c) momento flector y d) normal y torsión.....	91

Figura 2.47. Diagramas en el plano YZ: a) Restricciones, b) fuerza cortante, c) momento flector y d) normal y torsión.....	92
Figura 2.48. Diagrama de fuerzas en el cilindro y bocín.....	95
Figura 2.49. Medidas del collarín.	96
Figura 2.50. Análisis vectorial de la posición del contacto eléctrico; a) Plano xy, b) Plano yz.....	98
Figura 2.51. Análisis del ángulo de recorrido: a) ángulo, b) longitud plana yz.	98
Figura 2.52. Gráficas de posicionamiento de bloques a tensión.	100
Figura 2.53. Gráficas de posicionamiento de bloques a compresión.....	100
Figura 2.54. Posicionador de contactos.	101
Figura 2.55. Sujetador del contacto.	101
Figura 2.56. Varilla de sujeción de los contactos.	102
Figura 2.57. Máquina para ensayar un material termoeléctrico de película delgada por el método de Van der Pawn.	106
Figura 2.58. Medición del voltaje en las esquinas de la muestra.....	106
Figura 2.59. Medición del voltaje a 5 [mm] del centro.	106
Figura 2.60. Medición del voltaje a 5 [mm] del centro de la muestra sometido a un radio de curvatura.....	107
Figura 2.61. Deformación del MSTPD en función del radio de curvatura.	107
Figura 2.62. Mediciones de la temperatura de la superficie en el punto 3 del bloque de 12.8 [mm].	109
Figura 2.63. Conexión de bornes de los contactos óhmicos en la fuente de corriente Keithley.....	111
Figura 2.64. Puntos de contacto de en centro.....	112
Figura 3.1. Gradiente de temperaturas simulados y valor experimental a 150 °C en el bloque plano.	116
Figura 3.2. Bloque de diámetro 12,8 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.....	117
Figura 3.3. Bloque de diámetro 24,0 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.....	117
Figura 3.4. Bloque de diámetro 35,2 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.....	117
Figura 3.5. Bloque de diámetro 46,4 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.....	118

Figura 3.6. Bloque de diámetro 57,6 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.....	118
Figura 3.7. Bloque de diámetro 68,8 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.....	118
Figura 3.8. Bloque de diámetro 80,0 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.....	119
Figura 3.9. Variación de la conductividad eléctrica axial en función de la flexión negativa (tensión) en la muestra post-tratada 18B-05-03 (tipo N).	119
Figura 3.10. Variación de la conductividad eléctrica transversal en función de la flexión negativa (tensión) en la muestra post-tratada 18B-05-03 (tipo N).	120
Figura 3.11. Variación de la conductividad eléctrica axial en función de la flexión positiva (compresión) en la muestra post-tratada 18B-05-01 (tipo N).....	120
Figura 3.12. Variación de la conductividad eléctrica transversal en función de la flexión positiva (compresión) en la muestra post-tratada 18B-05-01 (tipo N).....	120
Figura II.1. Casa de la calidad.	130
Figura III.1. Estructura funcional, nivel 0 y nivel 1	131
Figura III.2. Estructura funcional, nivel 2.	132
Figura IV.1. Disposición de las correderas lineales.....	133
Figura IV.2. Disposiciones de la guía de riel.	134
Figura IV.3. Factor de dureza estático y dinámico en las pistas de rodadura.	136
Figura IV.4. Factor de temperatura en la temperatura de operación.	137
Figura IV.5. Factor de carrera en función de S/L_{cage}	137
Figura VII.1. Cálculo de C en función de los casos articulados, empotrados y/o libres. .	139
Figura VII.2. Sensibilidad de la muesca.	141
Figura VII.3. Factor de concentrador de esfuerzos en filete.	141
Figura VIII.1. Viscosidad de algunos aceites en función de la temperatura.....	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Desempeños obtenidos en trabajos previos.....	8
Tabla 1.2. Equipos necesarios para TVD.....	19
Tabla 1.3. Ejemplos de máquinas disponibles en el mercado.	23
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.	33
Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de guía cola de milano.	36
Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de guía con rodamiento lineal.	37
Tabla 2.4. Ventajas y desventajas de las guías de bolas lineales.	38
Tabla 2.5. Ventajas y desventajas de la superficie curva reticulada.....	39
Tabla 2.6. Bloques de curvatura.	39
Tabla 2.7. Ventajas y desventajas del mecanismo de mordazas paralelas	40
Tabla 2.8. Ventajas y desventajas del mecanismo de placa de sujeción reticulada.	41
Tabla 2.9. Ventajas y desventajas del mecanismo de placa de sujeción simple.	42
Tabla 2.10. Matriz morfológica del módulo 1.....	43
Tabla 2.11. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 1.....	44
Tabla 2.12. Evaluación de las soluciones con respecto a la precisión.	44
Tabla 2.13. Evaluación de las soluciones con respecto a lo compacto de sus elementos.	44
Tabla 2.14. Evaluación de las soluciones con respecto a la rigidez.	44
Tabla 2.15. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de manejo.	45
Tabla 2.16. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.	45
Tabla 2.17. Conclusiones de la matriz del módulo 1.....	45
Tabla 2.18. Ventajas y desventajas del sistema de calentamiento por inducción.....	46
Tabla 2.19. Ventajas y desventajas del sistema de calentamiento por resistencia eléctrica	47
Tabla 2.20. Ventajas y desventajas del sistema de calentamiento en volumen aislado. ..	48
Tabla 2.21. Matriz morfológica del módulo 2.....	49
Tabla 2.22. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 2.....	50

Tabla 2.23. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de acoplamiento....	50
Tabla 2.24. Evaluación de las soluciones con respecto a la fiabilidad.....	50
Tabla 2.25. Evaluación de las soluciones con respecto al calentamiento uniforme.....	50
Tabla 2.26. Evaluación de las soluciones con respecto al grado de control de temperatura.	51
Tabla 2.27. Evaluación de las soluciones con respecto al tiempo en estado estable.	51
Tabla 2.28. Conclusiones de la matriz del módulo 2.	51
Tabla 2.29. Ventajas y desventajas del mecanismo de rotación dentro del eje del posicionador y contacto.	53
Tabla 2.30. Ventajas y desventajas del mecanismo de rotación conjunta del posicionador y contacto.	54
Tabla 2.31. Ventajas y desventajas del mecanismo elevador de tornillo de potencia.....	55
Tabla 2.32. Ventajas y desventajas del mecanismo elevador de conjunto piñón – cremallera.....	56
Tabla 2.33. Matriz morfológica del módulo 3.....	56
Tabla 2.34. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 3.....	57
Tabla 2.35. Evaluación de las soluciones con respecto a la precisión.	58
Tabla 2.36. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de posicionamiento.	58
Tabla 2.37. Evaluación de las soluciones con respecto a la inclinación.	58
Tabla 2.38. Evaluación de las soluciones con respecto a la fiabilidad.....	58
Tabla 2.39. Evaluación de las soluciones con respecto a la estabilidad.....	58
Tabla 2.40. Conclusiones de la matriz del módulo 3.	58
Tabla 2.41. Propiedades mecánicas del Nylon (PA-66)	69
Tabla 2.42. Resultados para diferentes carreras y longitudes de riel.	70
Tabla 2.43. Valores resumidos para carrera y longitud de riel seleccionado.	71
Tabla 2.44. Resultados para el avance en corredera superior.	73
Tabla 2.45. Resultados mecanismo de avance: corredera inferior.....	76
Tabla 2.46. Temperatura en los distintos puntos en la simulación.	82
Tabla 2.47. Resistencias térmicas de cartucho 3/8”	82

Tabla 2.48. Resultados de curvas de control del sistema.	87
Tabla 2.49. Parámetros de los controladores.....	88
Tabla 2.50. Resultados de diseño de eje elevador.....	93
Tabla 2.51. Desplazamiento angular para cada radio de curvatura.....	99
Tabla 2.52. Características del posicionador.	101
Tabla 2.53. Costos de insumos.....	103
Tabla 2.54. Costos de materiales.....	104
Tabla 2.55. Costos de elementos normalizados.....	105
Tabla 2.56. Costo total de máquina.	105
Tabla 3.1. Comparación de datos obtenidos con los proporcionados.	114
Tabla 3.2. Porcentaje de error de todas las probetas analizadas.....	115
Tabla 3.3. Resultados obtenidos experimentales y simulados del bloque plano.	116
Tabla I.1. Propiedades mecánicas del silicio.....	129
Tabla I.2. Propiedades mecánicas de la poliamida (kapton).....	129
Tabla I.3. Composición química del MSTPD.....	129
Tabla IV.1. Dureza de los materiales en los elementos de la corredera.	133
Tabla IV.2. Factor de seguridad de acuerdo a las condiciones de operación.	134
Tabla IV.3. Factor de confiabilidad.....	135
Tabla IV.4. Cargas en montajes de bolas y rodillos cruzados con sus dimensiones.	135
Tabla IV.5. Longitudes de riel disponibles en montajes de bolas y rodillos cruzados.	136
Tabla V.1. Tamaño de dientes típico para los ángulos de presión.	138
Tabla VI.1. Tamaño y coeficiente de fricción de cuerdas.	138
Tabla VII.1. Propiedades mecánicas del acero AISI 1018.....	138
Tabla VII.2. Resistencias a tensión y fluencia de algunos aceros laminados en caliente y estirados en frío.	139
Tabla VII.3. Factor de corrección superficial.	140
Tabla VII.4. Factor de confiabilidad.....	140
Tabla VII.5. Factor de temperatura de operación.	140
Tabla VII.6. Factor de concentrador de esfuerzos en el chavetero.....	142

Tabla VIII.1. Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino.	142
Tabla VIII.2. Coeficientes de fricción f de pares roscados.	143
Tabla VIII.3. Coeficientes de fricción de collarín de empuje.	143
Tabla IX.1. Coeficiente de convección.	144
Tabla IX.2. Propiedades de radiación solares.	144
Tabla X.1. Características del sensor de temperatura.	144
Tabla XI.1. Costo de mano de obra.	145
Tabla XII.1. Mediciones de la resistividad para una muestra a tensión.	146

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y construye una máquina que aplica parámetros de temperatura, flexión y posicionamiento a probetas de semiconductores de película delgada de tipo N y P los cuales presentan propiedades termoeléctricas, con el fin de caracterizar eléctricamente al semiconductor utilizando la técnica de Van Der Pauw.

Adicionalmente, se realizar mediciones de conductividad a probetas proporcionados por investigadores de la Universidad de Harriot Watt de Edimburgo. La metodología de diseño está basada en los criterios de diseño concurrente del autor Carles Riba, mediante el cual se obtiene una solución que me permita cubrir las necesidades requeridas de manera eficaz; la máquina fue sometida a pruebas de funcionamiento de variación de temperatura a diferentes radios de curvatura, tiempo de estabilización y error en estado estable para una temperatura.

Las pruebas de funcionamiento revelan un gradiente promedio de temperatura mayor en la superficie de medición en bloques de flexión negativa con un radio de curvatura de 40 mm y una desviación máxima de $0,9^{\circ}\text{C}$ en determinados puntos de prueba a una temperatura de prueba de 150°C para dos calentadores de cartucho insertados en el bloque, adicionalmente el tiempo de estabilización máximo obtenido en el bloque de flexión positiva de 40 mm de radio para un error de 5% de la escala total en estado estable es de 55min; por otro lado, la máxima conductividad corresponde a la dirección transversal de la probeta 18B-05-03 de tipo N y una tendencia decreciente no lineal a temperatura de medición de 60°C .

Palabras clave: Diseño concurrente, Flexión, Transferencia de calor, Técnica de Van Der Pauw, Resistividad eléctrica, Semiconductor de película fina.

ABSTRACT

In the present work, a machine is designed and built that applies temperature, bending and positioning parameters to N and P type thin film semiconductor samples with thermoelectric properties, in order to electrically characterize the semiconductor using the Van Der Pauw technique.

Additionally, it is done measurement of the sample's conductivity provided by researchers on the Harriot Watt University in Edinburgh. The design methodology is based on the concurrent design criteria of the author Carles Riba, by means of which a solution is obtained that allows me to cover the necessities required in an efficient way; the machine was submitted to tests of operation of variation of temperature to different radius of curvature, time of stabilization and error in stable state for a given temperature.

The performance tests reveal a higher average temperature gradient on the measuring surface in negative bending blocks with a bending radius of 40 mm and a maximum deviation of 0.9°C at determined test points at a test temperature of 150°C for two cartridge heaters inserted in the block, additionally the maximum stabilization time obtained in the positive bending block of 40 mm radius for an error of 5% of the full scale in steady state is 55min; On the other hand, the maximum conductivity corresponds to the transverse direction of the 18B-05-03 N-type sample and a non-linear decreasing trend at a measurement temperature of 60°C.

Keywords: Concurrent design, Bending, Heat transfer, Van Der Pauw Technique, electrical resistivity, Thin film semiconductor.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA TOMAR MEDICIONES DE LAS PROPIEDADES DE UN MATERIAL TERMOELÉCTRICO DE PELÍCULA DELGADA INTRODUCIENDO PARÁMETROS DE TEMPERATURA Y FLEXIÓN

INTRODUCCIÓN

La tecnología termoeléctrica constituye una opción viable de mejoramiento de la eficiencia especialmente en máquinas térmicas al aprovechar su calor residual, sin embargo, las aplicaciones prácticas de la tecnología termoeléctrica no han logrado una penetración prominente en los mercados debido principalmente a sus bajos rendimientos.

Por otro lado, la creación de materiales semiconductores flexibles con propiedades termoeléctricas a base de silicio promete un desempeño viable para establecer un nuevo paradigma a formas de generación alternativa de energía, así como métodos cada vez más baratos y rápidos de obtenerlos [1]. El MSTPD permite aprovechar energía difícilmente utilizada como es el calor residual de superficies curvas para la generación de electricidad, esta tecnología se está convirtiendo en el próximo escenario energético por lo que se generará nuevos campos de aplicación dejando de lado los materiales termoeléctricos rígidos convencionales al ser por lo general tóxicos y quebradizos. [2].

Anteriormente la caracterización de las propiedades eléctricas de termoeléctricos de películas delgadas se lleva a cabo utilizando placas térmicas planas, ahora es necesario realizar las mediciones en superficies térmicas curvas ya que existe una variación en el comportamiento de las carga eléctricas al ser sometidos a sollicitaciones mecánicas de flexión (compresión y tracción en la película de semiconductor), lo que conlleva a la modificación de la estructura molecular producto de la rotura de enlaces dentro de la microestructura del material, esto genera una variación y/o degradación de las propiedades eléctricas [3].

El problema radica en la inexistencia de una máquina específica para las mediciones de las propiedades eléctricas de un material termoeléctrico flexible, con el fin de que permita realizar tres funciones: flexionar el material termoeléctrico bajo un radio de curvatura gradual, proporcionar una temperatura constante a lo largo de la superficie de contacto entre la placa y el substrato, permitir el posicionamiento de los contactos en cada una de las esquinas de la probeta.

Con la ayuda de la máquina a construir se realiza la medición de resistividad superficial de un material TS, el material será sometido a diferentes radios de curvatura en tensión, compresión y en el plano respectivamente, ver Figura 1.21. Las mediciones se las realiza

a temperatura ambiente y a 60°C, con la ayuda de equipos de alta precisión como son una fuente de corriente y un voltímetro, se pretende determinar la resistividad eléctrica para las distintas muestras (tipo N y tipo P) del material semiconductor para cada uno de los radios de curvatura.

Objetivo general

Diseñar y construir una máquina que me permita flexionar y calentar probetas de semiconductores de película fina y a la vez proporcionar un mecanismo de posicionamiento de los contactos eléctricos para realizar la técnica de Van Der Pauw.

Objetivos específicos

- Seleccionar la alternativa final de diseño.
- Establecer las dimensiones de los componentes o piezas.
- Determinar la posición adecuada de la fuente de calor.
- Comprobar que la variación de la temperatura en la superficie de prueba sea adecuada según especificaciones en el protocolo de mediciones de manera experimental y luego por medio de simulador de ANSYS.
- Determinar la conductividad eléctrica del material.

Alcance

El alcance de este proyecto de titulación es el diseño y la construcción de una máquina que permita sujetar, posicionar, doblar y calentar probetas flexibles de MSTPD para medir propiedades eléctricas y electrónicas (movilidad de hall, conductividad eléctrica y coeficiente de Seebeck) a través del método de Van Der Pawn (método de las cuatro puntas).

Acrónimos

PECVD:	Proceso de deposición de vapor químico mejorado por plasma.
μc-Si: H:	Silicio microcristalino hidrogenado.
MSTPD:	Material semiconductor termoeléctrico de película delgada.
SPD:	Semiconductor de película delgada.
TVDP:	Técnica de Van Der Pauw.
ST:	Semiconductor termoeléctrico.
TED:	Dispositivo termoeléctrico.
ECOEE:	Estación de caracterización de obleas de elementos electrónicos.
PF:	Factor de potencia.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se analiza la termoelectricidad, sus principios científicos, sus parámetros de rendimiento y sus técnicas de caracterización. Adicionalmente, se describen los componentes mecánicos principales que conforma la máquina de medición de resistividad superficial de termoelectricos de película delgada, así como los tipos de máquinas y equipos existentes en los mercados mundiales.

1.1. Termoelectricidad

La termoelectricidad o fenómeno termoelectrico es la transformación de energía calórica (gradiente de temperatura) a energía eléctrica (voltaje eléctrico) o viceversa a través de tres fenómenos relacionados entre sí por las relaciones de Thomson, el efecto Seebeck, el efecto Peltier y el efecto Thomson. En la Figura 1.1. se puede observar la evolución de la investigación de la termoelectricidad considerando el porcentaje de investigaciones publicadas del total publicaciones realizadas desde 1955 hasta 2006. [4]

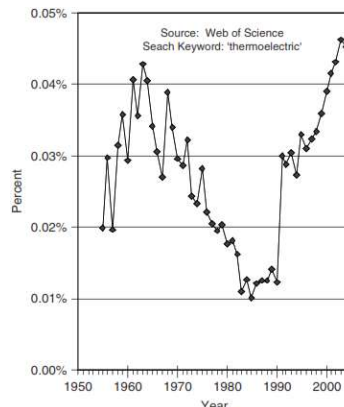


Figura 1.1. Desarrollo de la investigación de la termoelectricidad.
(Fuente: [4, p. A1-2])

1.1.1. Efecto Seebeck

El efecto Seebeck es la transformación directa de un gradiente de temperatura en un voltaje eléctrico, en la Figura 1.2. se muestra el esquema principal de una termocupla compuesta.

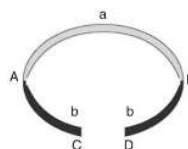


Figura 1.2. Efecto Seebeck.
(Fuente: [4, pp. 1-2])

por dos conductores disimiles a y b los cuales son conectados eléctricamente in serie pero termalmente en paralelo por las juntas A y B, si dichas juntas se mantienen a una temperatura diferente T_1 y T_2 con $T_1 > T_2$ se produce una fuerza electromotriz (FEM) en el

circuito abierto, es decir, un voltaje es generado en los extremos C y D [4]. En la ecuación 1.1. se presenta el voltaje generado en el termopar. [4]

$$a) \quad V = S_{ab}(T_1 - T_2) \quad ; \quad b) \quad V = \int_{T_1}^{T_2} S_{ab}(T) dT \quad (1.1.)$$

Donde:

S_{ab} : Coeficiente Seebeck relativo a los conductores a y b $\left[\frac{\mu V}{K}\right]$.

La ecuación 1.1.a. cuantifica el voltaje presente en el circuito de la Figura 1.2., considerando una relación lineal, esto solo se cumple cuando el gradiente de temperatura es pequeño (máximo de 10°C), para gradientes de temperatura mayores se usa la ecuación 1.1.b. [4]

1.1.2. Efecto Peltier

El efecto Peltier es la situación inversa de la Figura 1.2., al circuito de conductores disimiles se le aplica una fuente externa de FEM en los extremos C y D, esta situación produce un flujo de corriente alrededor del circuito produciendo un calentamiento q en una junta y $-q$ en la otra. La relación entre la transferencia de calor (q) y la corriente (I) se define como el coeficiente de Peltier absoluto para un único conductor, ver ecuación 1.2c. [4]

$$c) \quad \pi = \frac{I}{q} \quad ; \quad d) \quad q = \pi_{ab} I = (\pi_b - \pi_a) I \quad (1.2.)$$

Donde:

π : Coeficiente de Peltier $\left[\frac{W}{A} \text{ ó } V\right]$.

El coeficiente de Peltier es positivo si la junta A se calienta y la junta B se enfría considerando una circulación de la corriente en el sentido de las manecillas del reloj. El efecto Peltier no se percibe como un fenómeno de un único conductor, más bien se considera un coeficiente de Peltier como constitución única de uno a más conductores (conductor-conductor o conductor-electrodo), ver ecuación 1.2d. [4]

1.1.3. Efecto Thomson

El efecto Thomson es la relación de generación de calor reversible q resultado del paso de una corriente a lo largo de una porción de un único conductor en el cual existe un diferencial de temperatura ΔT (considerando una diferencia de temperatura pequeño) [4]. En la ecuación 1.3. se representa la generación de calor reversible. [4]

$$q = \beta I \Delta T \quad (1.3.)$$

Donde:

β : es el coeficiente de Thomson $\left[\frac{V}{K}\right]$

I : es la corriente que circula por el circuito [A]

El coeficiente Thomson de un material es el único de los tres coeficientes descritos anteriormente que puede ser medido de manera absoluta, dado que su medición no implica la introducción de una junta adicional. Los coeficientes Seebeck y Peltier son obtenidos de manera conjunta con un material adicional ya sea un electrodo del aparato medidor o un conductor determinado. Sin embargo, en trabajos previos se ha logrado medir los coeficientes Seebeck y Peltier absolutos con la ayuda de materiales superconductores (presentan una altísima conductividad eléctrica sin ninguna variación en su entalpía). [4]

1.1.3.1. Relaciones de Thomson (Kelvin)

Los coeficientes anteriormente expuestos son enlazados por las relaciones de Kelvin [4] tal como se presenta en la ecuación 1.4.:

$$e) \quad S_{ab} = \frac{\pi_{ab}}{T} \quad ; \quad f) \quad \frac{dS_{ab}}{dT} = \frac{\beta_a - \beta_b}{T} \quad (1.4.)$$

El trabajo de Thomson de la termoelectricidad es probablemente el primer estudio de la termodinámica irreversible, por lo que no es de asombrarse que sus relaciones puedan ser deducidas de la teoría de la termodinámica como tal.

1.1.4. Efecto Nernst and Ettinghausen

Este efecto estudia la directa influencia de un campo magnético en la síntesis de los coeficientes termoeléctricos evaluados anteriormente. Los efectos Nernst y Ettinghausen es el resultado unificado de la difusión de portadores de carga y el arrastre de fonones intrínsecamente enlazado a las características del conductor termoeléctrico, en otras palabras, en el efecto Nernst un campo eléctrico transversal E_Y es producido por un gradiente de temperatura longitudinal $\frac{dT}{dx}$, en presencia de un campo magnético B_Z y en el efecto Ettinghausen un gradiente de temperatura transversal es producida por una corriente eléctrica longitudinal con un coeficiente termomagnético, sus relaciones matemáticas se presentan en la referencia bibliográfica [4, pp- 1-4]

1.2. Generación termoeléctrica

Los dispositivos termoeléctricos no están exentos de las leyes que rigen la termodinámica básica, en cualesquiera de sus configuraciones ya sea como TED (generadores termoeléctricos) o como dispositivo calefactor se limita a la eficiencia de Carnot, es decir, si consideramos la operación de un generador ideal en el cual no existe perdidas, la eficiencia se define como una relación de la potencia eléctrica entregada por la carga de calor absorbida en la junta caliente, ver Figura 1.3.

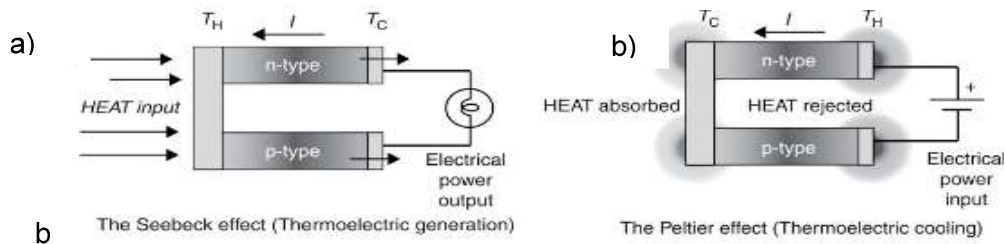


Figura 1.3. Efecto termoeléctrico: a) Seebeck, b) Peltier.
(Fuente: [4, pp. 1–4])

En la Figura 1.3. se muestra los efectos termoeléctricos en un dispositivo compuesto por semiconductores extrínsecos, se puede notar que manteniendo una dirección de la corriente constante y la posición de los semiconductores dentro del circuito constantes se produce un cambio en la dirección de la transferencia de calor (q) en ambos casos. [4]

1.2.1. Eficiencia máxima permitida en un TED

Un TED es una máquina térmica por lo que su máxima eficiencia viene dada por el grado de aprovechamiento de la energía de entrada y su mínima energía residual al final del proceso. Sin embargo, la eficiencia máxima que puede desarrollar un TED se limita a la eficiencia de Carnot, la eficiencia de un TED está dada por la ver ecuación 1.5. [4]

$$\eta_{TEG} = \frac{\text{Energía suministrada por las carga}}{\text{Energía calorica abosrbida en la junta caliente}} \quad ; \quad \eta_{TEG} = \eta_c \gamma \quad (1.5.)$$

Donde:

η_c : Eficiencia de Carnot $\left(\frac{T_H - T_C}{T_C}\right)$, %

γ : es el coeficiente debido a los parámetros intrínsecos del material, %

El coeficiente γ es función de la temperatura de la junta caliente, la junta fría, la temperatura promedio y el factor de mérito.

1.2.2. Factor de mérito Z

El factor de mérito (Z) es un parámetro de los termoelementos que define de manera acertada la capacidad de generar potencial eléctrico aprovechable de un material a partir del análisis de sus propiedades físicas y geométricas. Ver ecuación 1.6. del factor de mérito en forma dimensional. [4]

$$Z = \frac{S^2 \sigma}{k} \quad (1.6.)$$

Donde:

Z : Factor de mérito [K^{-1}]

σ : Conductividad eléctrica del material [$\Omega^{-1}m^{-1}$]

k : Conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{mK}\right]$

Generalmente el factor de mérito (Z) se expresa en forma adimensional como (ZT), expresado en la ecuación 1.7. [4]:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{k} \quad (1.7.)$$

Donde:

$PF = S^2 \sigma$: los primeros dos términos del numerador se conocen como factor de potencia, cuyas unidades son $\left[\frac{W}{mK^2}\right]$.

El factor de mérito ZT no representa una propiedad intrínseca del material dado que su conductividad eléctrica depende directamente de la geometría del material, en la Figura 1.4. se puede observar la figura de mérito para la eficiencia generativa de un material termopar en función de la temperatura de la junta caliente considerando una junta fría a 300K (27°C).

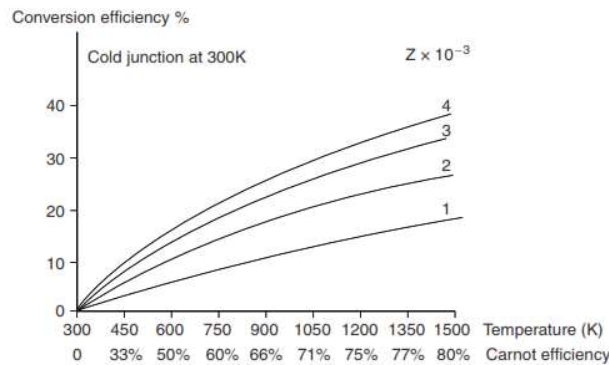


Figura 1.4. Eficiencia generativa vs temperatura de un termopar.
(Fuente: [4, pp. 1-5])

Así pues, para un material termopar que opere a una diferencia de temperatura de 500K y un factor de mérito de $3 \times 10^{-3}/K$ presentaría una eficiencia de 20% [4].

El éxito en la introducción de los TED en los mercados de las energías alternativas y más específicamente de los dispositivos que aprovechen la energía residual de procesos térmicos más grandes radica en obtener materiales con factores de mérito de al menos de $Z = 3 \times 10^{-3}/K$ para competir con tecnología ya existentes. Sin embargo, para materiales cuyo factor de mérito $ZT \geq 0,5$ ya son considerados como materiales termoeléctricos. En la Tabla 1.1. se puede observar los desempeños obtenidos en TED de película fina en base $\mu\text{-Si}$ en trabajos previos:

Tabla 1.1. Desempeños obtenidos en trabajos previos.

Descripción	Conductividad térmica (W/mK)	Factor de mérito ZT	Referencia bibliográfica
Silicon nanowires ~ $\varnothing 50nm$	0.76 – 1.5	0.4 – 0.6	[5]
Necking effect for phonon scattering	1.14 – 2.03	~0.4	[6]
Modulation – Doping in nano– composites	0.8 – 1.2	~1.3 a 900°C	[7]
Phosphorous doped nanostructured bulk silicon	1.05 – 1,9	0.6 a 1050K	[8]
Single crystal silicon	<1	0.2 a 360K	[9]

Nota: todos los trabajos presentados son los que mejores resultados tienen en el campo estudiado, existen otros trabajos aparte de estos, pero no son los tan relevantes.

1.3. Materiales termoeléctricos

Como se analizó en el tema anterior, un material idóneo para la fabricación de TED debe cumplir con un factor de mérito (ZT) relativamente alto.

En la ecuación 1.7. se plantea el factor de mérito como función de: la conductividad eléctrica, conductividad térmica y coeficiente de Seebeck, por lo que, para una conductividad eléctrica y un coeficiente de Seebeck altos se tiene un ZT alto, del mismo modo si mantenemos constantes S, σ y variamos la conductividad térmica k se obtendría aún mejores resultados. No obstante, los coeficientes: S, σ y k están en función de la concentración de carga (n), en la Figura 1.5. se muestra como varia los coeficientes S, σ y k en función de la concentración de carga en tres tipos de materiales: aislantes, semiconductores y metales. [10]

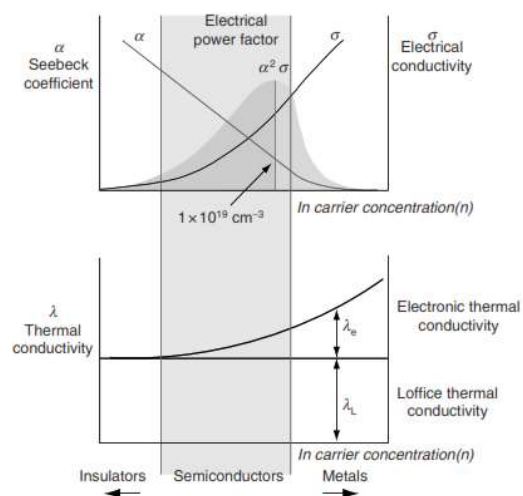


Figura 1.5. Parámetros de factor de mérito en función de la concentración de cargas. (Fuente: [4, pp. 1–8])

Se puede concluir que mientras la concentración de cargas aumenta la conductividad eléctrica también aumenta y el coeficiente de Seebeck disminuye.

Similar a lo ocurrido con la conductividad eléctrica, la conductividad térmica total (k_T) también aumenta, pero con una diferencia; la conductividad térmica viene definida por la suma de dos conductividades adyacentes como se indica en la ecuación 1.8. [4].

$$k_T = k_l + k_e \quad (1.8.)$$

Donde:

k_l : Conductividad térmica debido a la contribución de la red $\left[\frac{W}{mK}\right]$

k_e : Conductividad térmica debido a la contribución electrónica $\left[\frac{W}{mK}\right]$

En la Figura 1.6. se muestra el rendimiento de materiales termoeléctricos más usados en el mercado expresado como el factor de mérito en función de la temperatura caliente. No obstante, los termoeléctricos fabricados a partir de silicio y germanio no son los que presentan los mejores rendimientos, sin embargo, son usados principalmente por la gran abundancia de materia prima y presentan una amplia expectativa de mejora.

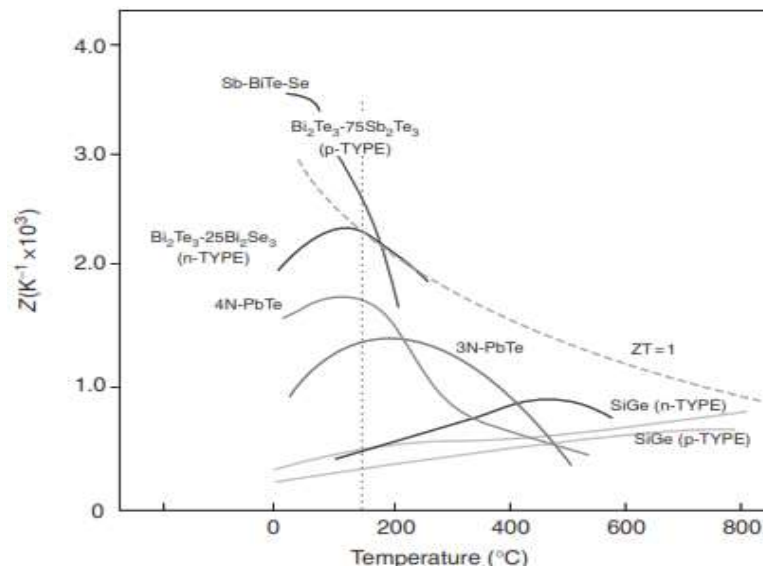


Figura 1.6. Factor de mérito de materiales termoeléctricos.
(Fuente: [4, pp. 1–9])

1.3.1. Características del material analizado

El material semiconductor de tipo N y P de película delgada con propiedades termoeléctricas es desarrollado a partir de una estructura de micro/nano cristales de silicio hidrogenada ($\mu c-Si:H$), la cual es depositada en un sustrato de kapton (polímero de alta resistencia térmica y mecánica) mediante el proceso de PECVD [4].

Este material presenta una conductividad térmica intrínsecamente baja ($\sim 1 \text{ W/mK}$), debido a la presencia de una estructura no homogénea la cual consiste en pequeñas agrupaciones de cristales en una microestructura columnar (conglomerados de cristales) extendidos perpendicularmente desde el sustrato embebida en un material amorfo (carente de cohesividad), ver Figura 1.7.

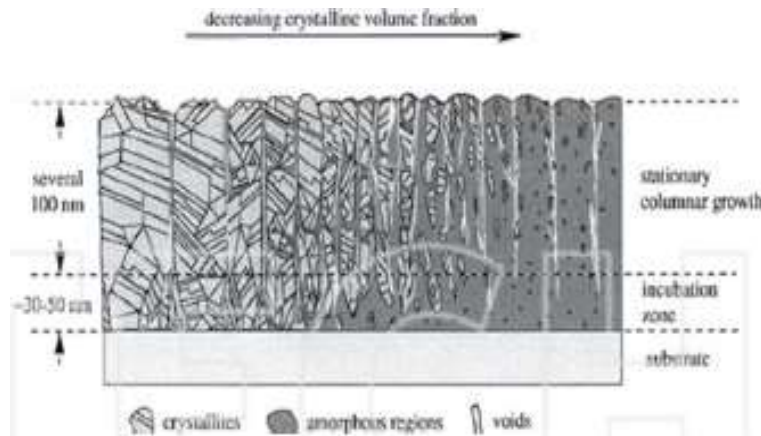


Figura 1.7. Esquema del crecimiento del $\mu\text{c-Si:H}$ en un sustrato. (Fuente: [11, p. 187])

Durante la deposición el hidrógeno es contenido en micro vacíos presentes en la fase amorfa y en los límites de grano fomentando la dispersión de fonones y la formación de una gran cantidad de enlaces Si-H dentro de la microestructura, los modos vibratorios absorben parte del calor, reduciendo drásticamente la conductividad térmica [1].

Las obleas de semiconductor (tipo N y P) analizadas presentan unas dimensiones de $20 \times 10 \text{ mm}$ y $30 \times 10 \text{ mm}$, con un espesor de $201 \mu\text{m}$, de los cuales $200 \mu\text{m}$ son de sustrato y $1 \mu\text{m}$ representa la deposición del semiconductor, ver Figura 1.8.

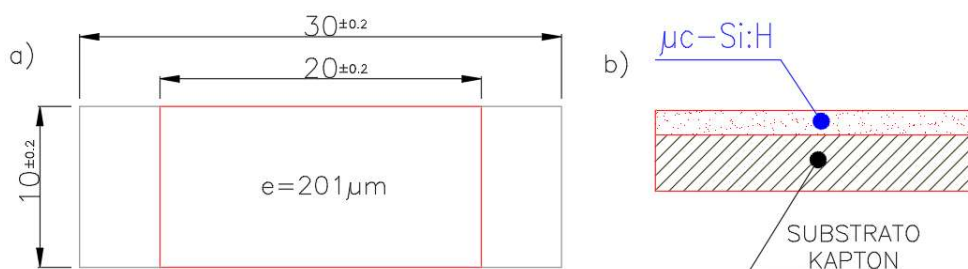


Figura 1.8. a) Dimensiones de las probetas, b) Espesor del material.

Lo que se busca con la experimentación de los semiconductores $\mu\text{c-Si:H}$ depositados en películas finas flexibles de kapton es obtener un mejoramiento en el factor de potencia (PF) a través de la variación de la concentración de cargas, en la Figura 1.9. se puede apreciar la variación en la fracción de volumen de cristales (%) y su tamaño en función de las diferentes temperaturas de recocido para una probeta de $\mu\text{c-Si:H}$ depositado en cristal. [1]

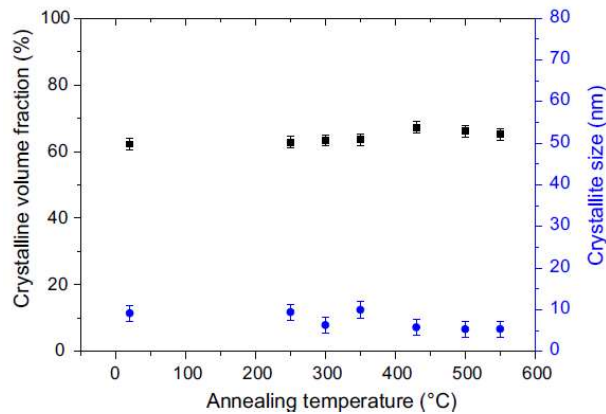


Figura 1.9. Fracción de volumen de cristales (%) y su tamaño vs temperatura de recocido. (Fuente: [1])

1.3.2. Propiedades mecánicas

En esta sección se presentan las propiedades mecánicas del material analizado.

1.3.2.1. Propiedades mecánicas del silicio microcristalino

Para el silicio cristalino las propiedades mecánicas varían en función de la estructura cristalina, sin embargo, en el caso de $\mu\text{-Si}$: H su resistencia no es consistente por la presencia de regiones cuya estructura es amorfa con enlaces silicio – hidrógeno, en trabajo previos se puede encontrar las propiedades mecánicas de materiales similares, tal como se indica en la Tabla I.1. del anexo I:

1.3.2.2. Propiedades del Kapton

La poliamida más conocida comercialmente como Kapton, es el material que contiene excelentes propiedades mecánicas y térmicas. En la Tabla I.2. del anexo I se detalla sus propiedades mecánicas ensayadas por la norma ASTM D-882.

1.3.3. Composición química

La composición química del material está representada en la Tabla I.3. del anexo I.

1.4. Tipos de semiconductores

Según su pureza se clasifican en: semiconductores intrínsecos y extrínsecos

1.4.1. Semiconductores intrínsecos

Un semiconductor es intrínseco cuando se encuentra en estado puro (no posee impurezas ni átomos de otro tipo de estructura), por lo que poseen una conductividad eléctrica

controlable y, al combinarlos adecuadamente, pueden actuar como dispositivos de almacenamiento, amplificadores o interruptores. Ejemplo: Si y Ge puros [12].

Como se puede observar en la Figura 1.10., los átomos de silicio (que sólo tienen cuatro electrones en la última órbita o banda de valencia), se unen creando enlaces covalentes para completar ocho electrones y obtener un semiconductor de cuerpo sólido; por lo cual el cristal de silicio bajo estas condiciones se comportará como si fuera un aislante [12], [13].

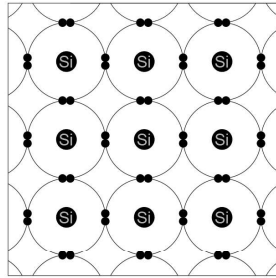


Figura 1.10. Estructura cristalina de un semiconductor intrínseco, compuesta solamente por átomos.

1.4.2. Semiconductores extrínsecos

Un semiconductor extrínseco es un semiconductor intrínseco al cual se le llegó a alterar agregando sustancias dopantes con el fin de permitir el paso de la corriente eléctrica por su cuerpo en una sola dirección [13]. El proceso de dopaje consiste en mezclar a los átomos de Silicio o de Germanio, átomos en muy pequeñas proporciones de otros elementos o impurezas, que por lo general son elementos semiconductores que, en lugar de cuatro electrones, estos tienen tres electrones en su última órbita como el Al, Ga, B, In, o cinco electrones en su última órbita como es el caso del Sb, As, P. Según el tipo de impureza, estos se clasifican en dos tipos: Semiconductores de tipo N y semiconductores de tipo P [12], [13].

1.4.2.1. Semiconductores de tipo N

Se conoce que un semiconductor es de tipo N o negativo cuando se le agrega pequeñas cantidades de elementos semiconductores del grupo V (A/13) como el Antimonio (Sb), el arsénico (As) y fósforo (P) en donde estas impurezas se comportan como donadoras de electrones o portadores negativos; y se permite el paso de la corriente eléctrica debido al exceso de electrones libres existentes dentro de la estructura cristalina del material semiconductor [12], [13].

1.4.2.2. Semiconductores de tipo P

En este tipo de semiconductor se agregan elementos dopantes del grupo III (A/13) tales como el galio (Ga) o indio (In) que presentan un electrón menos en su capa de valencia,

por lo que se comportan como aceptores o captadores de electrones, ya que, al unirse con el silicio o germanio, quedará un hueco o agujero, debido a que faltará un electrón en cada uno de sus átomos para completar los ocho en su última órbita. Es la razón por lo que el semiconductor extrínseco de tipo P o positivo adquiere propiedades conductoras [12], [13]. En la Figura 1.11. se representa la estructura cristalina de un semiconductor tipo-*n* (a) y tipo-*p* (b).

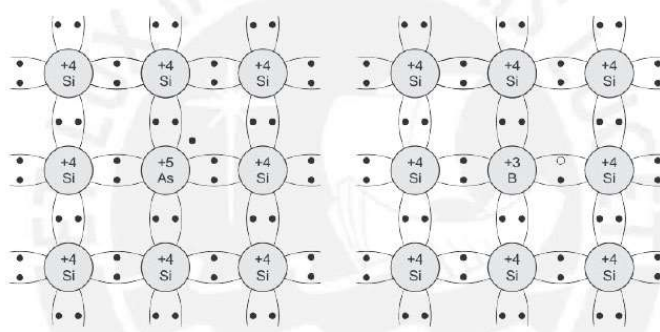


Figura 1.11. Representación bidimensional de un semiconductor tipo-*n* (a) y tipo-*p* (b).
(Fuente: [14])

1.5. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad física que no depende de la forma o el tamaño del material, se designa por la letra (ρ), y su unidad en el sistema internacional es el $\Omega \cdot m$. [15], esta propiedad me determina el comportamiento del material al paso de la corriente eléctrica, y de acuerdo con el valor del transporte de corriente eléctrica existen tres tipos: conductor, semiconductor y aislante [14]. Se puede determinar si un material es conductor, semiconductor o aislante en función de la circulación de los electrones en el interior del material; entre menor sea su número de valencia, es más fácil que este se desprenda de su órbita por lo que requiere menor energía, por ende estos materiales serán mejores conductores ya que tiene la tendencia de ceder este electrón fácilmente; caso contrario pasa con los aislantes ya que sus electrones son muy fuertemente atraídos por el núcleo y por tanto no poseen movilidad. [14]

Por otro lado, la resistividad eléctrica superficial es una propiedad intrínseca del material que permite determinar el comportamiento al paso de una corriente eléctrica respecto a la superficie en películas delgadas o impedancias demasiado pequeñas las cuales no es posible determinarlas de la manera convencional [16]. Su unidad física es $[\Omega m]$, pero generalmente se toma sus unidades $[\Omega/square]$, esta consideración se debe a los sus diferentes métodos de medirla [17].

Considerando un material isotrópico y homogéneo la resistividad superficial longitudinal vertical serán las mismas, ver Figura 1.12.

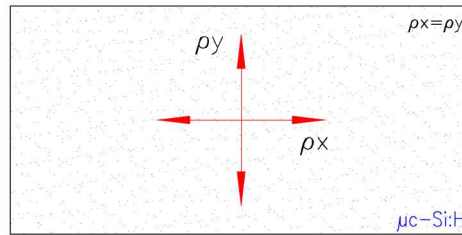


Figura 1.12. Material isotrópico.

1.6. Efecto Hall

El efecto Hall estudia dos parámetros importantes en la caracterización eléctrica de los materiales, el voltaje de Hall y la movilidad de hall.

1.6.1. El voltaje de Hall

El voltaje Hall (V_H) es producido al aplicar una corriente constante y un campo magnético constante perpendicular a la superficie de la oblea, tal como se muestra en la Figura 1.13.

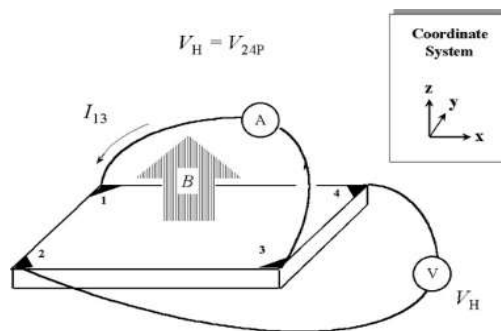


Figura 1.13. Esquema de la configuración usada en la determinación del voltaje de Hall.
(Fuente: [18])

1.6.2. Movilidad de Hall

La movilidad de Hall es producida al forzar un flujo de corriente I en las esquinas 1 y 3 y aplicar un campo magnético B perpendicular a la superficie del material produciéndose un potencial eléctrico en las esquinas 2 y 4, en otras palabras, la movilidad de cargas desde 1 a 3 debido a la corriente I es discontinuada por un campo magnético B produciendo una fuerza electromotriz que propaga algunas cargas hacia las esquinas 2 y 4. [18]

1.7. Técnica de Van Der Pauw (TVDP)

Esta técnica permite medir la resistividad eléctrica superficial y el efecto Hall de muestras delgadas de material anisotrópico cuyo perfil o contorno es arbitrario, es ampliamente aplicado en la industria de semiconductores con volumen uniforme. Su proceder consiste en situar cuatro contactos eléctricos sobre el contorno de la muestra plana de perfil arbitrario como se muestra en la Figura 1.14. [19]

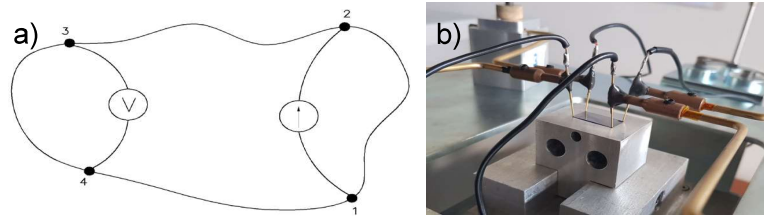


Figura 1.14. a) Esquema de la TVDP (Fuente: [19]), b) Aplicación de la TVDP en TED.

Por el contacto 1 se inyecta una corriente (generalmente entre: $1 - 10 \text{ mA}$) y por el contacto 2 se extrae la corriente ingresada, paralelamente se mide la tensión entre los puntos 3 y 4 (magnitud del orden de los mV) definiendo de esta manera una resistencia $R_{12,34}$ (componente horizontal), como resultado de la diferencia de voltaje $V_4 - V_3$ por unidad de corriente que circula a través de los contactos 1 y 2. [18] De similar manera se obtiene la resistencia $R_{23,41}$ (componente vertical) que define de manera unívoca la resistencia correspondiente al material de forma y tamaño definido.

Generalmente, los materiales evaluados mediante la técnica de Van Der Pauw son semiconductores extrínsecos (Tipo N o P) anisotrópicos homogéneos, por lo que su resistividad superficial puede ser cuantificada numéricamente con la ecuación 1.9. [19]

$$\exp\left[\frac{-\pi d R_{12,34}}{(\rho_x \rho_y)^{1/2}}\right] + \exp\left[\frac{-\pi d R_{23,41}}{(\rho_x \rho_y)^{1/2}}\right] = 1 \quad (1.9.)$$

Donde:

d : Es el espesor del conductor de la muestra [μm]

$R_{12,34}, R_{23,41}$: Resistencia longitudinal y vertical de la muestra, respectivamente [Ω]

ρ_x, ρ_y : Resistividad longitudinal y vertical de la muestra, respectivamente [$\Omega \cdot \text{m}$]

En la Figura 1.5. se muestra el procedimiento a seguir para realizar la TVDP.

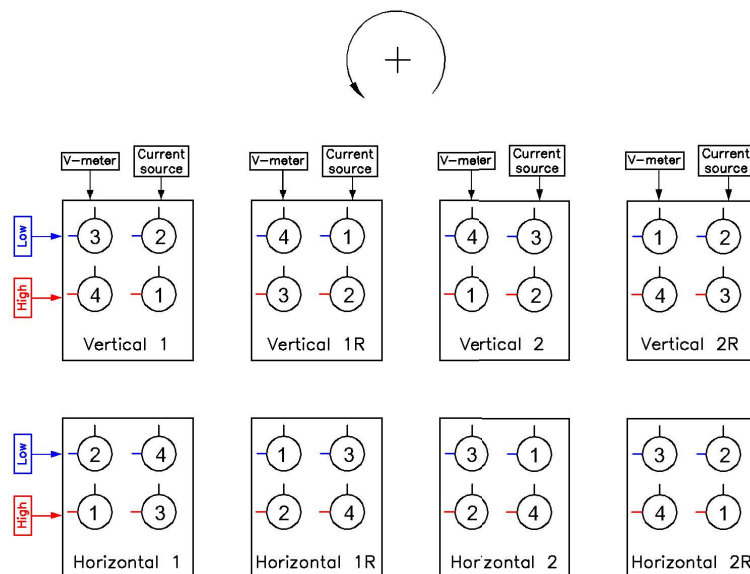


Figura 1.15. Esquema del procedimiento para la TVDP.

Cada borne representa un contacto eléctrico posicionado, cada posición de los bornes representa un dato, es decir, se obtiene 8 medidas de resistencia, las posiciones varían en sentido antihorario y el cambio de contacto únicamente se realiza en los equipos (fuente y el voltímetro).

Es imperativo verificar que exista contacto óhmico entre los contactos eléctricos y la superficie de la muestra, también es necesario establecer un compliance voltage adecuada de tal manera que el potencial eléctrico generado por la fuente sea el suficiente para abastecer la demanda de la corriente, para el caso se establece $1mA$, en la fuente y se varía el compliance voltage hasta obtener lecturas adecuadas de salida de corriente.

Las resistencias $R_{12,34}(R_{Horizontal})$ y $R_{23,41}(R_{vertical})$ son obtenidas a partir de la media de sus homólogas. Ver ecuación 1.10. [20]

$$R_{vertical} = \frac{R_{1243} + R_{2134} + R_{4312} + R_{3421}}{4} ; R_{horizontal} = \frac{R_{1423} + R_{4132} + R_{2314} + R_{3241}}{4} \quad (1.10.)$$

1.7.1.1. Geometría de la muestra

Teóricamente es posible realizar mediciones a cualquier geometría de muestra, pero es preferible fabricar muestras con geometrías adecuadas de modo que los errores se minimizan [18], las geometrías que presentan una mejora exactitud se presentan en la Figura 1.16.

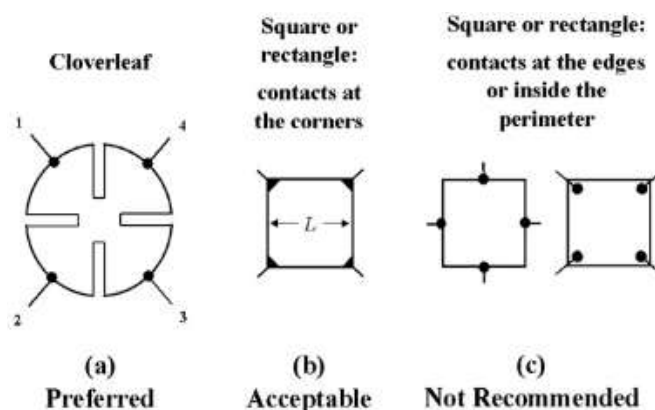


Figura 1.16. Geometrías de las muestras para mediciones de MVDP y efecto Hall. (Fuente: [18])

El diseño de Closeleaf presenta el error más pequeño debido a su reducido tamaño de contacto efectivo. El diámetro promedio (D) del contacto y el espesor de la muestra (d) deben ser mucho más pequeños que la distancia de separación entre contactos (L). [18]

1.7.2. Resistencia de un dispositivo bajo medición

La resistencia medida por los procesos anteriores no representa únicamente al material, sino que es la suma de varias resistencias en serie, la suma total de dichas resistencias es conocida como la resistencia de un dispositivo bajo medición (Device Under Test: en inglés DUT) [21], ver Figura 1.17.

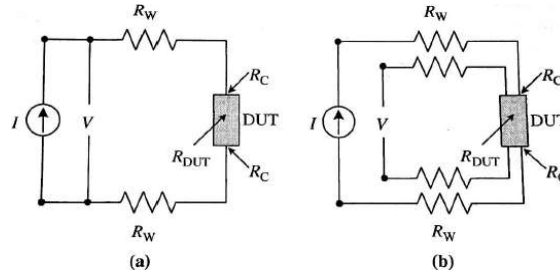


Figura 1.17. Arreglo para medir resistencia por 2 puntas (a) y cuatro puntas (b).
(Fuente: [21])

Adicional, la resistencia de un dispositivo bajo medida puede ser cuantificada de la ecuación 1.11. [21]

$$R_{Total} = \frac{V}{I} = 2R_w + 2R_C + R_{DUT} \quad (1.11.)$$

Donde:

R_w : Resistencia de los cables o puntas [Ω]

R_C : Resistencia de los contactos [Ω]

R_{DUT} : Resistencia del dispositivo bajo medición [Ω]

Las resistencias R_w y R_C son prácticamente despreciadas dado que son eliminados por su pareja, es de suma importante que los cables usados sean de la misma resma y que además sus tamaños y uniones sean hechas exactamente iguales para evitar impedancias desiguales sin la total cancelación.

1.7.3. Contacto Metal – semiconductor

La unión de los terminales metálicos de salida de un dispositivo electrónico al semiconductor es sustancialmente importante en la caracterización eléctrica de los materiales semiconductores. En la unión metal – semiconductor se forma una barrera de potencial en la interfaz, esta barrera es la responsable del control de la corriente y la capacitancia del contacto y es esto lo que define si un contacto es óhmico o rectificante [22], ver Figura 1.18.

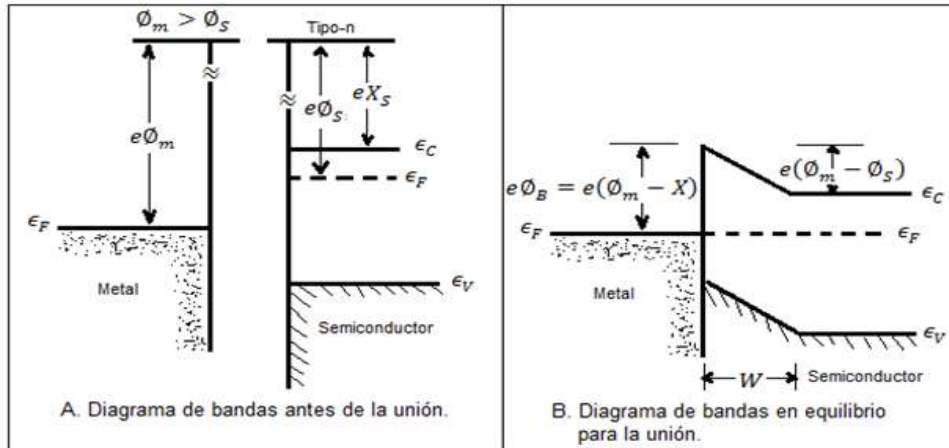


Figura 1.18. Diagrama de bandas para un contacto metal – semiconductor.
(Fuente: [22])

En la Figura 1.18. se observa el antes y el después de una unión metal – semiconductor, en la parte de la Figura 1.18.a) se tiene una ligera diferencia en la energía de Fermi (E_F , es el valor más alto de energía ocupado por los electrones en el pozo de potencial que simula el movimiento del electrón en la red cristalina a 0 K) entre ambos materiales, donde la E_F del semiconductor es mayor dado el tipo de dopaje N que presenta, $e\phi_m$ es la función de trabajo del metal, que representa la diferencia entre la E_0 (energía del nivel de referencia, energía de un electrón libre en el vacío) y la energía de Fermi, lo mismo ocurre en el semiconductor pero en este caso es llamado función de concentración de impurezas en el semiconductor $e\phi_s$, E_V y E_C es la banda de valencia y banda de conducción respectivamente, $e\chi_s$ es un constante de material y es conocida como la afinidad electrónica manifiesta la diferencia entre el nivel vacío y la banda de conducción.

Al realizarse la unión entre ambos materiales la energía de fermi se unifica, pero debido a la brecha que existe en la banda prohibida se produce una barrera de potencial cuya altura ($e\phi_B$) se exhibe como la diferencia entre la función de trabajo del metal ($e\phi_m$) y la afinidad del semiconductor $e\chi_s$, esta barrera es función directa de la diferencia de potenciales del metal y del semiconductor, por tanto si $\phi_m \leq \phi_s$, dicha barrera puede hacerse cero o incluso negativo de tal manera que corriente encuentra muy baja resistencia o incluso nula, a tal contacto ideal se lo conoce como *contacto óhmico* (ver Figura 1.18.b)), cuando $\phi_m > \phi_s$ (Figura 1.18.a)) se forma una barrera de potencial, esta barrera impide el flujo de corriente, incluso para valores minúsculos produciendo de esta manera una caída de voltaje sustancial relativo a una gran resistencia comúnmente llamado *contacto Schottky* o contacto rectificante. Ver Figura 1.19. [22]



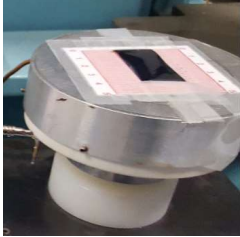


Figura 1.19. Curvas características V vs I de contacto metal – semiconductor.
(Fuente: [22])

El contacto óhmico exhibe una implícita linealidad en su curva V vs I para corrientes entrantes positivas y negativa con eje colineal similar a una resistencia eléctrica, por otro lado, en un contacto Schottky la curva V vs I es similar a la curva que presenta una unión P – N polarizada en directa. [22]

1.7.4. Equipos requeridos para TVPD

En la Tabla 1.2. se enlista los equipos requeridos para el procedimiento de Van Der Pauw.

Tabla 1.2. Equipos necesarios para TVD.

Equipo	Descripción	Esquema
Imán permanente o electroimán	500 a 5000 gauss (usado únicamente en el efecto Hall)	
Fuente de corriente constante	Rango de corriente (1nA a 100 mA), resolución min 1nA – Keithley 6221 DC and AC CURRENT SOURCE	
Voltímetro de alta impedancia de entrada	Rango (1µV a 1V) – Keithley 2700 MULTIMETER / DATA ACQUISITION SYSTEM	

Controlador de temperatura de la muestra	Resolución de 0.1°C para trabajos de gran exactitud – PROGRAMME CONTROLLER PR 5 – 3T (5 Stages – 3 Programmes)	
<p>Nota.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La fuente de corriente y voltímetro enunciados anteriormente pueden ser reemplazados por una KEITHLEY 2400 SourceMeter^R - El controlador de temperatura tiene que ser complementado con calentadores y sensor de temperatura (termopar, RTD, pt100, etc.) 		

(Fuente: [20])

1.8. Distribución de los puntos en la superficie de prueba

Para realizar la prueba del gradiente de temperatura superficial para cada radio de curvatura se tomará en cuenta el siguiente arreglo, en la Figura 1.20.a se puede apreciar los puntos en donde se va a tomar la medida de temperatura respecto al plano, a medida que el radio de curvatura aumente se también variara los puntos de medición ver a la Figura 1.20.b

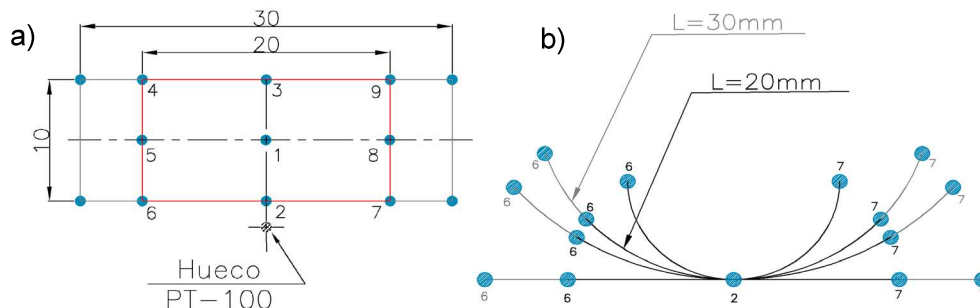


Figura 1.20. Distribución de puntos: a) superficie plana, b) superficie curva.

Dado que la superficie de estudio es relativamente pequeña se va a considerar las esquinas y los puntos medios de cada arista para evaluar el gradiente de temperatura superficial. Cabe mencionar que el máximo gradiente de temperatura establecido en la superficie es de 1.25°C, los tamaños de las muestras sometidas al análisis son: 30x10(±0.2) [mm] y 20x10(±0.2) [mm].

1.9. Estados de doblado del material

El material MSTPD será sometido a un estado de carga radial con el fin de deformarlo a una superficie cuya curvatura sea conocida, los estados de doblado se presentan en la Figura 1.21.

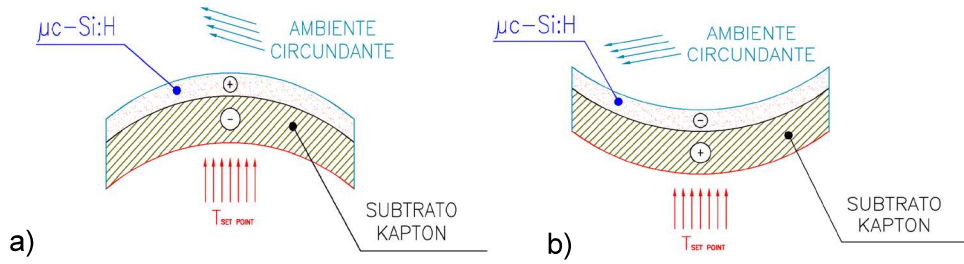


Figura 1.21. a) Estado de doblado Cónvaco hacia abajo MSTSPD, b) Estado de prueba cónvaco hacia arriba MSTSPD.

1.9.1. Flexión de la película

La película será sometida a sollicitaciones de flexión con estados de carga de tracción o compresión sobre el semiconductor, ver Figura 1.22. Los esfuerzos dentro de la probeta vienen dados por la ecuación 1.12. [23]

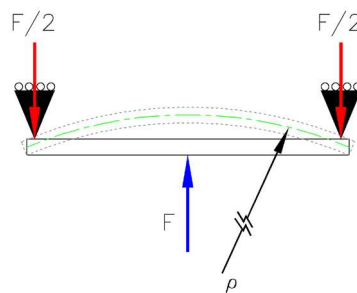


Figura 1.22. Flexión de la probeta cónvaca hacia abajo.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \quad (1.12.)$$

Donde:

M : Momento flector [$N.m$]

c : Distancia máxima desde el eje neutro [m]

I_{zz} : Momento de inercia o segundo momento de la sección transversal [m^4], dado por la ecuación 1.13. [23]

$$I_{zz} = \frac{at^3}{12} \quad (1.13.)$$

Donde:

t : Espesor de la probeta [m]

a : ancho de la probeta, ver Figura 1.8. [m]

1.9.2. Transferencia de calor por conducción

Existen transferencia de calor por conducción entre los componentes de la misma máquina, la muestra y el ambiente circundante. Ver ecuación 1.14. [24]

$$q_{cond} = -k \frac{dT}{dx} = \frac{k}{L} (T_f - T_i) \quad (1.14.)$$

Donde:

q_{cond} : Transferencia de calor por conducción $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

k : Conductividad térmica $\left[\frac{W}{mK}\right]$

L : Distancia de transferencia de calor $[m]$

T_f, T_i : Temperatura final e inicial respectivamente $[K]$

El signo menor (-) representa la dirección de la transferencia de calor del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura.

1.9.3. Transferencia de calor por convección

Existen transferencia de calor por convección entre los componentes de la máquina y el ambiente circundante. Ver ecuación 1.15. [24]

$$q_{conv} = h(T_h - T_{amb}) \quad (1.15.)$$

Donde:

q_{conv} : Transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

h : Coeficiente de película $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

T_h, T_{amb} : Temperatura del cuerpo y ambiente respectivamente $[K]$

1.9.4. Transferencia de calor por radiación

Existen transferencia de calor por radiación entre los componentes de la máquina y el ambiente circundante. Ver ecuación 1.16. [24]

$$q_{rad} = \epsilon\sigma(T_h^4 - T_{amb}^4) \quad (1.16.)$$

Donde:

q_{rad} : Transferencia de calor por radiación $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

σ : Coeficiente de Stefan – Boltzmann $5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2K^4}\right]$

T_h, T_{amb} : Temperatura del cuerpo y ambiente respectivamente $[K]$

1.10. Máquinas disponibles en el mercado

En la Tabla 1.3. se presenta los equipos similares o con prestaciones parecidas a lo que se intenta lograr en el presente trabajo.

Tabla 1.3. Ejemplos de máquinas disponibles en el mercado.

FormFactor / Cascade Microtech	Wentworth Labs
	
<p>Figura 1.23. Estación de caracterización de obleas circuitos y semiconductores FormFactor / Cascade Microtech</p>	<p>Figura 1.24. Estación de caracterización de obleas circuitos y semiconductores Wentworth Labs.</p>
<p>Nota: Estación perteneciente a la Universidad San Francisco de Quito (USFQ). Se considera de referencia por su relativa cercanía.</p>	<p>Nota: Estación perteneciente a la Universidad de Harriot-Watt en Edimburgo (foto proporcionada por el Ing. Edwin Acosta).</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Marca especialista en equipos de caracterización de semiconductores y circuitos impresos (especialmente nanoelectrónica). - Resolución del microscopio 0.25 μm (0.01mils). - Superficie de prueba (sistema del plato) 3GDL, en X, en Y y en Z. - Separación repetible 2 μm (0.08mils), ajuste vertical máximo 40 mm. - Reloj palpador en la superficie de deslizamiento de los micro posicionadores. - Micro posicionadores con 3GDL (controlados), con movimientos micrométricos y magnetización en su base. - Separación repetible de los micro posicionadores 1 μm, ajuste vertical 15 mm - Planeidad de la superficie 6 μm. - Error de 1%, en impedancia disimiles. - Aislación eléctrica 2 GΩ. - Dispositivo de caracterización mmW (onda milimétrica), ancho de banda de hasta 70 GHz. [25] 	<ul style="list-style-type: none"> - Resolución del microscopio 0.4 μm (0.016mils). - Superficie de prueba (sistema del plato) 3GDL, en X, en Y y en Z. - Separación repetible 200 μm (8 mils), ajuste vertical máximo 35 mm. - Reloj palpador en la superficie de deslizamiento de los micro posicionadores. - Micro posicionadores con 3GDL (controlados), con movimientos micrométricos y magnetización en su base. - Separación repetible de los micro posicionadores 2 μm, ajuste vertical 15 mm. - Planeidad de la superficie 12 μm. - Error de 1%, en impedancia disimiles. - Aislación eléctrica 2 GΩ. - No presenta sensores de posición ni control de ruido. - Necesita la ayuda de equipos externos: una fuente de corriente y un voltímetro de alta precisión, y dependiendo de los que se vaya a medir diferentes equipos adicionales. - Carrera de su sistema de plato x=40 mm, y=50 cm. - Calibre de cable AWG 16 (con aislamiento del ruido externo). [26]
<p>Observación: Ambos equipos no poseen un sistema de calentamiento ni control de temperatura, tampoco posee un sistema de doblado de probetas, pero es posible incorporarlos.</p>	

Son máquinas y equipos sumamente sofisticados, complejos y muy costosos; en los mercados extranjeros se conocen como estaciones de sondeo y caracterización de obleas de semiconductores y circuitos impresos (ECOEE), y en general vienen incorporados diferentes equipos y accesorios como: microscopios, micro posicionadores, mesa de microscopio, electroimanes, equipos térmicos, equipos de caracterización de semiconductores, reloj palpador, etc.

1.10.3. Sistemas de acople similares

En trabajos previos ya se han realizado esta clase de estudios a semiconductores flexibles tipo TFTs sometidos a deformaciones sin control de la temperatura de la probeta, en los cuales se ha realizados sistemas y herramientas que se pueda acoplar a las estaciones de caracterización existentes [3], ver Figura 1.25.

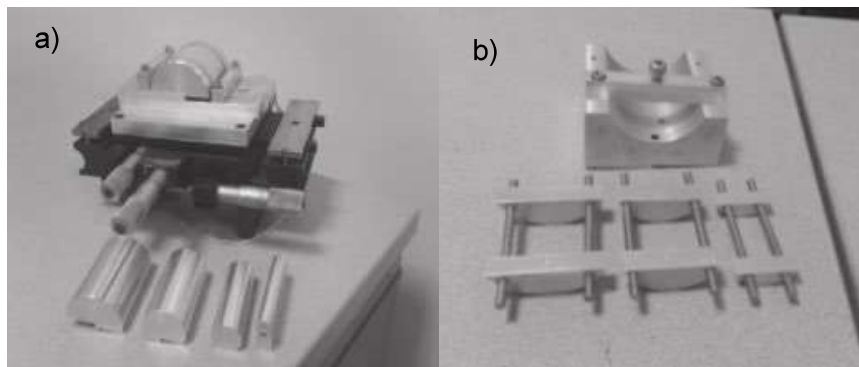


Figura 1.25. Sistema doblador de probetas para acoplar a estación de caracterización.
(Fuente: ([3])

El presente sistema cuenta con 5 cilindros, con radios de curvatura que van desde 0.5 a 2.5 cm para una longitud de la probeta de 10cm, permite doblar a la probeta tanto en forma cóncava y convexa, ver Figura 1.25.a) y Figura 1.25.b) [3]

1.11. Elementos mecánicos que conforman una ECOEE

Anteriormente se analizaron algunos equipos y accesorios para la caracterización de obleas que aportaran información útil al diseñar de la máquina, en esta sección se analizara los elementos mecánicos que comúnmente conforman una ECOEE.

En la Figura 1.26. se muestra un modelo 3-D de una ECOEE con sus mecanismos visibles, en la parte A se puede observar una guía deslizante de cola de milano, en la parte B se observa una guía deslizante lineal en 2 sentidos (X, Y), en la parte C se puede observar un tornillo de potencia, en la parte D se puede observar un sistema magnético. Estos sistemas no solo están presentes en estas partes sino existe pares cinemáticos iguales en todo la ECOEE.

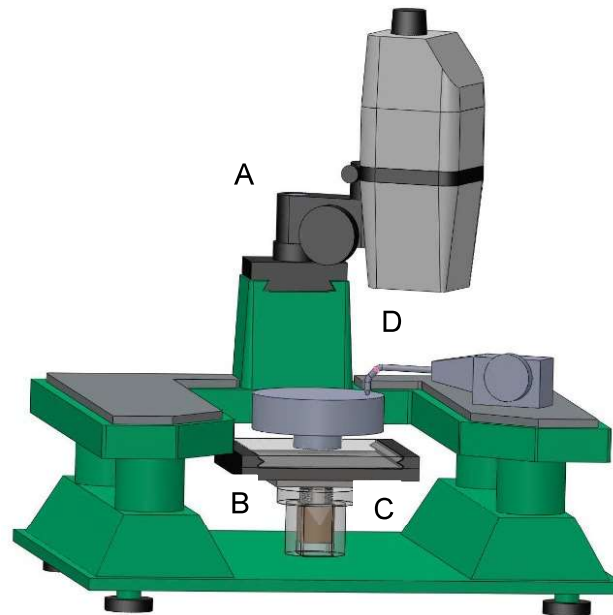


Figura 1.26. Elementos mecánicos de ECOEE

1.11.1. Guía de cola de Milano

Generalmente se usan en sistemas de accionamiento manual o un tornillo deslizante, presenta un movimiento relativo coaxial en ambas direcciones y son usualmente utilizados en mecanismos que requieren de alta rigidez y precisión. En la Figura 1.26. dicho par cinemático es usado en la guía del microscopio. Ver Figura 1.27.



Figura 1.27. Guía de cola de Milano de ECOEE
(Fuente: [27])

1.11.2. Guía de bolas lineales

Una guía deslizante lineal se usa en pares cinemáticos de movimiento relativos paralelos tanto en orientación vertical y horizontal. Ver Figura 1.28.

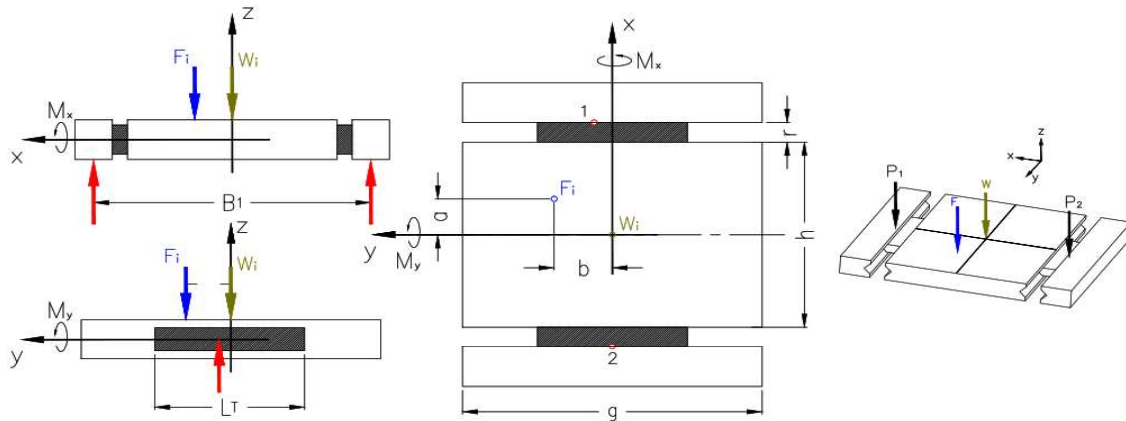


Figura 1.28. Guía deslizante lineal.

1.11.2.1. Fuerzas resultantes

La fuerza F_1 es resultado del peso ejercido por los elementos superiores tal como se muestra en la Figura 1.28., no está ubicada en el centro de masa de la plataforma por lo que provoca momentos M_x y M_y , por otro lado, la plataforma también es móvil por lo que su centro de masa unificado también causaría un momento en una posición de no equilibrio. Las fuerzas de apoyo P_1 y P_2 son resultado de una carga distribuida a lo largo L_T . En la ecuación 1.17 se presenta la fuerza sobre una corredera: combinada (h) y resultante (i). [28]

$$h) F_{comb} = |F_y| + |F_z| + \left(\left| \frac{2000M_x}{B_1} \right| + \left| \frac{6000M_y}{L_T} \right| + \left| \frac{6000M_z}{L_T} \right| \right) ; i) F_{res} = F_{comb} + F_{pr} \quad (1.17.)$$

Donde:

F_{comb} : Fuerza combinada [N]

L_T, B_1 : Longitud y ancho de las correderas respectivamente [mm]

M_x, M_y y M_z : Momentos en X, Y y Z respectivamente [Nm]

$F_{pr} = 0.2 * C_{eff slide}$: Fuerza de precarga en dimensionamiento estático [N]

$C_{eff slide}$: Capacidad de carga dinámica [N]

1.11.2.2. Capacidad de carga estática

Son los valores de tensión que producen una deformación permanente total del elemento rodante y de las pistas, del orden de 0,0001 del diámetro del elemento rodante. [29]

1.11.2.3. Capacidad de carga dinámica

Es la carga que puede soportar una corredera lineal en el 90% de los casos para una duración de vida de 100.000 metros de recorrido, antes de que aparezcan los primeros síntomas de fatiga del material [29]. Ya que máquina no soporta grandes cargas, tiene un espacio limitado pequeño, y la longitud del riel es relativamente pequeña; se llega a asumir

que la capacidad de carga estática y capacidad de carga dinámica son similares a la corredera LWRB2 (ver Anexo IV: Tabla IV.4 y Tabla IV.5). Por lo tanto, se intuye que el C_{11} es de 525 [N] y $C_{0,11}$ es de 650 [N].

1.11.2.4. Capacidad de carga efectiva

Para determinar el factor de seguridad y la vida útil de la corredera, se calcula la capacidad de carga estática y dinámica efectiva por medio de la ecuación 1.18.j y la ecuación 1.18.k respectivamente. [28]

$$j) C_{0,eff\ slide} = f_{h0} \times f_t \times C_{0,11} \times \frac{z \times 2}{10 \times f_1} ; k) C_{eff\ slide} = f_h \times f_t \times C_{11} \times \left(\frac{z \times 2}{10 \times f_1} \right)^w \quad (1.18.)$$

Donde:

$C_{0,eff\ slide}$, $C_{eff\ slide}$: Capacidad de carga estática y dinámica efectiva de una corredera [N]

$C_{0,11}$, C_{11} : Capacidad de carga estática y dinámica básica de una corredera [N].

f_{h0} : Factor de dureza estática; $f_{h0} = 1$ (Anexo IV. Figura IV.3.)

f_t : Factor para la temperatura de operación; $f_t = 0.75$ (Anexo IV. Figura IV.4.)

f_1 : Factor para la dirección de la carga; arreglo flotante $f_1 = 1$ (Anexo IV. Figura IV.2.)

z : Número de elementos rodantes por jaula

f_h : Factor de dureza dinámica; $f_h = 1$ (Anexo IV. Figura IV.3.)

w : Exponente del elemento rodante; $w = 0,7$ para las bolas y $w = 7/9$ para los rodillos

$$C_{0,eff\ slide} = 1072,5 [N] ; C_{eff\ slide} = 683,78 [N]$$

1.11.2.5. Carga dinámica equivalente

Es la carga para el dimensionamiento dinámico donde se considera el factor para la longitud de carrera f_s . Ver ecuación 1.19. [28]

$$P = f_s \times F_{res} \quad (1.19.)$$

Donde:

f_s : Factor para la longitud de carrera; $f_s = 1$ (Anexo IV. Figura IV.5.)

F_{res} : Fuerza combinada [N]

P : Carga dinámica equivalente

La carga máxima de resultante se determina cuando se tiene las máximas cargas de acuerdo con su respectiva carrera máxima.

1.11.2.6. Factor de seguridad estático S_0

El factor de seguridad estático S_0 determina el grado de seguridad contra una deformación permanente excesiva de los elementos rodantes y las pistas de rodadura. Ver ecuación 1.20. [28]

$$s_0 = \frac{C_{0,eff\ slide}}{P_0} = \frac{C_{0,eff\ slide}}{F_{res\ max}} \quad (1.20.)$$

Donde:

s_0 = Factor de seguridad estático

$C_{0,eff\ slide}$ = Capacidad de carga estática efectiva de una corredera [N]

P_0 = Carga estática máxima [N]

$F_{res\ máx}$ = Carga resultante máxima [N]

Se compara que en la Tabla IV.2. del anexo IV, se tiene el factor de seguridad estático en función de las condiciones de operación, por lo que se tiene un factor de seguridad estático de entre uno a dos.

1.11.3. Tornillo de potencia

Son elementos mecánicos usados frecuentemente en la elevación o desplazamiento axial de cargas de gran magnitud, así pues, transforman movimiento rotacional (torque) en movimiento axial o viceversa y su precisión es relativamente elevada en sus movimientos.

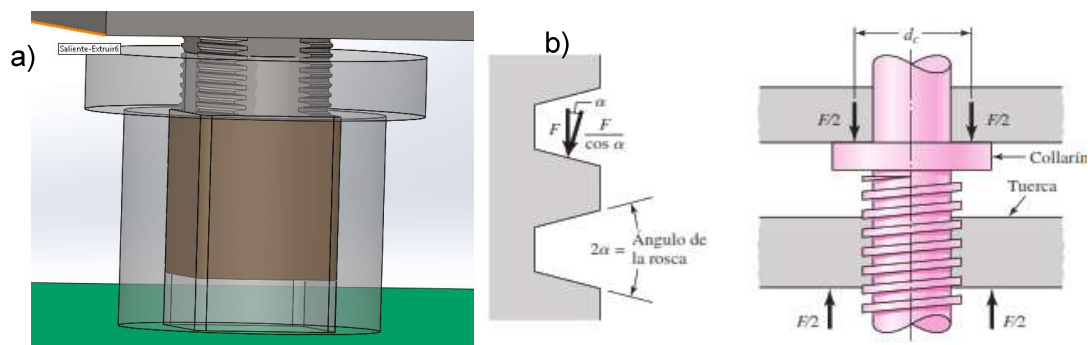


Figura 1.29. a) mecanismo de tornillo de potencia, b) fuerzas presentes en un tornillo de potencia. (Fuente: [30, p. 403])

En la ecuación 1.21. se presenta el torque necesario para la elevación del tornillo de potencia. [30]

$$T_{elevación} = T_R + T_c = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad (1.21.)$$

Donde:

T_R : Torque de elevación [Nm]

F : Fuerza de elevación [N]

d_m : Diámetro medio del tornillo [m]

f : Coeficiente de fricción en la rosca

α : Ángulo de avance [deg]

f_c : Coeficiente de fricción en el collarín

d_c : Diámetro medio del collarín [m]

1.11.4. Uniones soldadas

Una unión soldada es la coalescencia de dos materiales de manera permanente, en el presente proyecto se realizan uniones soldadas en el bastidor, para el trabajo se establece un proceso de suelda GMAW – MAG con el fin de obtener cordones bien formados, en la siguiente tabla se detalla las juntas típicas usadas en la industria. Ver Figura 1.30.

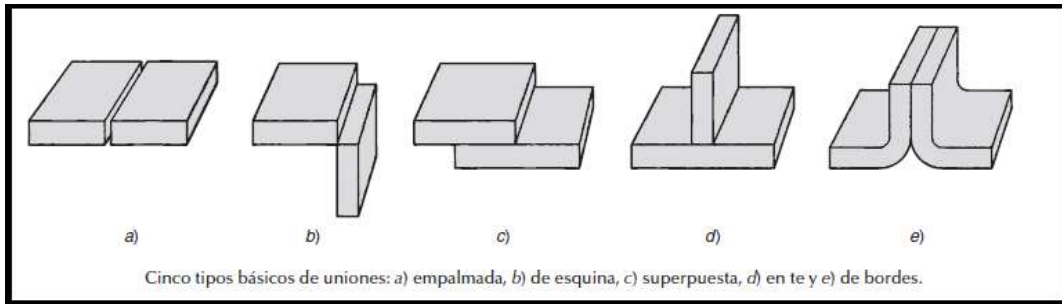


Figura 1.30. Uniones soldadas.
(Fuente: [31])

El bastidor requiere en su mayoría uniones tipo T, aunque, es posible el uso de uniones a traslape y soldaduras sobre contornos específicamente circulares.

1.11.5. Deformación en dos capas

La deformación que presenta la probeta dependerá de su radio de curvatura, sin embargo, es necesario tomar en cuenta en términos mecánicos su extrínseca macroestructura, ya que está constituida por dos materiales: el sustrato de kapton y su deposición PECVD de $\mu\text{c-Si: H}$, este último presenta una capa muy tenue a comparación de su material soporte, su deformación teórica se determinara con la ecuación 1.22. [32]

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{R} \pm \frac{1}{R_0}\right) \left(\frac{d_s + d_f}{2}\right) \left(\frac{1 + \left(2 \cdot \frac{Y_f}{Y_s} \cdot \frac{d_f}{d_s}\right) + \left(\frac{Y_f}{Y_s} \cdot \left(\frac{d_f}{d_s}\right)^2\right)}{\left(1 + \frac{d_f}{d_s}\right) \left(1 + \frac{Y_f}{Y_s} \cdot \frac{d_f}{d_s}\right)}\right) \quad (1.22.)$$

Donde:

d_s = Espesor del sustrato, $d_s = 200 [\mu\text{m}]$; ver Figura 1.8.

d_f = Espesor del SPD, $d_f = 1 [\mu\text{m}]$; ver Figura 1.8.

Y_s = Módulo de Young del sustrato, $Y_s = 2.5 [\text{GPa}]$; ver en la Tabla I.2. del anexo I

Y_f = Módulo de Young del SPD, $Y_f = 160 [\text{GPa}]$; ven la Tabla I.1. del anexo I

R= Radio de curvatura [mm]

R_0 =Radio de curvatura inicial (infinito en este caso dado que parte desde el plano).

2. METODOLOGÍA

2.1. Diagrama de flujo

El siguiente diagrama de flujo presenta todo el flujo de eventos que ocurren en el funcionamiento cotidiano de la máquina, incluido los flujos de materia y energía si fuese el caso, se lo realiza con el fin de analizar brevemente el proceso de inicio con fin que cumple la máquina. Ver Figura 2.1.

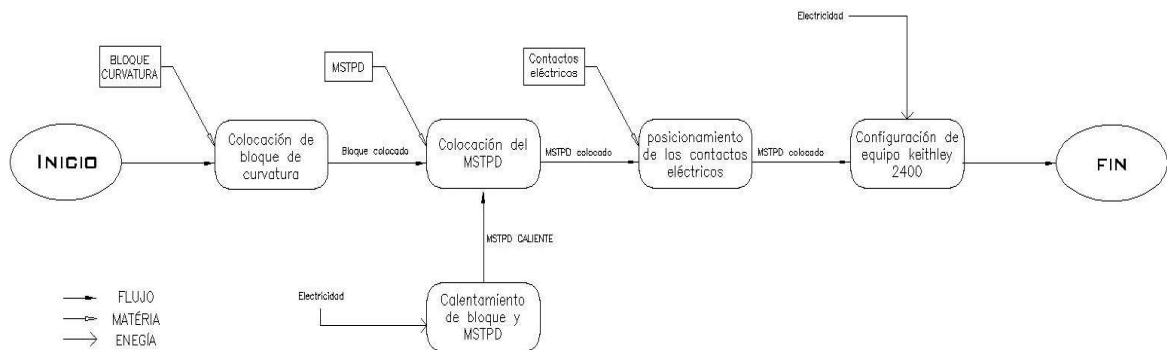


Figura 2.1. Diagrama de flujo.

2.2. Casa de la calidad

Las Casa de la calidad es una herramienta del QFD (Quality function deployment) desarrollada para asegurar una eficaz interpretación de las necesidades y deseos de lo(s) usuarios(s) en la definición del producto y a su vez traducirlo a características técnicas viables [33].

Para desarrollar la casa de la calidad es necesario conocer en un principio los requerimientos y/o deseos del usuario (voz del usuarios), dichos requerimientos son necesarios priorizarlos según su importancia para luego ser traducidos a características técnicas por medio de criterios técnicos (voz del ingeniero), estos son evaluados para determinar los de mayor importancia, para este proceso es necesario también comparar el potencial producto con productos de la competencia para obtener un juicio más imparcial a la hora de realizar jerarquías de importancias.

2.2.1. Voz del usuario

A partir de la información proporcionada por el usuario se tiene que la máquina debe contar con los siguientes requerimientos:

- Que tenga bajos gradientes de temperatura en la superficie de prueba.
- Alta movilidad.

- Fácil operación.
- Desplazamientos sensibles del bloque.
- Que el posicionamiento del MSTPD y de los contactos eléctricos sean sencillos.
- Que su controlador de temperatura no presente errores mayores al deseado.
- El diseño de la máquina sea compacto y robusto.
- Rango de temperatura de trabajo adecuados.
- Su mantenimiento debe ser fácil.
- Que caliente rápido.
- Presente una zona de medición aislada de ambiente circundante.

2.2.2. Voz del ingeniero

Una vez establecidos los requerimientos del usuario, se traduce a características técnicas de tal manera que por cada requerimiento establecido haya al menos una característica técnica:

- Gradiente máximo permitido en la superficie de prueba.
- Movimiento en los tres ejes: X, Y y Z.
- Error máximo en controlador de temperatura.
- Paso de los desplazamientos del bloque.
- Temperatura de trabajo.
- Tiempo promedio en alcanzar el estado estable.
- Presión aplicada por los contactos eléctricos al MSTPD.
- Tolerancia entre la placa de sujeción del MSTPD y la superficie del bloque de curvatura.
- Impedancia total aproximadamente nula en contactos eléctricos.
- Peso.
- Volumen.

2.2.3. Análisis de resultados

La casa de la calidad presente en la Figura II.1. del anexo II, fue elaborada a partir de la metodología propuesta por el Dr. Carles Riba en su libro de diseño concurrente. Sin embargo, fue necesario realizar cambios y adaptaciones concernientes al presente proyecto.

La primera adaptación que se realizó fue en la columna A, que corresponde al grado de cumplimiento que tiene la propia empresa con respecto a los requerimientos del cliente,

dado que la máquina es el primer modelo desarrollado se puede evaluar con el nivel más bajo de evaluación, es decir uno en todos los requerimientos del usuario. En segundo lugar, para evaluar a la competencia se investigó a fondo las máquinas presentes en el mercado y similares presentes en universidades de Quito. Dado que la investigación de materiales semiconductores en dichas condiciones es muy escasa en el país fue necesario también contar con el criterio de expertos en el tema con experiencia en equipos similares.

2.2.4. Conclusiones de la casa de calidad

La información recopilada de la casa de calidad nos indica los requerimientos que más complacen al usuario, los cuales son analizados a continuación:

- Gradientes máximos de temperatura en la superficie de prueba.
Es necesario mantener un gradiente de temperatura en la superficie de prueba de máximo de 1°C. La temperatura debe ser lo más homogénea posible dentro de la superficie del sustrato del MSTPD, bajo un perfil determinado para evitar lecturas erróneas (el perfil de las probetas y la distribución de puntos se presenta en la Figura 1.20. y Figura 1.21.).
- Error máximo del controlador.
El error máximo en el controlador debe presentar un máximo del 0.5% de la escala completa (dependiendo del tipo y clase del sensor de temperatura incorporado).
- Desplazamientos sensibles del bloque de curvatura.
El bloque debe de tener desplazamientos muy pequeños dado que los contactos eléctricos deben posicionarse de manera muy precisa en las esquinas de MSTPD, en el caso que no sea tratado previamente para mejorar su área de contacto con incrustaciones de oro o pintura de plata.
- Tolerancia entre la placa superior y el bloque de curvatura.
Es de suma importancia que la probeta del semiconductor adapte a la perfección la superficie curva, dado que la presencia de variaciones en la deformación de algunas porciones del material puede causar la introducción de lecturas falsas.

Cabe notar, que una característica técnica que no se trató es la del nivel de sujeción que presenta los posicionadores a la hora de fijarse en el sitio establecido.

Es importante mencionar que las características descritas anteriormente están fuertemente relacionadas con dos aspectos muy importantes de la máquina: la gran precisión que conlleva el proceso de posicionamiento y el calentamiento de la probeta.

Respecto a los compromisos técnicos, existen relaciones inversas principalmente entre los gradientes máximos en la superficie de prueba con respecto a la temperatura de trabajo y la impedancia total del circuito eléctrico, es decir, al aumentar la temperatura de trabajo aumenta el gradiente de temperatura en la superficie, del mismo modo al aumentar los gradientes en la superficie de prueba aumenta la impedancia del circuito, debido a que el material no presenta una resistividad homogénea a lo largo de su superficie.

2.3. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas me permiten determinar explícitamente las características, requerimientos, deseos y prestaciones que debe guiar el diseño de la máquina formuladas a partir de los resultados arrojados por la casa de la calidad. Ver Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.

Empresa cliente: EPN		Producto: Equipo para la medición de propiedades termoelectricas de semiconductores flexibles		Fecha inicial: 15/05/2019 Última revisión: 15/05/2019
Diseñadores: Christian Pillajo Erick de la Cadena				Página 1
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Características
Función		C	R	Calentar muestras de semiconductores flexibles desde: $\geq T_{amb}$; $\leq 250^{\circ}C$.
		C	R	Posicionar contactos eléctricos sobre la superficie del material.
		D	R	Curvar las muestras a radios de curvatura determinados: al menos 15 (7 en compresión, 7 a tensión y en plano).
		C	R	Precisión en la medición (error en estado estable) $< 0,5\% FS$. Establecer una diferencia de temperatura en la superficie de medición de máxima de $1^{\circ}C$.
Fuerza		D	R	Presión máxima de los contactos sobre la superficie de MSTPD 369 kPa (Presión máxima sobre cristal de silicio extrínseco) [34].
Dimensiones		C	D	Dimensiones máximas 50x50x50cm Peso máximo de 25 kg.
Movimiento		D+C	R D	3 GDL en probeta (X,Y,Z), 5 GDL en posicionadores (X,Y,Z,rotZ,rotY), Precisión en movimientos $\pm 0,5mm$ (mínima).
Materiales		D+C	R	Materiales con bajo coeficiente de dilatación, máximo $0.2mm/cm$ a $250^{\circ}C$ (Especialmente en la superficie de contacto con la muestra).
Señales y control		D	R	Control de temperatura PID. Retroalimentación con RTD.
Costes y plazos		D+C	D	Presupuesto para el proyecto relativamente reducido Plazo para la entrega del proyecto 6 meses desde la aprobación del respectivo proyecto de tesis.
Propone: M = marketing, D = diseñador, P = producción, F = Fabricación R/D: R = requerimiento, D = deseo, MR = modificación de requerimientos				

2.4. Análisis funcional

El análisis funcional consiste en el análisis de las tareas o funciones que realiza la máquina como tal agrupadas en forma meticulosa según sea su proceder en una estructura funcional, estas funciones (funciones secundarias) son desglosadas a partir de una función global o nivel cero (función primaria) que representa la tarea principal que desempeña la máquina.

Así pues, una estructura funcional es una representación esquemática del conjunto de tareas que realiza un producto con sus flujos de entradas y salidas, cada tarea es representada como una caja negra de la cual puede entrar energía, señal y material y del mismo modo puede salir energía, señal o materia. Una estructura funcional útil debe ser sintetizada en niveles de subfunciones a partir de la función global que relaciona la totalidad de entradas con el(los) productos finales dados en la Figura III.1. anexo III, dichas subfunciones pueden estar comunicados unos con otros mediante interfase de señal, energía y materia. Un producto o sistema tiene tantos niveles de subfunciones como modo de operación tenga o hasta que su la subfunción siguiente represente la suposición de una solución implícita. [33]

Estas subfunciones pueden ser agrupadas en módulos de modo que cada módulo aporte de manera adyacente al producto final, esta técnica es denominada como diseño modular. Ver Figura III.2 del anexo III.

2.4.1. Diagrama funcional

En el siguiente apartado se analizará los diagramas funcionales obtenidos para la máquina diseñada, desarrollados en tres niveles los cuales están adjuntos en el anexo III, ver Figura III.1. y Figura III.2.

En el nivel 0 se analiza la función global o primaria de la máquina, en este caso es la de proporcionar un estado determinado (posición, temperatura y deformación) en la muestra de semiconductor de película delgada, para lo cual es necesario introducir una señal, energía y materia en el proceso.

El nivel 1 describe de manera más detallada el proceso previo a la realización de la TVDP, empezando por la selección, la sujeción y la limpieza de la superficie del bloque de curvatura adecuado o de turno, el doblado y aseguramiento de la probeta, el posicionamiento de los contactos eléctricos sobre la superficie de la probeta, el aislamiento del ambiente de prueba del medio exterior y la colocación de los bornes en el equipo Keithley 2400.

En el nivel 2 se presenta funciones secundarias no presentes en el nivel anterior pero que son necesarios para el desarrollo de la TVDP, así pues, aquí se analiza más detalladamente las funciones de posicionamiento de la probeta y lo contactos eléctricos, la verificación de anulación de impedancias en los pares de contactos, la existencia de contacto óhmico, la inexistencia de continuidad entre los contactos eléctricos y los posicionadores y la colocación y seteo de lo calentadores y el controlador de temperatura respectivamente.

Adicionalmente se establece el tipo de calentadores y el seteo de la diferencia de temperatura que existe entre el sensor de temperatura y superficie curva de prueba, esto último es fundamental para cumplir con las especificaciones establecidas anteriormente.

2.5. Estructura modular

La estructura modular es la agrupación sistemática de las funciones que cumple el producto/sistema generalmente dentro del nivel más alto desarrollado en la estructura funcional, no obstante, establecer una estructura modular correcta no solo implica desarrollar subdivisiones en menor o mayor grado sino también establecer interfaces adecuadas entre módulos (par cinemático, energía, materia y/o señal). Así pues, el desarrollo de una estructura modular conlleva la reducción de costos en diseño y fabricación, aumentar la gama de modelos o productos, facilidad de producción y mantenimiento, etc.

Para el caso, la división modular arrojó 3 módulos cuyas funciones principales describen el proceso previo a la aplicación de la TVDP detallados a continuación:

- Posicionamiento y flexión de la probeta.
- Calentamiento y control de la temperatura de la superficie de prueba.
- Posicionamiento de los contactos eléctricos.

Estos módulos proponen una necesidad específica a cubrir en el desarrollo del diseño, para ello se analizará sus posibles alternativas y la elección de una de ellas como solución mediante criterios ponderados y matriz morfológica.

2.5.1. Módulo 1 (Posicionamiento y flexión de la probeta)

Este módulo cumple con una serie de funciones detalladas en el siguiente listado:

- Centrar superficie curva.
- Establecer superficie curva.
- Posicionar probeta de MSTPD.

- Flexionar probeta.
- Fijar la probeta.

A continuación, se propone soluciones a cada función de modo que se pueda encontrar una solución final a cada módulo mediante la aplicación de los criterios ponderados y la matriz morfológica.

2.5.1.1. Centrar superficie curva

La forma más adecuada para cumplir con esta función es mediante correderas deslizantes, guías primaticas y/o rodamientos lineales, mismos que son detallados a continuación:

2.5.1.1.1. Guía cola de milano

Este sistema propone una solución para deslizamientos lineales horizontales y verticales manteniendo un mínimo contacto relativo entre sus superficies sin el uso de elementos móviles entre sus interfaces de contacto. En la Figura 2.2. se puede observar su mecanismo.

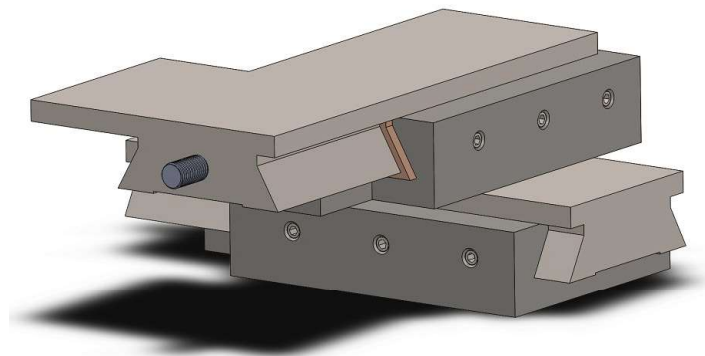


Figura 2.2. Guía cola de milano.

En la Tabla 2.2. se indica las ventajas y desventajas de mecanismo cola de milano.

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de guía cola de milano.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Sistema muy rígido - Alta precisión en movimientos - Elevada vida útil - Mecanismo de accionamiento sencillo - Fácil mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Desgastes pronunciados - Difícil movimiento relativo - Es complicado acoplar un movimiento perpendicular al primero (X, Y) - Altos costos de mantenimiento - Lubricación continua

2.5.1.1.2. Rodamientos lineales

El sistema de rodamiento lineales presenta elementos móviles entre las interfaces de contacto por lo que la fricción es muy reducida. Ver Figura 2.3.

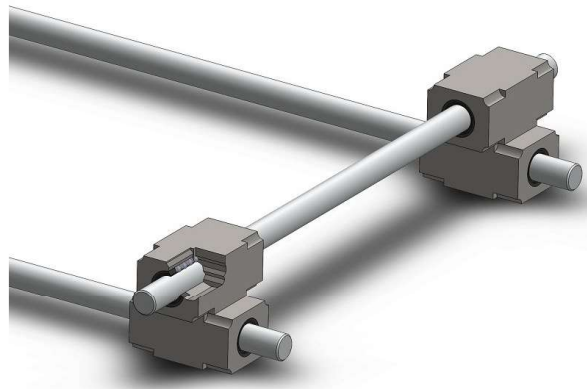


Figura 2.3. Guía con rodamiento lineal.

En la Tabla 2.3. se indica las ventajas y desventajas de mecanismo guía con rodamiento lineal.

Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de guía con rodamiento lineal.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Sistema más manejable- Movimientos más suaves- Menor peso- Menor desgaste- Precisión elevada	<ul style="list-style-type: none">- Rigidez menor- Sistema de accionamiento complejo- Es complicado acoplar un movimiento perpendicular al primero (X, Y)- Mantenimiento complejo- Sistema menos compacto

2.5.1.1.3. Guía de bolas lineales

Este tipo de sistema usa una serie de guías semicirculares o en V de manera que sus interfaces de contacto son entre la guía y elementos móviles generalmente bolas, pero también se puede encontrar guía cuyos elementos móviles son rodillos, ver Figura 2.4.

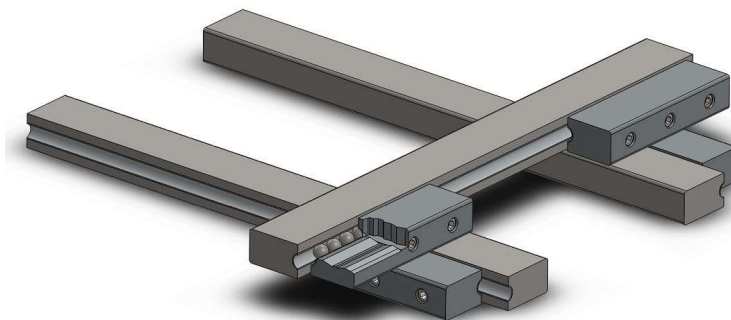


Figura 2.4. Guía de bolas lineales.

En la Tabla 2.4. se indica las ventajas y desventajas de mecanismo guía de bolas lineales.

Tabla 2.4. Ventajas y desventajas de las guías de bolas lineales.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Sistema rígido- Sistema manejable- Larga vida útil- Menor desgaste- Precisión elevada- Es posible regular su ajuste- Fácil mantenimiento- Sistema compacto	<ul style="list-style-type: none">- Sistema de accionamiento complejo- Costos relativamente altos- Gama de producto reducida- Capacidad de carga relativamente reducida

2.5.1.2. Establecer superficie curva

Esta función permite elegir el nivel de deformación y por tanto la cantidad de esfuerzo que va a presentar la probeta especialmente en la película de semiconductor, no obstante, la probeta debe de presentar una deformación simétrica y uniforme, por lo que su perfil de deformación en una arista debe ser la misma de su arista paralela.

2.5.1.2.1. Superficie curva reticulada

Este mecanismo cubre la necesidad de flexión de la probeta a través de una serie de elementos curvos enlazados uno con otro a través de horquillas, la variación de la curvatura de la superficie de prueba se debe a la variación de la altura de los elementos extremos manteniendo su elemento central fijo. En la Figura 2.5. se muestra el mecanismo ensamblado.

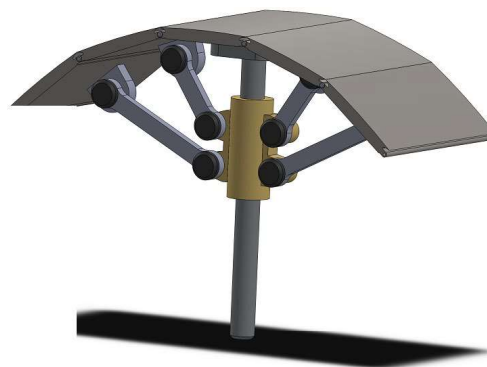


Figura 2.5. Superficie curva reticulada.

En la Tabla 2.5. se indica las ventajas y desventajas de mecanismo de superficie curva reticulada.

Tabla 2.5. Ventajas y desventajas de la superficie curva reticulada.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Sistema muy compacto - Es posible regular su ajuste - Fácil mantenimiento - Rango de radios de curvatura continuo 	<ul style="list-style-type: none"> - Cilindricidad de la superficie curva mala - Complicado acoplamiento térmico - Presencia de desgaste - Rango de radios de curvatura reducido - Dificil control del radio de curvatura

2.5.1.2.2. Bloques de curvatura

Este sistema a diferencia del anterior posee una serie de bloques intercambiables cuya radio de curvatura de la superficie curva varia en un conjunto de valores debidamente determinados, ver Figura 2.6.

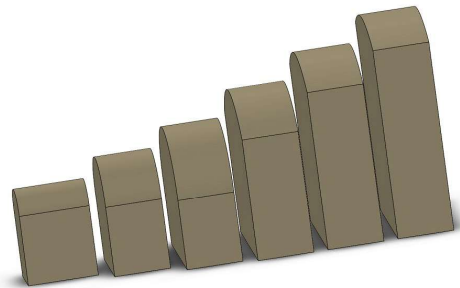


Figura 2.6. Bloques de curvatura.

En la Tabla 2.6. se indica las ventajas y desventajas de mecanismo de bloques de curvatura.

Tabla 2.6. Bloques de curvatura.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Sistema muy simple - Fácil de fabricar - Precisión elevada en los radios de curvatura - Cilindricidad alta (dependiendo del nivel de acabado) - Fácil acoplamiento térmico 	<ul style="list-style-type: none"> - Poco compacto - Complicado cambio de curvatura - Radios de curvatura limitados - Conlleva un amplio consumo de material

2.5.1.2.3. Mordazas paralelas

El objetivo de las mordazas paralelas es presionar a la probeta en sus extremos con el fin de causar una flexión en su región media de manera que se pueda deformarla

controladamente. En este caso la deformación será proporcional a la carrera recorrida por las mordazas. Ver Figura 2.7.

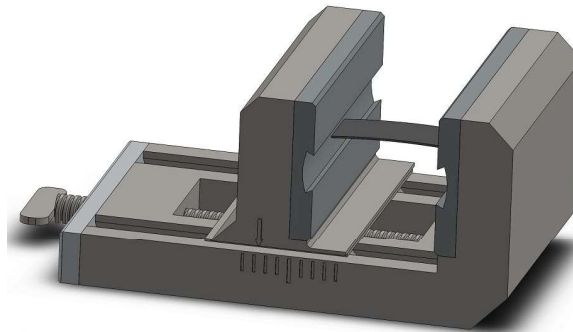


Figura 2.7. Mecanismo de mordazas paralelas.

En la Tabla 2.7. se indica las ventajas y desventajas de mecanismo de mordazas paralelas.

Tabla 2.7. Ventajas y desventajas del mecanismo de mordazas paralelas

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Sistema muy simple - Sistema compacto - Fácil fabricación 	<ul style="list-style-type: none"> - Cilindricidad del perfil de deformación malo - Acoplamiento térmico complejo - Simetría poco confiable de los perfiles de deformación de las caras paralelas

Sin embargo, cualquiera que fuera el sistema de curvatura es necesario mantener una extrema fijación de este de modo al momento de posicionar los contactos eléctricos sobre la superficie del material este permanezca inmóvil.

2.5.1.3. Posicionar probeta de MSTPD

La colocación de la probeta de MSTPD sobre la superficie curva se la realiza manualmente debido a su complejo procedimiento, la probeta no tiene que ser: rayada, manchada ni expuesta de manera descontrolada al ambiente, esta última debido a posibles cambios en su microestructura por exposición a humedad y/u otras sustancias gaseosas en el medio. Para su manipulación es necesario utilizar: guantes de nitrilo, tapa bocas (para evitar corrosión por contacto directo de vapor exhalado) y una pinza plástica.

Por otro lado, la probeta tiene que ser cuidadosamente centrada en la superficie curva para evitar perfiles disimiles en sus caras paralelas deformadas, del mismo modo sus calentadores deben producir un volumen isotérmico caliente bajo la superficie de prueba.

2.5.1.4. Flexionar probeta

Una vez logrado una probeta centrada es necesario flexionarla de modo de adquiera el perfil de la superficie curva, así pues, el elemento que presione la probeta debe dejar libre sus esquinas para colocar los contactos eléctricos, se ha formulado dos alternativas de solución presentadas a continuación:

2.5.1.4.1. Placa de sujeción reticulada

Esta alternativa propone una solución similar a la función anterior de superficie de curvatura reticulada, la pieza abraza a la probeta y la flexiona progresivamente, así también, provee de un espacio libre en las esquinas para posicionar los contactos, tal como se muestra en la Figura 2.8.

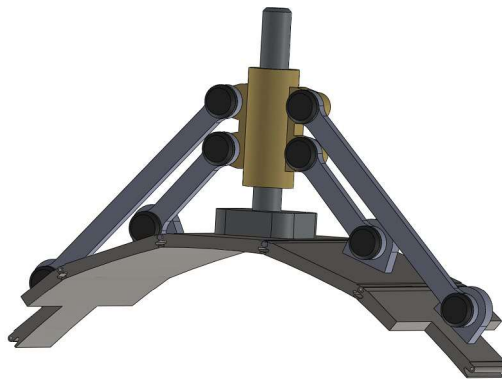


Figura 2.8. Placa de sujeción reticulada.

En la Tabla 2.5. se indica las ventajas y desventajas de mecanismo de placa de sujeción reticulada.

Tabla 2.8. Ventajas y desventajas del mecanismo de placa de sujeción reticulada.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Rango de radios de curvatura continuo- Sistema compacto	<ul style="list-style-type: none">- Cilindricidad de la superficie curva mala- Sistema complejo- Rango de radios de curvatura reducido- Altos costos de fabricación

2.5.1.4.2. Placas de sujeción simple

Esta alternativa conlleva un conjunto de placas cuyo radio de curvatura se adapta a los de la superficie de prueba tal como se muestra en la Figura 2.9.

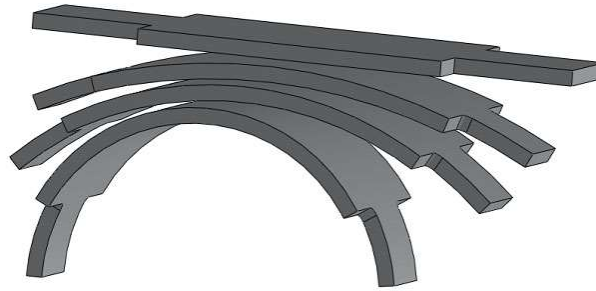


Figura 2.9. Placa de sujeción simple.

En la Tabla 2.9. se indica las ventajas y desventajas de mecanismo de placa de sujeción simple.

Tabla 2.9. Ventajas y desventajas del mecanismo de placa de sujeción simple.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Precisión elevada en radios de curvatura - Fácil fabricación - Costos relativamente reducidos - Fácil acoplamiento y sujeción post centrado 	<ul style="list-style-type: none"> - Poco compacto - Rango de radios de curvatura discreto (se rige a una serie de radios de curvatura definidos)

2.5.1.5. Fijar la probeta

En la sección anterior se evaluó mecanismos para flexión de la probeta, pero una vez que está asentada en la superficie de prueba es necesario fijarla y establecer una carga adicional para asegurar la correcta asimilación de toda su interfaz de contacto a la curvatura, es decir, el perfil de flexión que adapte la probeta deberá ser uniforme de manera que no existan áreas sin contacto.

El mecanismo debe proveer un punto fijo sobre la zona de prueba que servirá como apoyo a una fuerza de flexión y precarga aplicada normal a la probeta en la sección media (ver Figura 1.22.) con la ayuda de un elemento telescópico o roscado. En la estructura funcional esta solución se podría incluir en la función realizada por la bancada del equipo ya que formara parte de ella.

2.5.1.6. Alternativas de módulos

En el presente apartado se realiza la combinación de las soluciones analizadas anteriormente para determinar la alternativa más apropiada al módulo 1 con la ayuda de la matriz morfológica. No obstante, existen soluciones de funciones que no son compatibles

con otras, así también, se consideró las alternativas más adecuadas en cuanto a fabricación, costos y montaje.

En total se puede determinar alrededor de 15 combinaciones que generan nuevas alternativas de las cuales se consideró 3, ver Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Matriz morfológica del módulo 1.

Función	Mecanismo
Centrar superficie curva	
Establecer superficie curva	
Posicionar probeta de MSTPD	
Flexionar probeta	
Fijar la probeta	

Las posibles soluciones para el módulo 1 son:

- Solución 1: Guía cola de milano, mordazas paralelas, posicionamiento manual, bastidor.
- Solución 2: Rodamientos lineales, superficie curva reticulada, posicionamiento manual, placa de sujeción reticulada, bastidor.
- Solución 3: Guía de bolas lineales, bloques de curvatura, posicionamiento manual, placa de sujeción simple, bastidor.

2.5.1.7. Evaluación y selección de los módulos

Para la selección de la solución más adecuada para el módulo 1 se empleará el método ordinal corregido de criterios ponderados.

Los criterios propuestos para la evaluación son los siguientes:

- Precisión: tanto en movimientos como en elementos especialmente en las superficies de curvatura.

- Compacto: la maquina tiene que ser movilizada por tanto tiene que ser compacta y ligera.
- Rigidez: es uno de los parámetros más importantes ya que la presencia de deformación o inestabilidad en la máquina puede causar lecturas falsas al momento de aplicar la TVDP.
- Facilidad de manejo: todas las operaciones que realice la máquina tienen que fácilmente desempeñada.
- Mantenimiento: debe de ser fácil de mantener.

La Tabla 2.11. se indica los pesos específicos para los criterios ponderados del módulo 1.

Tabla 2.11. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 1.

Precisión > compacto = rigidez > facilidad de manejo > mantenimiento							
Criterio	Precisión	Compacto	Rigidez	Facilidad de manejo	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Precisión		1	1	1	1	5	0,33
Compacto	0		0,5	1	1	3,5	0,23
Rigidez	0	0,5		1	1	3,5	0,23
Facilidad de manejo	0	0	0		1	2	0,13
Mantenimiento	0	0	0	0		1	0,07
TOTAL						15	1,00

Desde la Tabla 2.12 a la Tabla 2.16. se evalúa cada criterio para el módulo 1.

Tabla 2.12. Evaluación de las soluciones con respecto a la precisión.

Solución 3 > solución 2 = solución 1					
Precisión	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	0	1,5	0,25
Solución 2	0,5		0	1,5	0,25
Solución 3	1	1		3	0,5
TOTAL				6	1

Tabla 2.13. Evaluación de las soluciones con respecto a lo compacto de sus elementos.

Solución 3 > solución 2 > solución 1					
Compacto	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	1	0,17
Solución 2	0		1	2	0,33
Solución 3	1	1		3	0,5
TOTAL				6	1

Tabla 2.14. Evaluación de las soluciones con respecto a la rigidez.

Solución 1 > solución 3 > solución 2					
Rigidez	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	1	3	0,5
Solución 2	0		0	1	0,2
Solución 3	0	1		2	0,3
TOTAL				6	1

Tabla 2.15. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de manejo.

Solución 1 = solución 2 > solución 3					
Facilidad de manejo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1	2,5	0,42
Solución 2	0,5		1	2,5	0,42
Solución 3	0	0		1	0,17
TOTAL				6	1

Tabla 2.16. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.

Solución 1 > solución 3 > solución 2					
Mantenimiento	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	1	0,17
Solución 2	1		0	2	0,33
Solución 3	1	1		3	0,50
TOTAL				6	1

En la Tabla 2.17. se define las conclusiones de la matriz del módulo 1.

Tabla 2.17. Conclusiones de la matriz del módulo 1.

Conclusiones	Precisión	Compacto	Rigidez	Facilidad de manejo	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Solución 1	0,083	0,039	0,117	0,056	0,011	0,306	2
Solución 2	0,083	0,078	0,039	0,056	0,022	0,278	3
Solución 3	0,167	0,117	0,078	0,022	0,033	0,417	1

En conclusión, la solución 3 conformada por: guía de bolas lineales, bloques de curvatura, posicionamiento manual, placa de sujeción simple, bastidor; presenta la propuesta más adecuada para desempeñar las funciones del módulo 1.

2.5.2. Módulo 2 (Calentamiento y control de la temperatura de la superficie de prueba)

Este módulo cumple las siguientes funciones:

- Optimizar contacto térmico entre superficies disimiles.
- Calentar superficie curva a una temperatura de prueba.
- Controlar temperatura de superficie de prueba.
- Compensar gradiente de temperatura en la superficie de prueba.
- Aislar zona de prueba del ambiente exterior.

2.5.2.1. Optimizar contacto térmico entre superficies disimiles

En el apartado anterior se definió un sistema de flexión de la probeta a través de un conjunto de bloques de curvatura los cuales se acoplarán a un sistema de calentamiento y retroalimentación mediante sensores de temperatura, así pues, el contacto térmico entre sensor y bloque y/o calentador y bloque es reducido debido a la interacción de materiales diferentes, es necesario mejorar su contacto térmico aumentando la conductividad térmica entre las interfaces de contacto.

La solución planteada se la realizara manualmente incorporando pasta térmica en las interfaces de contacto.

2.5.2.2. Calentar superficie curva a una temperatura de prueba

Esta función presenta un aporte muy importante a la funcionalidad de la máquina, por lo que, el sistema de calentadores a usar debe proveer un medio de calentamiento eficaz, confiable y preciso, sus alternativas de solución se presentan a continuación:

2.5.2.2.1. Calentamiento por inducción

Este sistema provee de energía a través de un campo magnético que actual sobre un elemento ferromagnético calentándolo. Las isotermas generadas en el cuerpo son relativamente homogéneas (dentro de la bobina de inducción) proveyendo en la superficie de prueba una temperatura moderadamente uniforme, sin embargo, su acoplamiento merece una especial atención debido a la presencia de campos magnéticos que pueden representar alteraciones en los resultados por el efecto Hall (detallado en el apartado 1.6 del capítulo anterior), la dirección que rij a dicho campo tiene un especial interés.

En la Figura 2.10., el campo magnético se muestra como las flechas verdes y son perpendiculares a las espiras de la bobina respecto a la mano derecha, para el caso, este campo no es perpendicular a la superficie de interés por lo que no representa una variación en las mediciones.

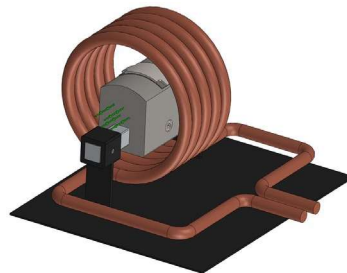


Figura 2.10. Calentador por inducción.

En la Tabla 2.18. se indica las ventajas y desventajas del sistema de calentamiento por inducción.

Tabla 2.18. Ventajas y desventajas del sistema de calentamiento por inducción.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Gran control de temperatura - Rango de trabajo muy amplio - Alta fiabilidad - Tiempo de estado estable más corto - Transferencia de calor uniforme 	<ul style="list-style-type: none"> - Posicionamiento de los contactos eléctricos muy difícil - Elevado consumo de energía - Acoplamiento complicado - Cambio de bloque de curvatura complicado - Sistema relativamente costoso

2.5.2.2.2. Calentamiento por resistencia eléctrica

En este caso el calentamiento se realiza por medio de resistencias eléctricas insertadas al bloque de curvatura cerca de la superficie de prueba, este tipo de calentadores se pueden encontrar regularmente con formas: cartucho (cilíndrica), resistencias planas, resistencias tubulares, resistencia de abrazadera, etc. Ver Figura 2.11.

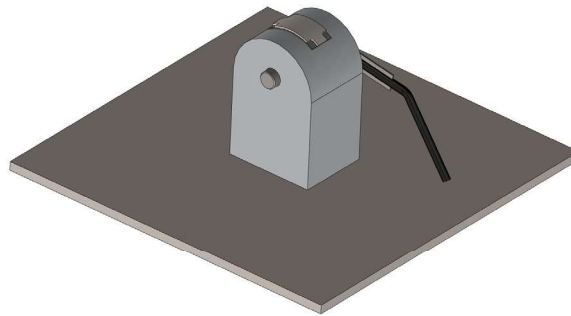


Figura 2.11. Calentamiento por resistencia eléctrica tipo cartucho.

En la Tabla 2.19. se indica las ventajas y desventajas del sistema de calentamiento por resistencia eléctrica.

Tabla 2.19. Ventajas y desventajas del sistema de calentamiento por resistencia eléctrica

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Fácil posicionamiento de los contactos eléctricos- Rango de trabajo muy amplio- Acoplamiento sencillo- Fabricación simple	<ul style="list-style-type: none">- Altos tiempo de estado estable- Menor control de la temperatura- La transferencia de calor sobre el bloque es moderadamente uniforme

2.5.2.2.3. Calentamiento en volumen aislado

Esta solución plantea un volumen aislado que mantiene una temperatura uniforme dentro del mismo similar al trabajo realizado por una mufla, tal como se muestra en la Figura 2.12.

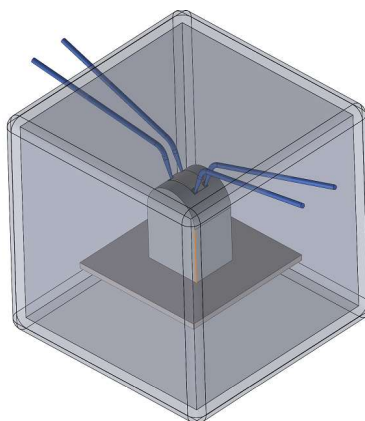


Figura 2.12. Calentamiento en volumen aislado.

En la Tabla 2.20. se indica las ventajas y desventajas del sistema de calentamiento en volumen aislado.

Tabla 2.20. Ventajas y desventajas del sistema de calentamiento en volumen aislado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Fácil posicionamiento de los contactos eléctricos - Rango de trabajo muy amplio - Transferencia de calor uniforme - Mayor control de temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> - Altos tiempo de estado estable - Menor control de la temperatura - Sistema relativamente costoso - Difícil de acoplar a la máquina

2.5.2.3. Controlar temperatura de superficie de prueba

La función de controlar la temperatura de la superficie de prueba una vez se haya establecido es sumamente importante, es necesario implantar un controlador PID con el fin de que provea una temperatura dentro de un error de estado estable aceptable y a su vez, compensar variaciones de temperatura por situaciones atípicas, del mismo modo un sensor de temperatura provee de una lectura de entrada al controlador para corregir desviaciones. El control de la temperatura representa un sistema paralelo a la máquina, así que su solución será dada de manera específica por un controlador PID.

2.5.2.4. Compensar gradiente de temperatura en la superficie de prueba

No es posible mantener un(os) sensor(es) dentro de la superficie de prueba por el mero hecho de que estará ocupada por la probeta, es por esta razón que dicho sensor debe ser colocado dentro de sus inmediaciones y compensar el gradiente de temperatura que existe entre sus localidades. Los equipos PID cuentan entre sus prestaciones con la posibilidad de establecer una compensación de temperatura por errores de localización del sensor.

2.5.2.5. Aislar zona de prueba del ambiente exterior

El aislamiento de la zona de prueba se lo lleva a cabo mediante una caja de acrílico. Este componente evita que las perturbaciones en el medio circundante de cambio brusco en el error en estado estable previamente establecido (ver Tabla 2.1., concepto de función) y también proporciona un tiempo hasta el estado estable más corto ya que reduce su tiempo de estado transitorio.

2.5.2.6. Alternativas de módulos

Del mismo modo que el módulo anterior se realizara una evolución y selección de la alternativa de solución más adecuada mostrada en la Tabla 2.21.

Tabla 2.21. Matriz morfológica del módulo 2

Función	Mecanismo
Optimizar contacto térmico entre superficies disimiles	
Calentar superficie curva a una temperatura de prueba	
Controlar temperatura de superficie de prueba	
Compensar gradiente de temperatura en la superficie de prueba	
Aislar zona de prueba del ambiente exterior	

Las posibles soluciones para el módulo 2 son:

- Solución 1: Pasta térmica, calentamiento en volumen aislado, control PID, control PID y caja de acrílico.
- Solución 2: Pasta térmica, calentamiento por inducción eléctrica, control PID, control PID y caja de acrílico.
- Solución 3: Pasta térmica, calentamiento por resistencia eléctrica, control PID, control PID y caja de acrílico.

2.5.2.7. Evaluación y selección de los módulos

Para la selección de la solución más adecuada para el módulo 2 se empleará el mismo método anteriormente usado.

Los criterios propuestos para la evaluación son los siguientes:

- Fácil acoplamiento: todo el sistema de calentamiento y control de temperatura debe ser ensamblado al resto de la máquina con facilidad.

- Fiabilidad: las temperaturas de trabajo tienen que estar dentro del rango de error establecido anteriormente y garantizar un funcionamiento correcto.
- Calentamiento uniforme: la superficie de prueba tiene que sujetarse a los límites de gradientes de temperatura.
- Grado de control de temperatura: más que todo tiene que ver con la facilidad que presenta el sistema para ser controlado y su tiempo de respuesta.
- Tiempo de estado estable: el tiempo que demora el sistema en estabilizarse.

La Tabla 2.22. se indica los pesos específicos para los criterios ponderados del módulo 2.

Tabla 2.22. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 2.

Calentamiento uniforme > grado de control de temperatura > fiabilidad > tiempo de estado estable = Fácil acoplamiento							
Criterio	Fácil acoplamiento	Fiabilidad	Calentamiento uniforme	Grado de control de temperatura	Tiempo de estado estable	$\Sigma+1$	Ponderación
Fácil acoplamiento		0	0	0	0,5	1,5	0,10
Fiabilidad	1		0	0	1	3	0,20
Calentamiento uniforme	1	1		1	1	5	0,33
Grado de control de temperatura	1	1	0		1	4	0,27
Tiempo de estado estable	0,5	0	0	0		1,5	0,10
TOTAL						15	1,00

Desde la Tabla 2.23. a la Tabla 2.27. se evalúa cada criterio para el módulo 2.

Tabla 2.23. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de acoplamiento.

Solución 3 > solución 1 > solución 2					
Fácil acoplamiento	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	0	2	0,33
Solución 2	0		0	1	0,17
Solución 3	1	1		3	0,50
TOTAL				6	1

Tabla 2.24. Evaluación de las soluciones con respecto a la fiabilidad.

Solución 1 = solución 3 > solución 2					
Fiabilidad	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	0,5	2,5	0,42
Solución 2	0		0	1	0,17
Solución 3	0,5	1		2,5	0,42
TOTAL				6	1

Tabla 2.25. Evaluación de las soluciones con respecto al calentamiento uniforme.

Solución 1 = solución 3 > solución 2					
Calentamiento uniforme	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	0,5	2,5	0,42
Solución 2	0		0	1	0,17
Solución 3	0,5	1		2,5	0,42
TOTAL				6	1

Tabla 2.26. Evaluación de las soluciones con respecto al grado de control de temperatura.

Solución 1 = solución 3 > solución 2					
Grado de control de temperatura	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	0,5	2,5	0,42
Solución 2	0		0	1	0,17
Solución 3	0,5	1		2,5	0,42
TOTAL				6	1

Tabla 2.27. Evaluación de las soluciones con respecto al tiempo en estado estable.

Solución 1 = solución 3 > solución 2					
Tiempo en estado estable	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	0,5	2,5	0,42
Solución 2	0		0	1	0,17
Solución 3	0,5	1		2,5	0,42
TOTAL				6	1

En la Tabla 2.28. se define las conclusiones de la matriz del módulo 2.

Tabla 2.28. Conclusiones de la matriz del módulo 2.

Conclusiones	Fácil acoplamiento	Fiabilidad	Calentamiento uniforme	Grado de control de temperatura	Tiempo de estado estable	Σ	Prioridad
Solución 1	0,033	0,083	0,139	0,111	0,042	0,408	2
Solución 2	0,017	0,033	0,056	0,044	0,017	0,167	3
Solución 3	0,050	0,083	0,139	0,111	0,042	0,425	1

En conclusión, la solución 3 constituida por: pasta térmica, calentamiento por resistencia eléctrica, control PID, control PID y caja de acrílico; presenta la propuesta más adecuada para desempeñar las funciones del módulo 2.

2.5.3. Módulo 3 (Posicionamiento de los contactos eléctricos)

Este módulo cumple las siguientes funciones:

- Aislar eléctricamente entre contactos eléctricos y posicionadores.
- Verificar no continuidad entre contactos eléctricos y posicionadores.
- Configurar el equipo (Keithley 2400) como fuente de corriente y setear a 1 mA
- Configurar el voltímetro en micro – voltios.
- Posicionar contactos eléctricos en cada esquina de la probeta.
- Presionar los contactos posicionados sobre la probeta.
- Realizar prueba de linealidad variando la corriente suministrada para verificar contacto óhmico.

2.5.3.1. Aislar eléctricamente entre contactos eléctricos y posicionadores

El aislamiento eléctrico se lo realiza de manera manual en la sujeción con los posicionadores, su acoplamiento debe de ser mediante un pegamento plástico de manera que me evite en contacto eléctrico, la mala realización de esta función provocaría lecturas de resistividad superficial ridículamente altas dado que representa la impedancia de toda la estructura.

Esta solución se dará de manera única mediante un pegamento epóxico compuesto, la cual me provee de la fijación necesaria en los contactos eléctricos y al mismo tiempo me aísla eléctricamente.

2.5.3.2. Verificar no continuidad entre contactos eléctricos y posicionadores

De igual forma que el apartado anterior la continuidad entre los posicionadores y contactos eléctricos se verificara de manera manual, con la ayuda de un multímetro (ohmímetro), la continuidad se verifica específicamente en el lugar que se aisló anteriormente con el fin de aislar los contactos de la estructura.

2.5.3.3. Configurar el equipo (Keithley 2400) como fuente de corriente y setear a 1 mA

Esta función se realiza manualmente sobre el equipo Keithley 2400, la misma que presenta múltiples menús y también puede ser usada en varios métodos de caracterización de materiales (especialmente en semiconductores y circuitos impresos).

2.5.3.4. Configurar el voltímetro en micro – voltios

Esta función se la realiza de manera manual sobre el equipo voltímetro de alta precisión (ver Tabla 1.2.), el sistema es configurado para lecturas desde los micro – voltios, dado que a temperatura ambiente las probetas presentan interacciones eléctricas muy tenues.

2.5.3.5. Posicionar contactos eléctricos en cada esquina de la probeta

El posicionamiento de los contactos eléctricos requiere de un tratamiento especial, es decir, dado que su inclinación de la superficie varía los contactos deben de tener la facilidad de fijarse de manera libre y precisa. Para ello se ha formulado 2 alternativas de solución que

implica o el movimiento libre del posicionador dentro de sus tres ejes (incluida rotación sobre ellos) o el movimiento conjunto de las placas de sujeción magnética junto con el posicionador.

2.5.3.5.1. Rotación en los contactos y posicionadores

Debido a la curvatura en la superficie de prueba los contactos deben conseguir inclinarse o rotar para alcanzar las esquinas del material de manera perpendicular a su interfaz de contacto, este sistema provee de rotación en los lugares diferentes al mismo tiempo la unión magnética de la base de los posicionadores permiten adaptar libremente a cualquier inclinación, tal como se muestra en la Figura 2.13.

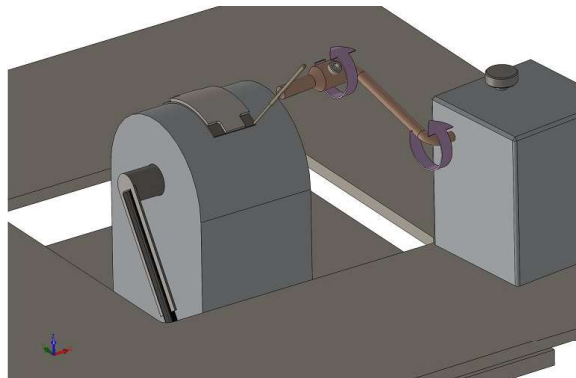


Figura 2.13. Rotación en contactos y posicionadores.

En la Tabla 2.29. se indica las ventajas y desventajas del mecanismo de rotación dentro del eje del posicionador y contacto.

Tabla 2.29. Ventajas y desventajas del mecanismo de rotación dentro del eje del posicionador y contacto.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Fácil posicionamiento de los contactos eléctricos - Espacio amplio de trabajo - Rango de inclinación muy amplio - Fácil fabricación 	<ul style="list-style-type: none"> - Precisión reducida - Difícil manejo

2.5.3.5.2. Rotación en la base magnética y posicionadores

De manera diferente al apartado anterior este mecanismo propone el cambio de inclinación de la base de sujeción en lugar de los contactos y posicionadores tal como se muestra en la Figura 2.14.

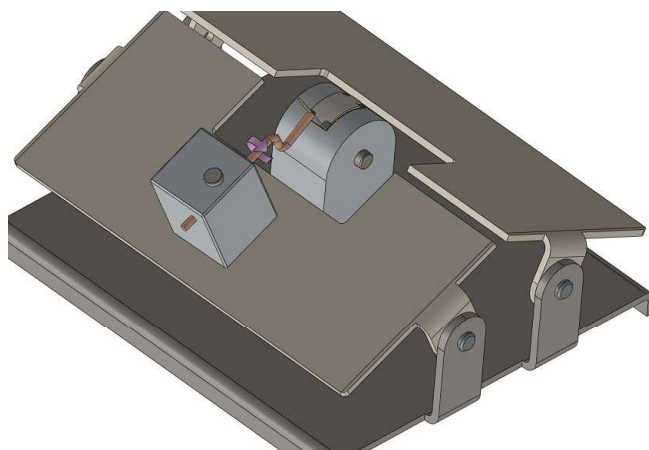


Figura 2.14. Rotación en base magnética y posicionadores.

En la Tabla 2.30. se indica las ventajas y desventajas del mecanismo de rotación conjunta del posicionador y el contacto.

Tabla 2.30. Ventajas y desventajas del mecanismo de rotación conjunta del posicionador y contacto.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Inclinación más precisa - Espacio amplio de trabajo - Visibilidad buena 	<ul style="list-style-type: none"> - Precisión reducida - Mecanismo costoso - Fabricación relativamente más complicada

2.5.3.6. Presionar los contactos posicionados sobre la probeta

Una vez que los contactos eléctricos han sido posicionados en cada esquina es necesario ejercer presión adecuadamente para lograr contacto óhmico, no obstante, la presión tiene que ser controlada, la película depositada es un material cristalino extrínseco por lo que su resistencia en compresión a la rotura es proporcional a la soportada por un cristal de silicio con impurezas, en la Tabla I.1. se detalla las propiedades de la probeta.

La solución formulada es elevar toda la superficie curva una vez los contactos estén en las esquinas y de esta manera poder aplicar presión de manera uniforme, se ha formulado dos alternativas de solución.

2.5.3.6.1. Elevador de tornillo de potencia

La elevación mediante un mecanismo de tornillo de potencia me provee una forma precisa, confiable y fácil de acoplar a un sistema mecánico. Ver Figura 2.15.

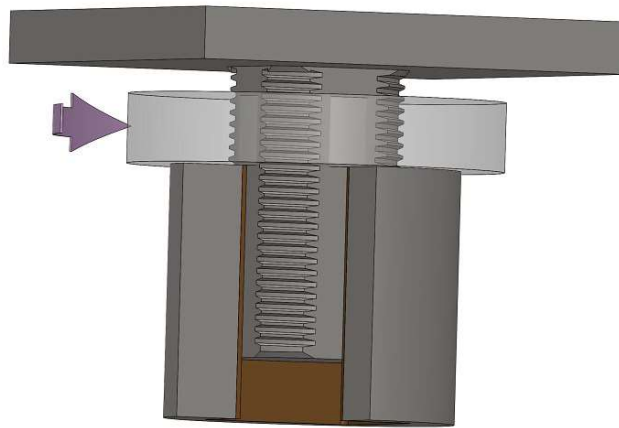


Figura 2.15. Elevador de tornillo de potencia.

En la Tabla 2.31. Se indica las ventajas y desventajas del mecanismo elevador de tornillo de potencia.

Tabla 2.31. Ventajas y desventajas del mecanismo elevador de tornillo de potencia.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Alta fiabilidad - Elevación precisa - Fácil acoplamiento con el resto del mecanismo - Fácil fabricación y mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de derivas o inestabilidad que pueden complicar el posicionamiento de los contactos - Girar la tuerca se torna relativamente duro

2.5.3.6.1. Elevador de conjunto piñón – cremallera

La elevación mediante un conjunto piñón – cremallera es una solución precisa y su accionamiento requiere de un trabajo menor que el mecanismo anterior, no obstante, su fabricación y acoplamiento representa un reto mayor tal como se muestra en la Figura 2.16.

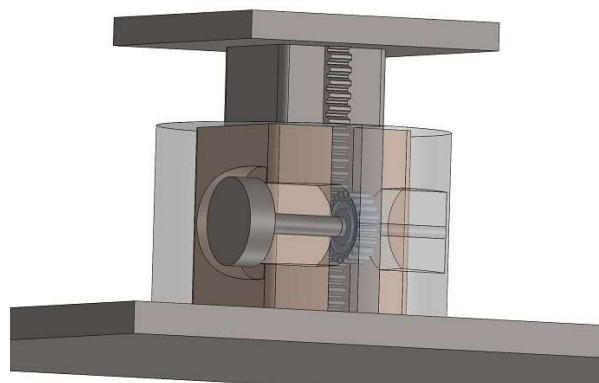


Figura 2.16. Elevador de conjunto piñón – cremallera.

En la Tabla 2.32. se indica las ventajas y desventajas del mecanismo elevador de conjunto piñón – cremallera.

Tabla 2.32. Ventajas y desventajas del mecanismo elevador de conjunto piñón – cremallera.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Alta fiabilidad - Elevación precisa - Fácil manejo 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabricación complicada - Difícil acoplamiento con el resto del mecanismo

2.5.3.7. Realizar prueba de linealidad variando la corriente suministrada para verificar contacto óhmico

La linealidad es la última función previo a la aplicación de la TVDP sobre un material determinado, esta se la realiza con el fin de verificar la linealidad dentro del circuito y por tanto la obtención de contacto óhmico en cada esquina, este tema está más detallado en el apartado 1.7.5 de capítulo anterior (contacto Metal – semiconductor).

2.5.3.8. Alternativas de módulos

Del mismo modo que el módulo anterior se realizara una evolución y selección de la alternativa de solución más adecuada mostrada en la Tabla 2.33.:

Tabla 2.33. Matriz morfológica del módulo 3.

Función	Mecanismo
Aislar electricamente entre contacto eléctrico y posicionador	<pre> graph TD FM1[Función manual] --- FM2[Función manual] FM2 --- FM3[Función manual] FM3 --- FM4[Función manual] FM4 --- R1[Rotación en los contactos y posicionadores] FM4 --- R2[Rotación en la Base magnética y posicionadores] R1 --- E1[Elevador de Tornillo de potencia] R2 --- E2[Elevador de conjunto piñón-cremallera] E1 --- K[Keithley 2400] E2 --- K </pre>
Verificar no continuidad entre contacto y posicionador	
Configurar el equipo como fuente de corriente y setea 1 mA	
Configurar el multímetro en micro – voltios	
Posicionar contactos eléctricos en cada esquina de la probeta	
Presionar los contactos posicionados sobre la probeta	
Realizar una prueba de linealidad variando la corriente suministrada	

Las posibles soluciones para el módulo 3 son:

- Solución 1: Función manual, función manual, función manual, función manual, rotación en los contactos y posicionadores, tornillo de potencia y Keithley 2400.
- Solución 2: Función manual, función manual, función manual, función manual, rotación en la base magnética y posicionadores, elevador de piñón – cremallera y Keithley 2400.

2.5.3.9. Evaluación y selección de los módulos

Para la selección de la solución más adecuada para el módulo 3 se empleará el mismo método anteriormente usado.

Los criterios propuestos para la evaluación son los siguientes:

- Facilidad de posicionamiento: Se necesita tener espacio suficiente para colocar de una manera precisa los contactos eléctricos.
- Fiabilidad: Es la impedancia que provee el contacto óhmico y el aislamiento eléctrico
- Precisión: Es muy importante colocar los contactos eléctricos junto en las esquinas de la probeta, es decir, una pequeña variación en la localización del contacto me genera una gran variación en la lectura de voltaje.
- Inclinación: Adaptar la inclinación de la probeta en el punto de contacto es muy importante, el contacto debe de estar situado perpendicular a la superficie.
- Estabilidad: la estructura debe presentar muy buena estabilidad, la presencia de derivas puede causar dificultades y errores en el posicionamiento.

La Tabla 2.34. se indica los pesos específicos para los criterios ponderados del módulo 3.

Tabla 2.34. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 3.

Precisión = fiabilidad > estabilidad > facilidad de posicionamiento > inclinación							
Criterio	Precisión	Facilidad de posicionamiento	Inclinación	Fiabilidad	Estabilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Precisión		1	1	0,5	1	4,5	0,30
Facilidad de posicionamiento	0		1	0	0	2	0,13
Inclinación	0	0		0	0	1	0,07
Fiabilidad	0,5	1	1		1	4,5	0,30
Estabilidad	0	1	1	0		3	0,20
						15	1,00

Desde la Tabla 2.35. a la Tabla 2.39. se evalúa cada criterio para el módulo 3.

Tabla 2.35. Evaluación de las soluciones con respecto a la precisión.

Solución 1 > solución 2				
Precisión	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
			3	1

Tabla 2.36. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de posicionamiento.

Solución 1 > solución 2				
Facilidad de posicionamiento	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
			3	1

Tabla 2.37. Evaluación de las soluciones con respecto a la inclinación.

Solución 2 > solución 1				
Inclinación	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	1	0,33
Solución 2	1		2	0,67
			3	1

Tabla 2.38. Evaluación de las soluciones con respecto a la fiabilidad.

Solución 1 = solución 2				
Fiabilidad	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,50
Solución 2	0,5		1,5	0,50
			3	1

Tabla 2.39. Evaluación de las soluciones con respecto a la estabilidad.

Solución 1 > solución 2				
Estabilidad	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	1	1,00
Solución 2	0		0	0,00
			1	1

En la Tabla 2.40. se define las conclusiones de la matriz del módulo 3.

Tabla 2.40. Conclusiones de la matriz del módulo 3.

Conclusiones	Precisión	Facilidad de posicionamiento	Inclinación	Fiabilidad	Estabilidad	Σ	Prioridad
Solución 1	0,200	0,089	0,022	0,150	0,200	0,661	1
Solución 2	0,100	0,044	0,044	0,150	0,000	0,339	2

En conclusión, la solución 1 conformada por: función manual, función manual, función manual, función manual, rotación en los contactos y posicionadores, tornillo de potencia y Keithley 2400; presenta la propuesta más adecuada para desempeñar las funciones del módulo 3.

2.5.4. Solución virtual de la máquina para medir resistividad eléctrica superficial.

La unión de las soluciones a los módulos 1, 2 y 3 dan como resultado el modelo presentado en la Figura 2.17.

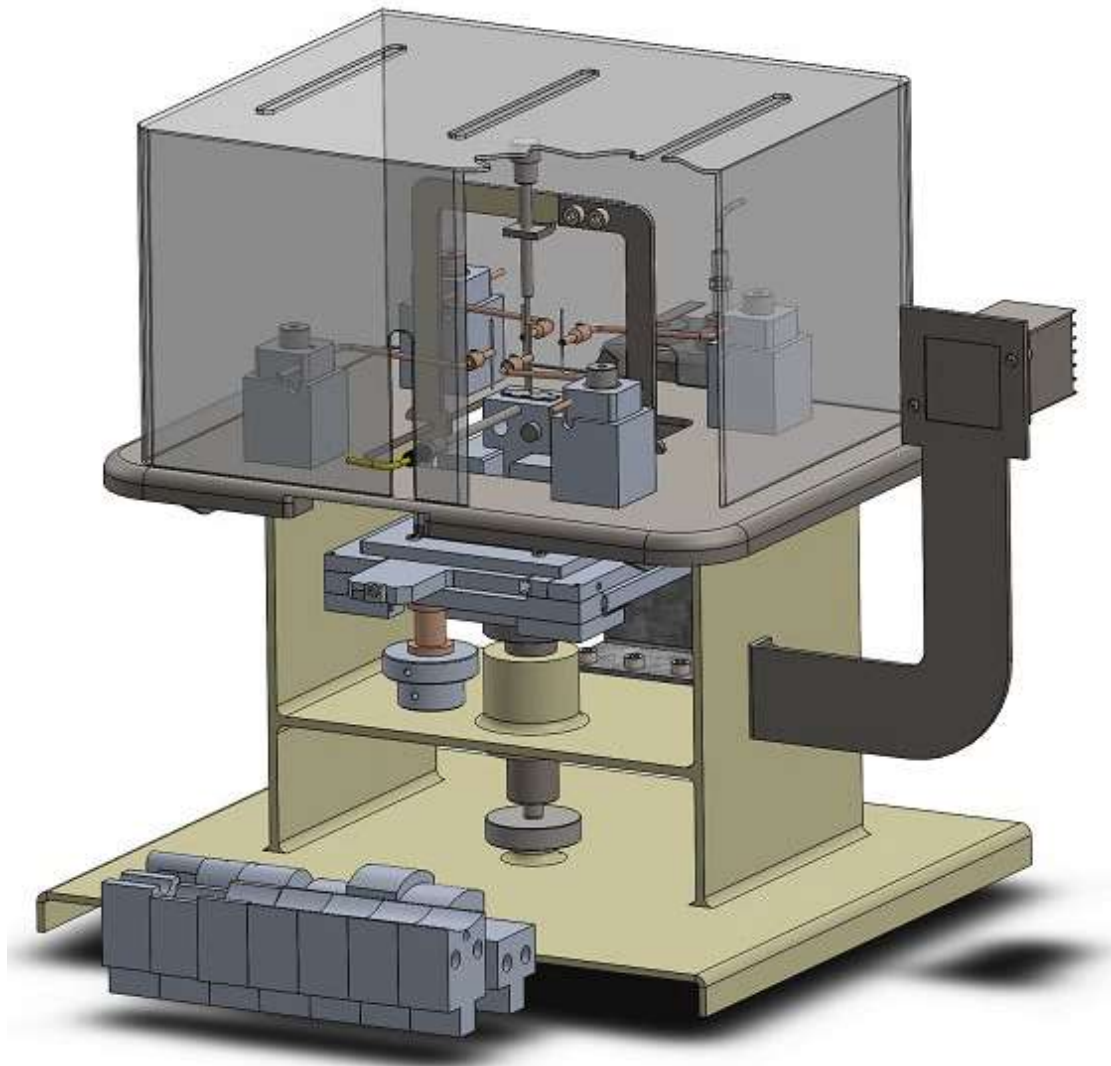


Figura 2.17. Solución virtual de la máquina para medir resistividad eléctrica superficial.

2.6. Diseño y selección de componentes

En esta sección se realiza los cálculos y selección de los componentes que contiene la máquina.

2.6.1. Módulo 1: Posicionamiento y flexión de la probeta

En la presente sección se diseña el conjunto de elementos pertenecientes al módulo 1.

2.6.1.1. Diseño de correderas de bolas lineal

Se determina el uso de las correderas de bolas lineal (guías de precisión, riel guía, guía lineal, entre otros) para el desplazamiento longitudinal de la máquina, debido a que son ideales para situaciones donde se tiene cargas bajas o moderadas y son bastante duraderos por tener baja fricción [35]; además al ser un elemento muy preciso, son ideales para una gran variedad de máquinas especiales, así como en equipos de medición y ensayo de semiconductores [28].

La superficie de medición es para una probeta cuyo mayor tamaño es de 30x10 [mm], ver Figura 1.8. por lo que, cualesquiera que fuese su radio de curvatura debe presentar dicha área útil. Sin embargo, su base debe proporcionar de espacio suficiente para mover con facilidad los contactos y una carrera que me permita variar de manera óptima la posición. En la Figura 2.18. se muestra los elementos que conforman la corredera y la dureza de los materiales están en el Anexo IV. En la Tabla IV.1.

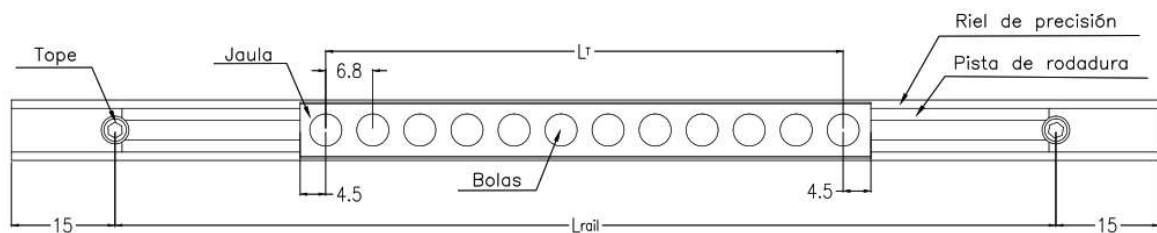


Figura 2.18. Corredera de bolas lineal.

2.6.1.1.1. Longitud del rail

La longitud del rail o riel (L_{rail}) es la longitud de desplazamiento que tiene la jaula de las bolas. Este desplazamiento está definido por unos toques para evitar que se descarrile la corredera tal como se indica en la Figura 2.18. Se establece una longitud del riel considerando una carrera adecuada y una base que me brinde un espacio bueno.

2.6.1.1.2. Carrera

Al ser una máquina de precisión, su carrera (S) está dada por ciclos, en donde un ciclo es la longitud lineal máxima. La carrera que se establezca influye directamente con los momentos que presentara las correderas debido al desplazamiento de centro de masa.

- Longitud de la jaula máxima

La longitud de la jaula (L_{cage}) es la longitud en donde va a ir contenido el separador de las bolas. Por ende, se calcula previamente una longitud máxima en función de la carrera, ver ecuación 2.1. [28]

$$L_{cage\ max} = L_{rail} - (0.5 \times S) \quad (2.1.)$$

Donde:

L_{rail} : Longitud del riel [mm]

2.6.1.1.3. Número de elementos rodantes

Una vez establecida la longitud máxima de la jaula y definir los valores t , t_1 y t_2 como se indica en la Figura 2.18. Se procede al cálculo del número de elementos rodantes dada por la ecuación 2.2. [28]

$$z = TRUNC \left(\frac{L_{cage\ max} - t_1 - t_2}{t} \right) + 1 \quad (2.2.)$$

Donde:

z : Número de elementos rodantes

t_1, t_2 : Distancia del elemento rodante exterior al final de la jaula [mm]

t : Paso de los elementos rodantes en la jaula [mm]

$TRUNC$: Truncar, es la función para obtener un número entero de elementos rodantes.

2.6.1.1.4. Longitud de la jaula

La longitud de la jaula recomendada está dada por la ecuación 2.3. [28]

$$L_{cage} = (z - 1)t + t_1 + t_2 \quad (2.3.)$$

2.6.1.1.5. Longitud del transporte de carga

Es la longitud de transporte de carga definida desde el centro del primer elemento rodante portador de carga hasta el centro del último tal como se indica en la Figura 2.19.

La longitud del transporte de carga viene dada por la ecuación 2.4. [28]:

$$L_T = (z - 1)t \quad (2.4.)$$

Donde:

z : Número de elementos rodantes

t : Paso de los elementos rodantes en la jaula [mm]

L_T : Longitud de transporte de carga [mm]

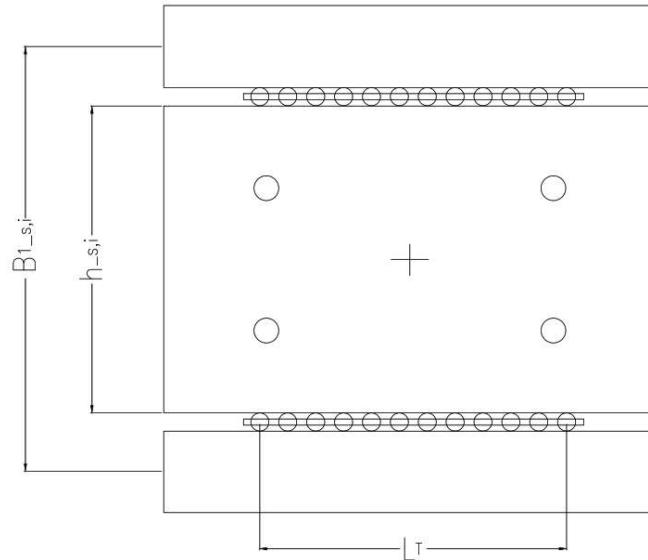


Figura 2.19. Distancias L_T y B_1 del sistema de correderas de bolas lineal.

En la Figura 2.19., la longitud B_{1s} y B_{1i} representa la separación de los apoyos de para la corredera superior e inferior respectivamente.

- Corredera superior

$$B_{1s} = h_s = 85.7 \text{ [mm]}$$

- Corredera inferior

$$B_{1i} = h_i + 30 = 143.64 \text{ [mm]}$$

$$h_i = 113.64 \text{ [mm]}$$

2.6.1.1.6. Cargas en corredera superior

El sistema coordinado se encuentra ubicado en la parte central del círculo de la placa, todos los pesos de cada uno de los cuerpos descritos en la Figura 2.20. caen en el centro del eje X, por tanto, no producen momentos en M_y .

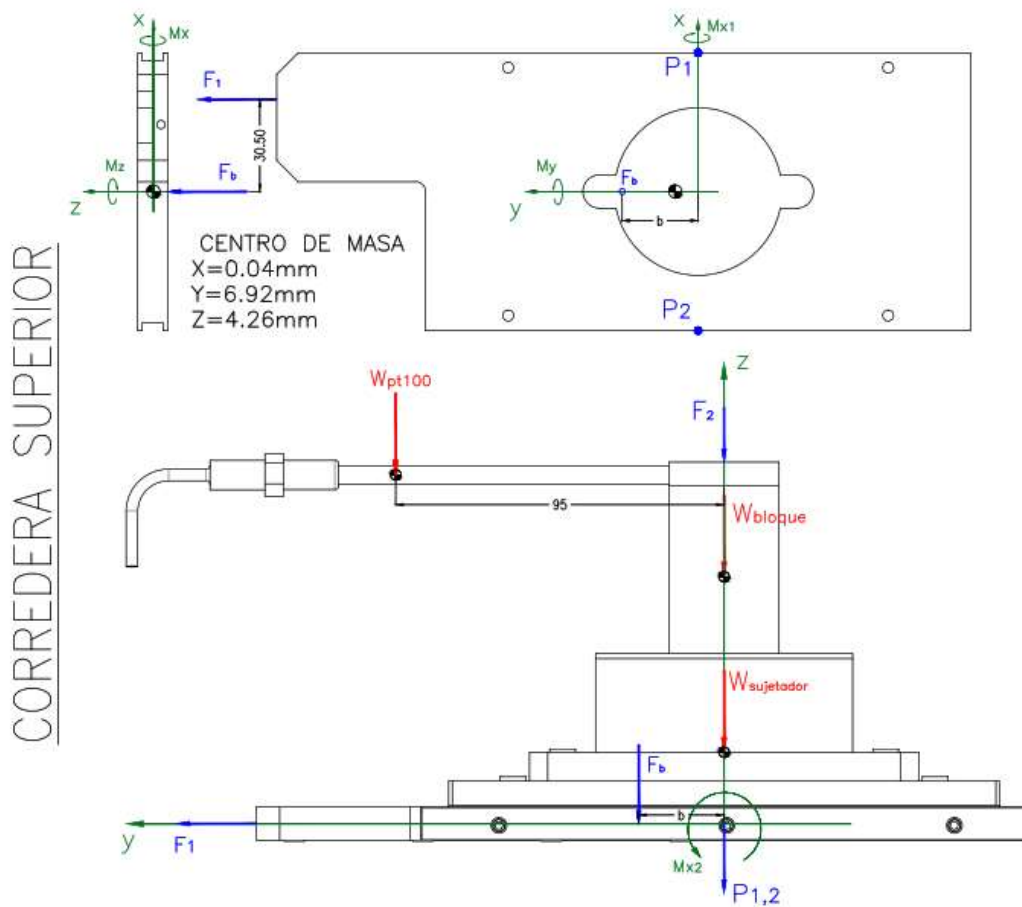


Figura 2.20. Diagrama de carga de la corredera superior.

Realizando sumatoria de fuerzas se tiene la ecuación 2.5.

$$\Sigma F_z = W_{placa} + W_{sujetador} + W_{bloque} + W_{pt100} + W_{otros} + F_2 - P_1 - P_2 = 0 \quad (2.5.)$$

Donde:

$$W_{sujetador} = 8,05 [N]; W_{bloque} = 1,67 [N]$$

$$W_{pt100} = 2 [N]; W_{otros} = 1,97 [N]$$

Estos pesos equivalen a elementos del mecanismo planteado que no requieren de cálculos o son elementos normalizados, los cuales se pueden encontrar en los planos. En la ecuación 2.6. [28] se indica el peso de la placa en la corredera superior.

$$W_{placa} = V * \rho_{Al} * g ; \quad V = \frac{(L_{rail} + 30)}{1000} h_s * t \quad (2.6.)$$

Donde:

$h = 0,0857 [m]$: es el ancho de la placa

$t = 0,01 [m]$: es el espesor de la placa

$$\rho_{Al} = 2700 \left[\frac{kg}{m^3} \right] ; \quad g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

F_2 : Es la fuerza necesaria para doblar la probeta y precargar la misma de modo que se adapte a la curvatura elegida, para el caso se tomara en cuenta las propiedades mecánicas del kapton ya que es el material predominante, misma que se presentan en las Tabla I.1 y Tabla I.2. del capítulo anterior. Por lo tanto, en la ecuación 2.7. se tiene:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \leq Sy \text{ (Kapton)} \quad (2.7.)$$

Como se busca precisamente doblar la probeta, por lo tanto, se tiene la ecuación 2.8.:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{Sy * I}{c} \quad (2.8.)$$

Donde:

$$c = \frac{e}{2} = \frac{201x10^{-6}}{2} = 105x10^{-6} [m]$$

$$I = \frac{at^3}{12} = \frac{0,012x(201x10^{-6})^3}{12} = 8,12x10^{-15} [m^4]$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{158x10^6 * 8,12x10^{-15}}{105x10^{-6}} = 0,0122 [Nm]$$

La fuerza necesaria para doblar la probeta está dada por la ecuación 2.9., ver Figura 2.22.:

$$F_2' = \frac{4 * M_{m\acute{a}x}}{L} = \frac{4 * 0,0122}{0,022} = 2,22 [N] \quad (2.9.)$$

$$F_2 = F_2' + 10 = 12,22 [N]$$

La longitud L corresponde a la probeta de 20x10 [mm] con una tolerancia de dos décimas de milímetro.

F_b : Es la fuerza total que esta aplicada sobre la placa de forma vertical la misma que me genera un momento al desplazarse una carrera b [m] por lo tanto se tiene la ecuación 2.10. y ecuación 2.11.

$$P_s = P_1 + P_2 = 25,91 + W_{placa} \quad (2.10.)$$

$$M_b = F_b * b = (P_1 + P_2) * b \quad (2.11.)$$

Además, se sabe que $P_1 = P_2$ dado que $M_y = 0$

A continuación, se calculará los momentos a lo largo del eje X, ver ecuación 2.12.

$$M_{xs} = M_{x_1} + M_{x_2} + M_b = (0,095 * W_{pt100}) + (0,00692 * W_{placa}) + M_b \quad (2.12.)$$

En la Figura 2.21. se determina el cálculo de la fuerza de rozamiento:

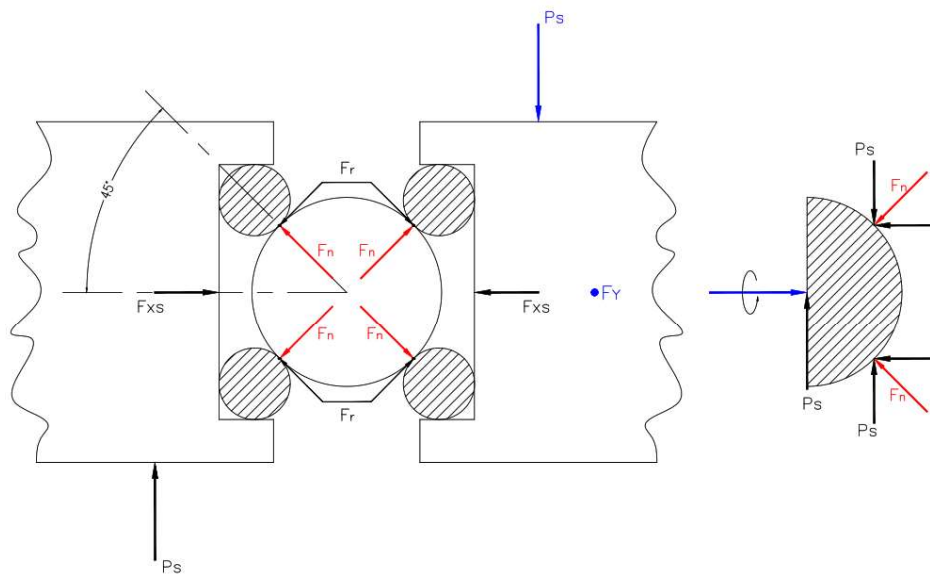


Figura 2.21. Diagrama de fuerzas de fricción.

La fricción de la corredera está dada por la ecuación 2.13. [28]

$$F_Y = 8 * \mu * F_n = 8 * 0,004 * \sqrt{P_s^2 + F_{x_s}^2} \quad (2.13.)$$

Donde:

$F_{x_s} = P_s + F_{pr}$: es la suma de la carga sobre la corredera superior y la precarga definida en el apartado 1.11.2.

En la ecuación 2.14 se indica el cálculo del momento en el eje Z (torsión):

$$M_{z_s} = F_Y * 0,0305 \quad (2.14.)$$

El coeficiente de fricción μ es un valor promedio equivalente a $\frac{1}{50}$ de la fricción normal existente en un contacto metal-metal (0,2), este valor es normalmente obtenido en correderas deslizantes de bolas a diferencia de las correderas habituales. [36]

El momento máximo encontrado en la corredera superior corresponde al eje X, que presenta su pico cuando la placa superior se encuentra en el punto más alejado de la carrera de b en dirección positiva del eje Y.

Las cargas resultantes P_1 y P_2 son iguales dado que no existen ninguna fuerza desequilibrante en el eje X y tampoco un momento en Y.

Por otro lado, los momentos M_Y y M_Z no son nulos pero su valor es prácticamente despreciable comparado con sus valores admisibles.

Por lo tanto, la fuerza resultante para la corredera superior se obtiene con la ayuda de la ecuación 1.17. y 1.18. presentada en la sección anterior:

$$F_{comb} = |P_s| + \left(\left| \frac{6000M_x}{L_T} \right| + \left| \frac{6000M_z}{L_T} \right| \right)$$

Se determina la fuerza resultante:

$$F_{res} = F_{comb} + F_{pr}$$

Donde:

$F_{pr} = 0,2 * C_{eff\ slide}$: Fuerza de precarga en dimensionamiento estático [N]

$C_{eff\ slide} = 683,78$ [N]: Capacidad de carga dinámica [N]

Vida útil de la corredera previo a presentar síntomas de fatiga en la pista de rodadura cuantificada como distancia total recorrida en kilómetros. [28], ver ecuación 2.15.

$$L_{ns} = c_1 100 \left(\frac{C_{eff\ slide}}{P} \right)^p \quad (2.15.)$$

Donde:

L_{ns} : Vida útil nominal modificada [km].

c_1 : Factor de confiabilidad; para una confiabilidad del 97% de 0,44 (Anexo IV. Tabla IV.3)

$C_{eff\ slide}$: Capacidad de carga dinámica efectiva de una corredera [N].

P : Carga dinámica equivalente [N].

p : Exponente de vida; $p = 3$ para las bolas, $p = 10/3$ para los rodillos.

2.6.1.1.7. Cargas en corredera inferior

En la corredera inferior se presenta un estado de carga similar a la corredera superior sumado el peso de las de las guías exteriores de ambas correderas, los elementos normalizados (pernos, prisioneros, etc.), las perillas y cilindro de movimiento, su disposición se muestra en la Figura IV.1. del anexo IV.

En la Figura 2.22. se muestra el diagrama de fuerzas de la corredera inferior en sus respectivas vistas, es necesario determinar las fuerzas P_3, P_4, P_5 y P_6 , para ello se analizará las vistas b) y c) de la figura anterior de manera separada. Los pesos representados W_1 y W_2 pertenecen a los rieles de que proporcionan la carrera y las perillas para el movimiento de la corredera inferior y superior con sus respectivos mecanismos.

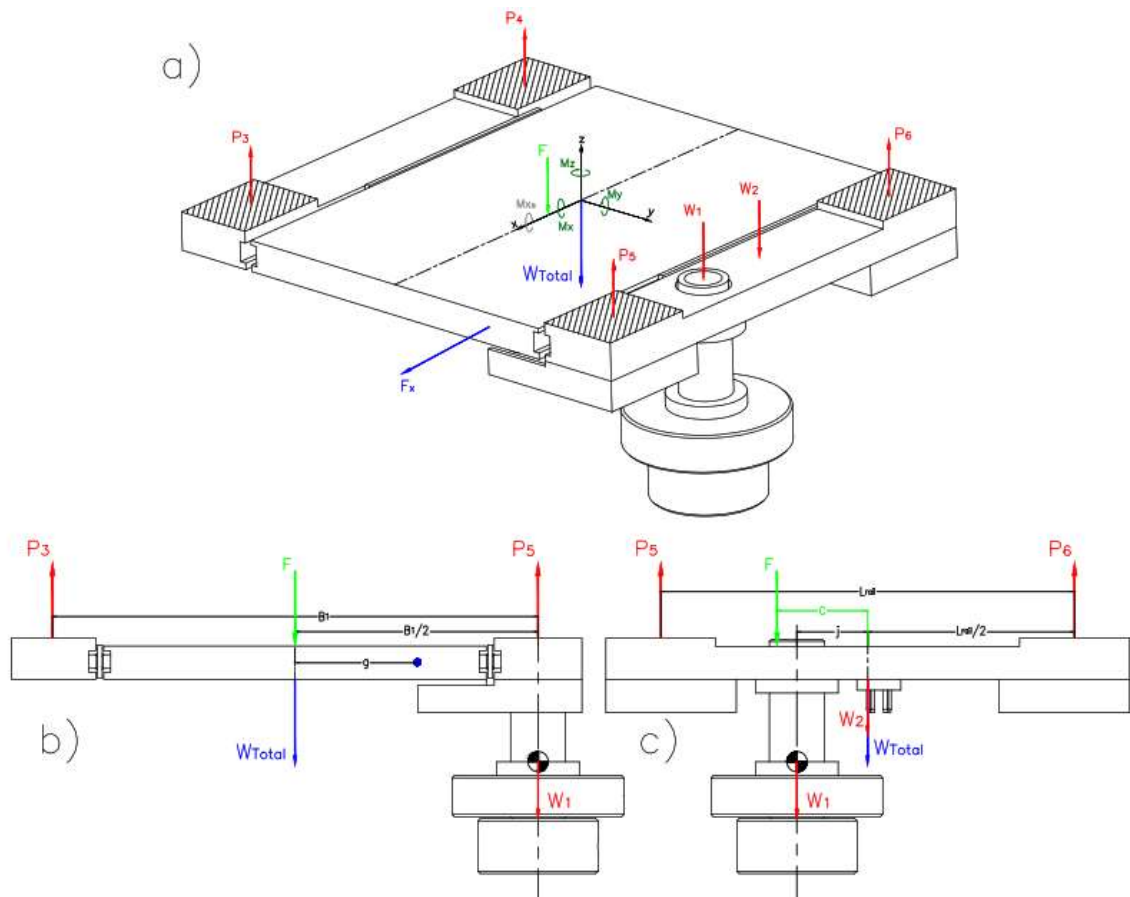


Figura 2.22. Corredera inferior: a) vista isométrica, b) vista frontal, c) vista lateral.

Vista b): se realiza la sumatoria de fuerzas y de momentos.

$$\Sigma F_z = P_3 + P_5 - \frac{W_{Total} + W_1 + W_2 + F}{2} = 0 \quad (2.16.)$$

$$\Sigma M_0 = P_3 \left(\frac{B_1}{2} \right) - P_5 \left(\frac{B_1}{2} \right) + (W_1 + W_2) \left(\frac{B_1}{2} \right) + M_{xs} = 0 \quad (2.17.)$$

Al combinar ambas ecuaciones me da como resultado:

$$P_5 = \frac{W_{Total}}{4} + \frac{F}{4} - \frac{3}{4}(W_1 + W_2) + \frac{M_{xs}}{B_1}$$

Vista c):

$$\Sigma F_z = P_5 + P_6 - \frac{W_{Total} + W_1 + W_2 + F}{2} = 0$$

$$\Sigma M_0 = P_5 \left(\frac{L_{rail}}{2} \right) - P_6 \left(\frac{L_{rail}}{2} \right) - Fc - W_1(j) = 0$$

Al combinar ambas ecuaciones me da como resultado:

$$P_5 = \frac{W_{Total}}{4} + \frac{F}{4} + \left(\frac{1}{4} + \frac{j}{L_{rail}}\right)W_1 + \frac{W_2}{4} + \frac{Fc}{L_{rail}}$$

La resultante de la reacción P_5 es la suma de las ecuaciones obtenidas anteriormente para la vista b) y c), de la misma manera se obtiene los valores de las reacciones restantes:

$$P_3 = \frac{W_{Total}}{4} + \frac{F}{4} + \frac{j}{2L_{rail}}W_1 + \frac{Fc}{2L_{rail}} - \frac{M_{xs}}{2B_1} \quad (2.18.)$$

$$P_4 = \frac{W_{Total}}{4} + \frac{F}{4} - \frac{j}{2L_{rail}}W_1 - \frac{Fc}{2L_{rail}} - \frac{M_{xs}}{2B_1} \quad (2.19.)$$

$$P_5 = \frac{W_{Total}}{4} + \frac{F}{4} + \left(\frac{L_{rail} + j}{2L_{rail}}\right)W_1 + \frac{W_2}{2} + \frac{Fc}{2L_{rail}} + \frac{M_{xs}}{2B_1} \quad (2.20.)$$

$$P_6 = \frac{W_{Total}}{4} + \frac{F}{4} - \left(\frac{L_{rail} + j}{2L_{rail}}\right)W_1 + \frac{W_2}{2} - \frac{Fc}{2L_{rail}} + \frac{M_{xs}}{2B_1} \quad (2.21.)$$

Donde:

$$W_{Total} = W_{placa} + 45,6$$

$$F = W_{placa} + 32,2$$

$$W_1 = 2,06[N] ; \quad W_2 = 0,414[N]$$

c : es la carrera de la corredera inferior [m]

Por lo tanto, los momentos resultantes debido a las reacciones P_3 , P_4 , P_5 y P_6 considerando la situación de mayor carga (cuando la carrera de la corredera es máxima).

Por otro lado, el valor de 45.6 [N] del peso W_{Total} , corresponde al valor de los elementos adicionales de las correderas que son normalizados o que no requieren de cálculos para ser definida su geometría.

Con respecto al momento en Z de la corredera inferior se calcula de la misma manera que la corredera superior:

$$F_{x_1} = 4 * \mu * F_{n_1} = 4 * 0,004 * \sqrt{(P_3 + P_4)^2 + [(P_3 + P_4) + F_{pr}]^2} \quad (2.22.)$$

$$F_{x_2} = 4 * \mu * F_{n_2} = 4 * 0,004 * \sqrt{(P_5 + P_6)^2 + [(P_5 + P_6) + F_{pr}]^2} \quad (2.23.)$$

$$M_{zi} = (F_{x_1} + F_{x_2}) * g \quad (2.24.)$$

Donde:

$g = 0.04 [mm]$: Representa la distancia desde el centro de masa hasta el punto de aplicación de la fuerza necesaria para deslizar la placa sobre su respectiva corredera, ver Figura 2.22. Al igual que el apartado anterior los momentos en Z son muy pequeños, prácticamente despreciables, mientras que los momentos M_{xi} y M_{yi} son significativa. El peso total (W_{Total}) antes definido pertenece a la carga y peso de las correderas superior e inferior con su respectivas piezas y accesorios. Los pesos W_1 y W_2 pertenecen a las perillas y guías para mecanismo de avance en dicho eje adicionado el peso de sus accesorios.

Al igual que en el apartado anterior, la fuerza resultante para la corredera inferior se obtiene con la ayuda de la ecuación 1.17. y 1.18.:

$$F_{comb} = |F_y| + |F_z| + \left(\left| \frac{2000M_x}{B_1} \right| + \left| \frac{6000M_y}{L_T} \right| + \left| \frac{6000M_z}{L_T} \right| \right)$$

$$F_{res} = F_{comb} + F_{pr}$$

Del mismo modo que la corredera superior se calculó la vida útil en kilómetros con la ayuda de la ecuación 2.15.

Un factor importante es la temperatura a la que están sometidos los elementos, se realiza el estudio con la jaula de Nylon (poliamida PA-66), por ser el elemento que soporte menos temperatura con relación al resto de componentes. Se seleccionó este material por sus propiedades mecánicas y físicas detalladas en la Tabla 2.41.

Tabla 2.41. Propiedades mecánicas del Nylon (PA-66)

Material	Densidad gr/cm ³	Punto de fusión °C	Temperatura máxima utilización continua °C	Temperatura mínima utilización continua °C	Alargamiento a rotura %	Resistencia a rotura Kg/cm ²
POLIAMIDA PA-66	1,15	250	89	-30	25	700

(Fuente: [37])

Para definir la temperatura máxima de trabajo se realiza las mediciones empíricamente con una termocupla y comprueba simulando con el software ANSYS, en donde la temperatura máxima a la que se llega en la zona de medición es de 250°C (véase la Figura 2.23.). Se determina que la temperatura máxima de trabajo del nylon para la cual la corredera no tenga problemas bordea los 120°C.

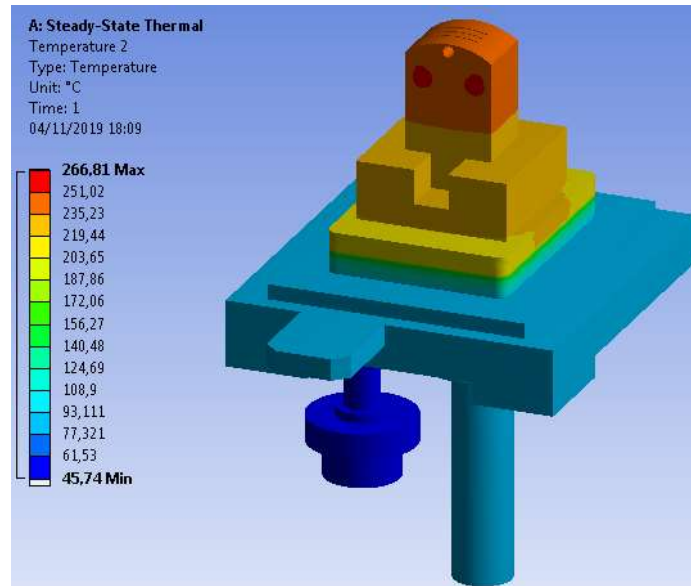


Figura 2.23. Transferencia de calor del equipo sometido a 250 °C en las resistencias tipo cartucho.

Una vez determinado todas las ecuaciones que me permitan determinar las cargas y los momentos presentes en ambas correderas se procede a escoger el valor de la carrera y la longitud del riel adecuados con la ayuda de la Tabla 2.42, el material que se utilizara mayormente es el aluminio y en menor medida el acero (solo en las pistas y esferas).

Tabla 2.42. Resultados para diferentes carreras y longitudes de riel.

Carrera (S) [mm]	L_{rail} [mm]	L_{cage} [mm]	z	$F_{res_s,máx}$ [N]	$F_{res_i,máx}$ [N]	$F. Seguridad$ s_o	L_{ns} [km]
40	100	76	11	249,44	289,28	3,71	581,09
60	112	82,8	12	265,89	337,14	3,18	367,09
80	124	82,8	12	290,17	391,79	2,74	233,91
100	136	82,8	12	316,04	445,63	2,41	158,96
120	148	89,6	13	326,95	478,36	2,24	128,51

Se selecciona una carrera de 100 [mm] y una longitud del riel de 136 [mm], dimensiones con las que se obtiene un factor de seguridad aceptable de 2.13 y una vida útil de aproximadamente 159 [km]. La longitud total de cada corredera será de 166 [mm] con una carrera que va desde -50 [mm] hasta 50 [mm].

Debe considerarse que ambas correderas se diseñaron con igual dimensionamiento ya que sus respectivas cargas no presentan una diferencia significativa una con otra, en la Tabla 2.43. se muestra los valores de las cargas y momentos para el valor seleccionado.

Tabla 2.43. Valores resumidos para carrera y longitud de riel seleccionado.

M_{xi} [Nm]	1,91	M_{xs} [Nm]	1,7
M_{yi} [Nm]	2,93	M_{zs} [Nm]	0,17
M_{zi} [Nm]	-0,24	W_{total} [N]	49,37
P_1 [N]	14,84	W_{placa} [N]	3,77
P_2 [N]	14,84	F_{x_total} [N]	5,92
P_3 [N]	22,18	F_{y_total} [N]	5,41
P_4 [N]	8,65	F_{z_total} [N]	85,75
P_5 [N]	35,25	$C_{o,effslide}$ [N]	1072,5
P_6 [N]	19,67	$C_{effslide}$ [N]	683,78
L_T [m]	0,075		

2.6.1.1.8. Mecanismo de avance: corredera superior

Anteriormente se mencionó la necesidad de un avance suave, es decir, que su avance sea relativamente reducido. Para lograr el objetivo de esta sección se hará uso de un mecanismo de piñón – cremallera, el mismo debe precisar un paso adecuado como se mencionó en las especificaciones técnicas y una carrera completa de 100 mm, a continuación, se muestra un esquema referente., ver Figura 2.24.

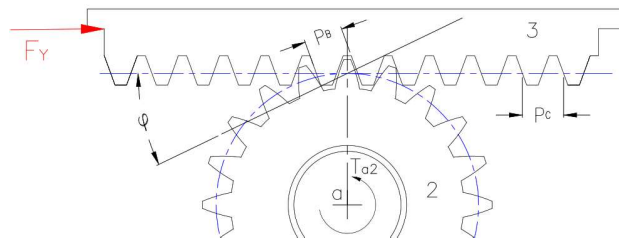


Figura 2.24. Conjunto piñón – cremallera.

El ángulo de acción φ es igual a 20° y la fuerza F_y es la calculada anteriormente. A continuación, se realiza el diagrama de fuerzas, ver Figura 2.25.:

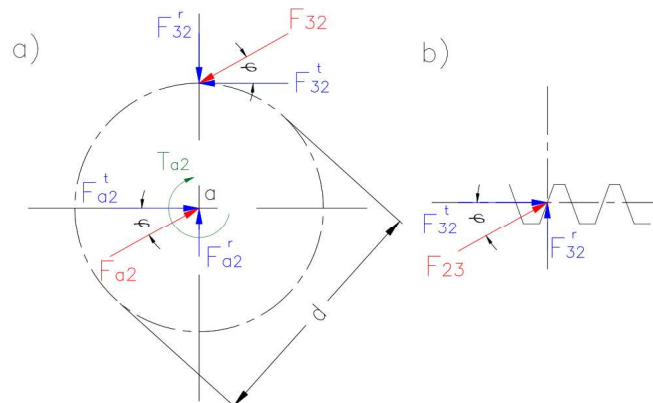


Figura 2.25. Diagrama de fuerzas del piñón y cremallera.

La fuerza F_Y que impulsa la placa de la corredera superior es la siguiente:

$$F_Y = F_{23}^t = 5,41 [N] \quad (2.25.)$$

El torque necesario para mover la corredera

$$T_{a2} = F_{32}^t \frac{d}{2} = F_Y \frac{d}{2} \quad (2.26.)$$

Ya que el conjunto posee velocidades: tanto de línea de paso como velocidad angular muy bajas se considera un diseño netamente estático, sin consideraciones dinámicas, de esta manera se establece el esfuerzo de flexión en el diente con la ayuda de la ecuación 2.27. [30]:

$$\sigma = \frac{W^t P}{F Y} \quad (2.27.)$$

Donde:

$W^t = F_Y$: carga sobre el diente en el eje tangente

$P = \pi / p$: paso diametral ($p = \pi m$ es el paso circular)

Y : Factor de flexión del diente (no considera los esfuerzos de contacto o compresión) es igual a: $2xP/3$, el parámetro x se calcula en la ecuación 2.28.

$$x = \frac{t^2}{4l} \quad (2.28.)$$

Donde:

$t = \frac{p}{2}$: Espesor del diente

$l = h_{diente} - c$: Es la altura del diente menos su claro (El claro $c = 0.25m$)

Datos obtenidos se obtienen a partir de la Tabla V.1. del anexo V.

De esta manera se obtiene un valor de $Y = 0,21$, cabe mencionar que este valor tiene relación directa con el número de diente ($N = 9$ [dientes]).

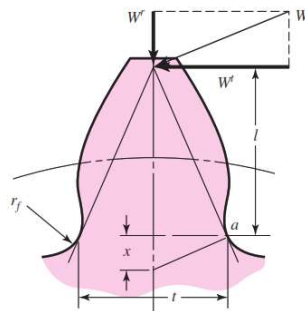


Figura 2.26. Dimensiones típicas del diente.
(Fuente: [30])

F : Ancho de cara del diente (para un engrane recto es recomendable de 3 -5 veces el paso circular).

$$F = 10 [mm]$$

En la siguiente Tabla 2.44. se resume los cálculos obtenidos:

Tabla 2.44. Resultados para el avance en corredera superior.

Módulo	diametro de paso [mm]	Giro necesario °	Torsión [Nm]	Esfuerzo flexión [kPa]
0,5	4,5	12,73	0,01	5,15
0,6	5,4	10,61	0,01	4,29
0,7	6,3	9,09	0,02	3,68
0,8	7,2	7,96	0,02	3,22
0,9	8,1	7,07	0,02	2,86
1	9,0	6,37	0,02	2,58

El módulo elegido es de $m=0,7$, la columna concerniente al giro necesario hace referencia al desplazamiento angular en grados (°) de la perilla necesario para alcanzar la mínima carrera requerida en la Tabla 2.1. de las especificaciones técnicas de 0,5 [mm]. Ver Figura 2.27.

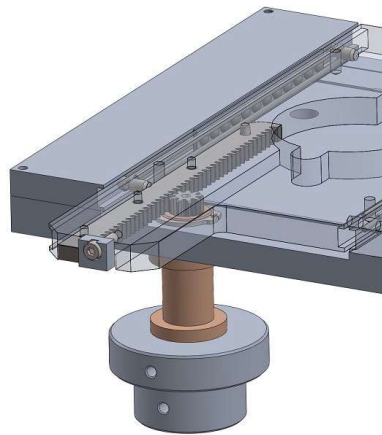


Figura 2.27. Mecanismo de avance: corredera superior.

2.6.1.1.9. Mecanismo de avance: corredera inferior

Para el mecanismo de recorrido de la corredera inferior se adaptó un mecanismo de cuerda de dial, la cuerda se enrolla y se tensa en el cilindro, a medida que este se enrolla en el mismo por un lado se desenrolla y por el otro se enrolla provocando una fuerza que acarrea en cuerpo. Generalmente este tipo de sistemas son usados en radios antiguos para cambiar las emisoras, en la Figura 2.28. se esquematiza el sistema.

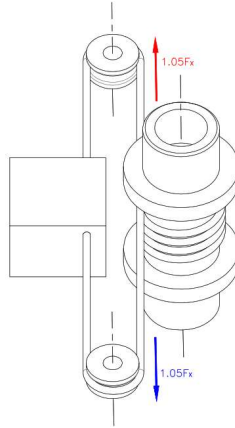


Figura 2.28. Conjunto: poleas – cuerda dial.

Para determinar las fuerzas que intervienen en la en proceso es necesario considerar un elemento diferencial de la cuerda, donde: dS es la fuerza diferencial de centrífuga, dN es la fuerza normal entre la banda y el cilindro, fdN es la fricción en la zona de deslizamiento y $d\theta$ es el desplazamiento diferencial sobre la zona de contacto. Ver Figura 2.29.

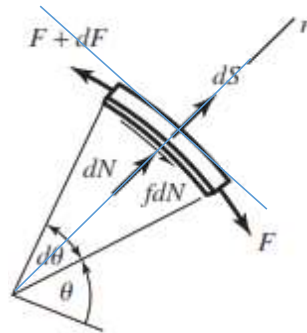


Figura 2.29. Elemento diferencial de la cuerda.
(Fuente: [30])

Si realizamos la suma de las fuerzas sobre el eje radial se obtiene:

$$dS = (mrd\theta)r\omega^2 = mr^2\omega^2 d\theta = mV^2 d\theta = F_c d\theta \quad (2.29.)$$

$$\sum F_r = -(F + dF) \frac{d\theta}{2} - F \frac{d\theta}{2} + dN + dS = 0 \quad ; \quad dN = Fd\theta - dS \quad (2.30.)$$

En la ecuación 2.30. reducida no se considera los términos de orden superior.

Combinando la ecuación 2.31. y ecuación 2.32. y multiplicando por el coeficiente de fricción f . Tenemos la ecuación 2.33.

$$fdN = fFd\theta - fdS = fFd\theta - fmr^2\omega^2 d\theta \quad ; \quad dF = fdN \quad (2.31.)$$

$$\frac{dF}{d\theta} - fF = -fmr^2\omega^2 \quad (2.32.)$$

La solución de la ecuación 2.32 está en la ecuación 2.33.:

$$F = A \cdot \exp(f\theta) + mr^2\omega^2 \quad (2.33.)$$

La única variable en la ecuación es el desplazamiento angular θ , por tanto, al evaluar en cero la constante de integración A , se escribe en la ecuación 2.34.:

$$A = F_2 - mr^2\omega^2 \quad (2.34.)$$

Donde:

F_2 : es la fuerza de tensión de deslizamiento a la salida de la polea, ver Figura 2.30.

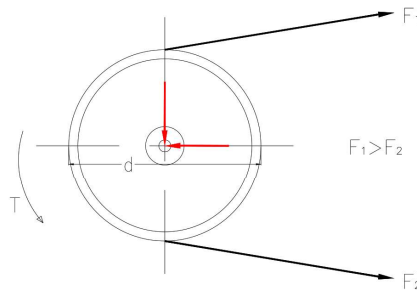


Figura 2.30. Distribución de fuerzas en el cilindro.

La fuerza $F_1 > F_2$ ya que la potencia empieza a transmitirse desde la parte superior y termina de transmitirse en la parte de abajo, reemplazando valores y reduciendo la expresión anterior se obtiene la ecuación 2.35.:

$$F_1 - F_2 = (F_1 - F_c) \frac{\exp(f\theta) - 1}{\exp(f\theta)} = \frac{T}{d/2} \quad ; \quad F_c = mr^2\omega^2 \quad (2.35.)$$

Donde:

$f\theta$: Factor de fricción para una longitud de deslizamiento, sus valores se presentan en la Tabla VIII.2. del anexo VIII.

T : Torsión de potencia transmitida.

Un parámetro importante para tomar en cuenta en la tensión inicial en la cuerda antes de aplicar una potencia al sistema definida en la ecuación 2.36.:

$$F_i = \frac{F_1 + F_2}{2} - F_c = \frac{T \exp(f\theta) + 1}{d \exp(f\theta) - 1} \quad (2.36.)$$

Combinando la ecuación 2.42. y ecuación 2.43. se obtienen las fuerzas F_1 y F_2 , ver la ecuación 2.37 para el cálculo de tensiones en bandas y cuerdas [30].

$$F_1 = F_c + F_i \frac{2 \exp(f\theta)}{\exp(f\theta) + 1} \quad ; \quad F_2 = F_c + F_i \frac{2}{\exp(f\theta) + 1} \quad (2.37.)$$

Para este caso, la fricción f será igual a 0.4 que es la fricción típica de la cuerda con el material del cilindro, el parámetro d se variara hasta encontrar el más adecuado, al igual que el número de vueltas θ de la cuerda sobre el cilindro, este último necesario para evitar que la rodadura no se transmita.

Unas consideraciones a tomar en cuenta son: se multiplico la fuerza F_x por un 5% de la misma con el fin cubrir pérdidas por fricción elasticidad de la cuerda y se desprecia la fuerza centrífuga F_c , dado que las velocidades son irrelevantes.

$$F_x = 5,92 * 1,05 = 6,22 [N] \quad ; \quad F_x = F_1$$

En la Tabla 2.45. se presenta los resultados del mecanismo de la corredera inferior.

Tabla 2.45. Resultados mecanismo de avance: corredera inferior.

Numero de vuelta	d [mm]	Fi [N]	F2 [N]	Torsión [Nm]	Paso [mm/vuelta]
1	10	3,36	0,50	0,03	31,42
1	12	3,36	0,50	0,03	37,70
1	14	3,36	0,50	0,04	43,98
2	16	3,13	0,04	0,05	50,27
2	18	3,13	0,04	0,06	56,55

Así pues, para un diámetro de 16 mm del cilindro es necesario una un giro aproximado de 4° para obtener la tolerancia de movimiento expuesta en la Tabla 2.1. de especificaciones técnicas.

2.6.1.2. Establecimiento de los radios de curvatura

Los radios de curvatura permiten establecer un rango aceptable de deformación de la probeta, estas dimensiones juegan un rol importante en el radio de curvatura llegando a un mínimo respecto a la longitud de su correspondiente semicircunferencia, por tanto, su radio está dado por la ecuación 2.38.:

$$r_{min} = \frac{L_p}{\theta} \quad ; \quad r_{min} = 6,42 [mm] \quad (2.38.)$$

Donde:

$L_p = 20 \pm 0,2 [mm]$: Longitud mínima de la probeta.

$\theta = \pi [rad]$: Desplazamiento angular.

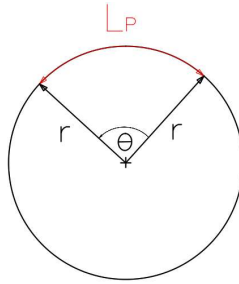


Figura 2.31. Longitud de arco.

Del mismo modo, es necesario establecer un radio de curvatura máximo previo al estado plano o curvatura infinita, el radio seleccionado es el siguiente:

$$r_{m\acute{a}x} = 40 \text{ [mm]}$$

Los requerimientos del diseñador de la Tabla 2.1. (especificaciones técnicas) pide un número determinado de 14 radios de curvatura (7 en compresión y 7 a tracción) por lo que se desea determinar 7 radios de curvatura orientados de manera cóncava hacia abajo y cóncavo hacia arriba, ver Figura 1.21.

$$\Delta = \frac{40 - 6.4}{6} = 5,6 \text{ [mm]}$$

Por lo tanto, los radios de curvatura establecidos son:

$$r_1 = 6,40 \text{ [mm]}$$

$$r_2 = 12,0 \text{ [mm]}$$

$$r_3 = 17,6 \text{ [mm]}$$

$$r_4 = 23,2 \text{ [mm]}$$

$$r_5 = 28,8 \text{ [mm]}$$

$$r_6 = 34,4 \text{ [mm]}$$

$$r_7 = 40,0 \text{ [mm]}$$

Se debe tomar en cuenta que los radios especificados serán utilizados para los dos estados de prueba del material, se adiciona un bloque cuya superficie de prueba sea plana tal como se indica en las especificaciones técnicas.

Por otro lado, para asegurar una superficie de prueba adecuada para el tamaño de las probetas se establece una profundidad del bloque de 30 [mm] y la longitud del arco variara respecto al radio de este, pero no menos de $30 \pm 0,2$ [mm] que es la longitud del juego de probetas de mayor longitud.

2.6.2. Módulo 2: Calentamiento y control

En la presente sección se diseña el conjunto de elementos pertenecientes al módulo 2.

2.6.2.1. Posición del calentador

La posición óptima del calentador insertado en los bloques de curvatura se analizará mediante simulaciones térmicas por método de elementos finitos con la ayuda del software ANSYS v18.2 en su complemento Workbench bajo criterios especificados a continuación:

- La simulación se la realiza en un modelo 2D con el fin de minimizar el costo computacional y el tiempo empleado, con un perfil de un bloque de curvatura cóncavo hacia abajo. Sin embargo, todos los bloques presentan dimensiones similares en ancho, profundidad y forma de sujeción por lo que se tomó un bloque cualquiera para el análisis.
- El tipo calentador empleado es una resistencia térmica de cartucho de diámetro 3/8"; suponiendo que el calentador eleva la temperatura de manera homogénea.
- La calidad de mallado se verifica a través de los siguientes parámetros: calidad del elemento (min > 30%, promedio > 85%), relación de aspecto (min ≥ 1 , máx ≤ 5) y oblicuidad/ asimetría (valores aceptables $\leq 0,25$).
- Los elementos de la malla son: hexaedros y tetraedros de 8 y 6 nodos respectivamente, adicionalmente su refinamiento es mayor en sus puntos críticos donde se presenta mayor posibilidad de error.
- El error en la convergencia de la temperatura especialmente del perfil de la zona de prueba es mínima, aun así, se considera un cambio permisible del 5% para cada refinamiento y número máximo de bucles igual 4, el punto de partida para el refinamiento es el criterio anterior.

El análisis se centra en la posición de orificio para el calentador desde el centro del radio de curvatura hasta su extremo con variaciones de 4 [mm], en la Figura 2.32. se muestra con más detalle el propósito.

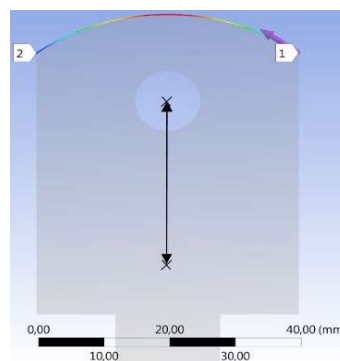


Figura 2.32. Posición de un calentador.

En la Figura 2.33. es la gráfica de variación de temperatura en función de la longitud del arco de curvatura (≥ 30 mm, representados por las líneas verticales rojas).

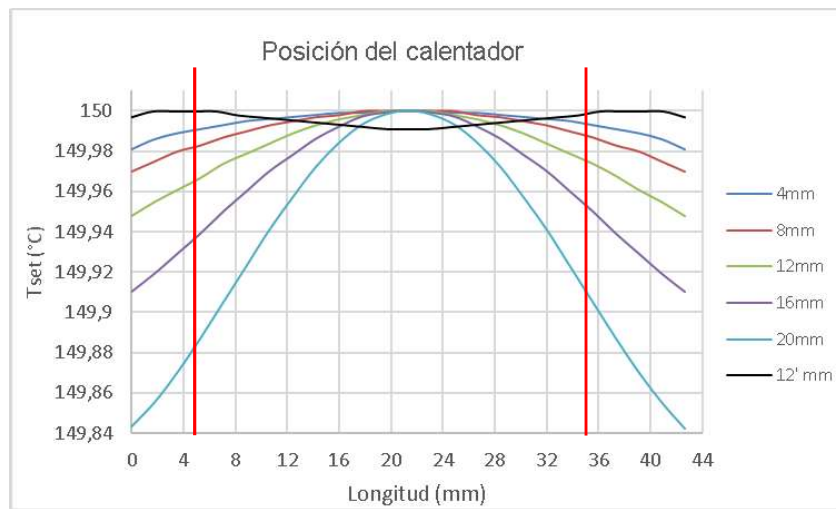


Figura 2.33. Posición del calentador.

En conclusión, a medida que el orificio se acerca al centro del radio de curvatura de la superficie de prueba la variación en los límites establecidos es menor, no obstante, si se aumenta el número de calentadores a dos el error se reduce tal como se muestra en la curva de color negro para una distancia de 12 [mm]. Ver Figura 2.34.

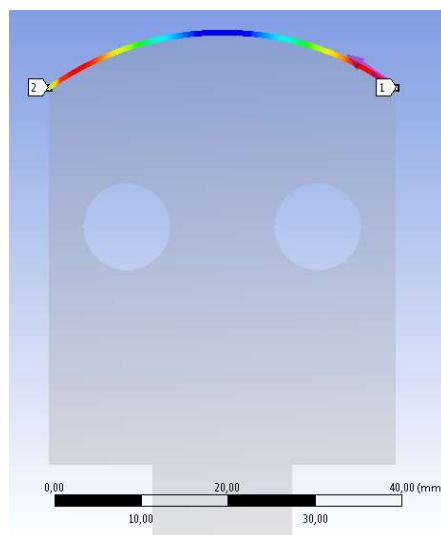


Figura 2.34. Posición para dos calentadores.

2.6.2.2. Potencia de los calentadores y espesor del aislamiento térmico

En la sección anterior se definió el número y la posición de los calentadores de tal forma que la variación de la temperatura en la superficie de prueba sea mínima, en esta sección

se analizara la potencia requerida de calentamiento para alcanzar la máxima temperatura de trabajo (250°C) empleando métodos de elementos finitos en ANSYS/Workbench v18.2, del mismo modo que el apartado anterior se analizara los criterios de la simulación a continuación:

- Se trata de una simulación de estado estable de un modelo 3D que represente la geometría hasta ahora definida con sus respectivos materiales.
- Para el caso, se determina la generación volumétrica interno de calor estableciendo sus respectivas condiciones de borde.
- Se hace la suposición que el calentador eleva la temperatura de manera homogénea.
- La calidad de mallado se verifica a través de los siguientes parámetros: calidad del elemento (min > 30%, promedio > 85%), relación de aspecto (min ≥ 1 , máx ≤ 5) y oblicuidad/ asimetría (valores aceptables $\leq 0,25$)
- Los elementos de la malla son: hexaedros de 20 nodos, tetraedros de 10 nodos, prisma triangular de 15 nodos y prisma piramidal de 13 nodos, su refinamiento es mayor en sus puntos críticos donde se presenta mayor posibilidad de error.
- El error en la convergencia de la temperatura especialmente del perfil de la zona de prueba es mínima, aun así, se considera un cambio permisible del 5% para cada refinamiento y número máximo de bucles igual 4, el punto de partida para el refinamiento es el criterio anterior.

Los parámetros térmicos para la simulación se muestran en la Figura 2.35.:

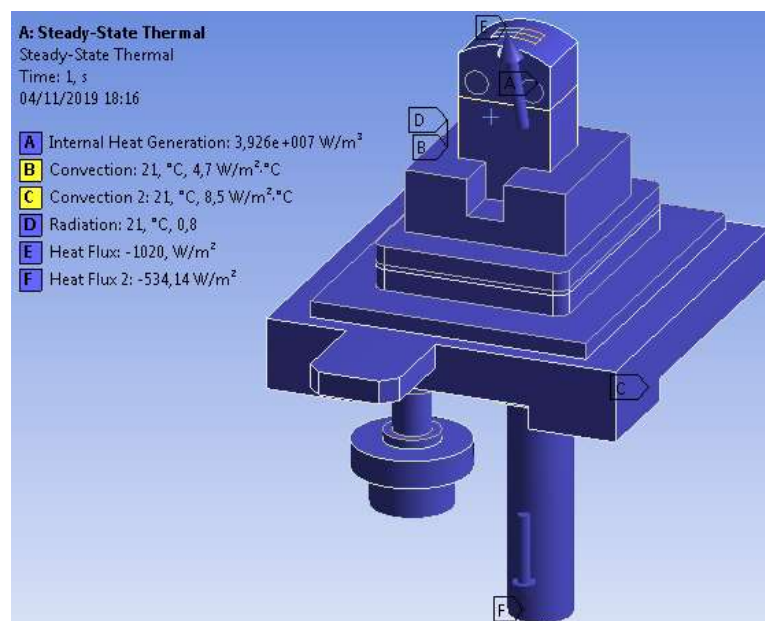


Figura 2.35. Parámetros de simulación.

Los coeficientes de convección de $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ representan la transferencia de calor por convección con el ambiente dentro y fuera de la caja de acrílico respectivamente, adicionalmente existe transferencia de calor por radiación cuya emisividad corresponde a un cuerpo de aluminio opaco, sus valores referenciales se presentan en la Tabla IX.1 y Tabla IX.2. del anexo IX.

Por otro lado, también se considera una transferencia de calor por conducción de 1020 W/m^2 y $534,14 \text{ W/m}^2$ hacia el sujetador de la probeta y el bastidor respectivamente, como se muestra en la Figura 2.35.

$$q_1^- = 1020 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 2 \times 10^{-4} \text{m}^2 \quad ; \quad q = 0,204 [\text{W}]$$

$$q_2^- = 534,14 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0,01143 \text{m}^2 \quad ; \quad q = 6,11 [\text{W}]$$

Las áreas equivalentes a $2 \times 10^{-4} \text{m}^2$ y $0,01143 \text{m}^2$ representa el contacto que existe entre el área de prueba y el bastidor con el sólido simulado respectivamente, tal como se muestra en la Figura 2.35.

El volumen de contacto de cada resistencia de cartucho se detalla en la ecuación 2.39.:

$$V_{calentador} = \frac{\pi}{4} * 0,01008^2 * 0,03 * 2 = 4,79 \times 10^{-6} [\text{m}^3] \quad (2.39.)$$

La generación volumétrica necesaria para conseguir una temperatura de 250°C arrojado por la simulación es la siguiente, se debe tomar en cuenta que la generación detallada equivale a los dos calentadores:

$$\frac{Q}{V} = 3,926 \times 10^7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$$

Por lo tanto, la potencia necesaria para llegar al límite deseado es la siguiente:

$$\text{Potencia} = \frac{3,926 \times 10^7}{2} * 4,79 \times 10^{-6} = 94,03 [\text{W}]$$

El resultado muestra una potencia mínima de 94,03 vatios por cada resistencia, en la Figura 2.36. se muestra los resultados arrojados por la simulación, se consideró una distribución de puntos de sondeo de la Figura 1.20a).

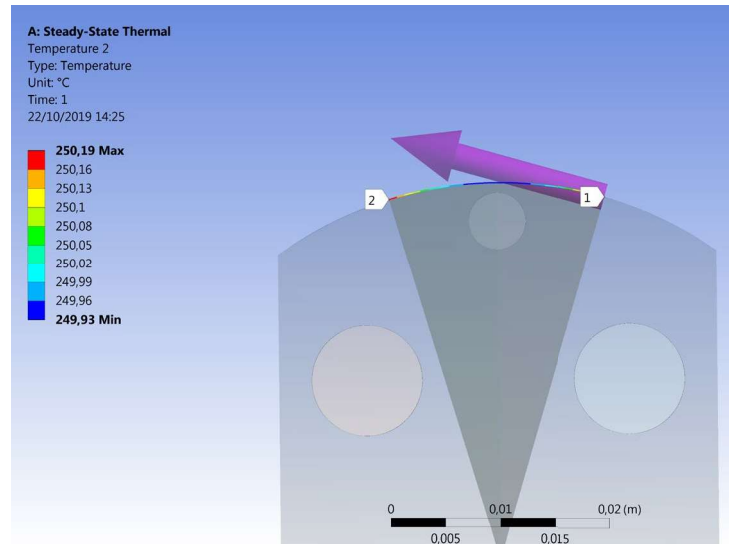


Figura 2.36. Temperatura en la zona de prueba: modelo 3D.

En donde los valores de temperatura en los distintos puntos están dados en la Tabla 2.46.

Tabla 2.46. Temperatura en los distintos puntos en la simulación.

Temperatura									
pt100	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉
249,94	249,93	249,901	249,885	250,162	250,191	250,167	250,166	250,19	250,16

Las resistencias térmicas de cartuchos con dimensiones adecuadas que se pueden encontrar en el mercado se presentan en la Tabla 2.47.:

Tabla 2.47. Resistencias térmicas de cartucho 3/8".

Ø	Longitud		230V./ 240 V.
	m/m.	Pulg.	Watts
10	30	1 1/4"	80-100-150-200
3/8"	40	1,5"	80-100-120-160-200-250-315
	50	2"	100-125-160-175-200-250-315-400
	60	2,5"	125-160-180-200-250-315-400-500
	80	3"	125-160-180-200-220-250-280-315-400-500-630
		3 1/4"	125-160-180-200-250-315-400-500-315
	100	4"	160-200-220-250-280-315-350-400-500-560-630-700-850
	130	5"	280-315-350-400-500-630-750
		5 1/4"	280-315-350-400-500-630-750
	160	6"	350-400-500-630-750-800
		6,5"	350-400-500-630-750-800
	180	7"	350-400-500-630-750-800-900
	200	8"	350-400-500-630-750-800-900-1000
	250	10"	400-500-630-750-800-900-1000

(Fuente: [38])

Por otro lado, con la ayuda de la simulación también se pretende establecer el espesor del aislamiento, el mismo consta de un conjunto combinado de bakelita y asbesto/amianto (este último usado para aumentar la temperatura máxima de operación del conjunto) tal como se muestra en la Figura 2.37.:

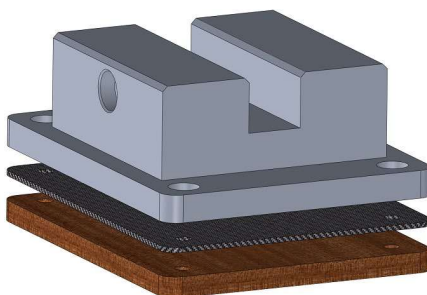


Figura 2.37. Elementos de aislamiento térmico.

Sus propiedades térmicas son las siguientes:

$$k_{bakelita} = 1,4 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad ; \quad \rho_{bakelita} = 1300 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \& \quad T_{m\acute{a}x,op} = 135[^\circ C]$$

$$k_{amianto} = 0,58 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad ; \quad \rho_{amianto} = 1920 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \& \quad T_{m\acute{a}x,op} = 800[^\circ C]$$

(Fuente: [24, p. 883])

El uso del amianto será restringido al máximo debido a sus características destructivas para la salud.

En la Figura 2.23. se muestran en el gráfico de distribución de térmica donde temperatura máxima a la que llega las perillas es 45,74°C, según el instituto nacional de higiene y seguridad en el trabajo de España (INSHT), en su normativa de NPT 524: primeros auxilios (quemadura), cita una temperatura máxima tolerable de entre 40 – 45°C (dependiendo del espesor de la piel) a la cual es posible manipular elementos sin sufrir daños, por lo tanto, los espesores adecuados para los materiales aislantes son:

$$t_{amianto} = 2 [mm]$$

$$t_{bakelita} = 11 [mm]$$

2.6.2.3. Curvas de control del sistema

Con la ayuda de los resultados de la simulación se considerará un pequeño elemento del sólido simulado, como el de la Figura 2.38. con el fin de obtener el tipo de controlador adecuado:

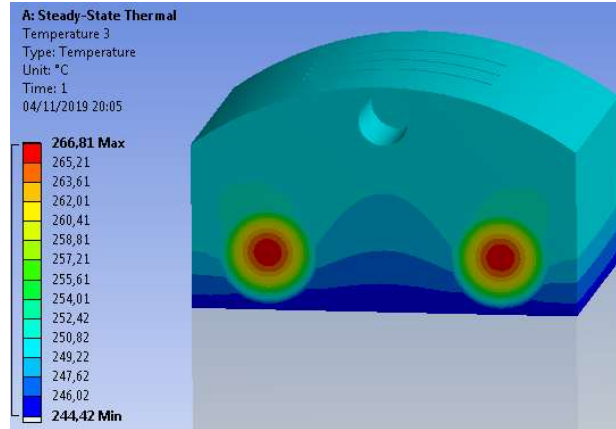


Figura 2.38. Volumen representativo de control.

Cabe destacar que la porción del sólido de simulación que se muestra en la Figura 2.38. supone un volumen isotérmico para la obtención de la función de transferencia del sistema, las condiciones del proceso se muestran en la Figura 2.35.

$$Q_{ent} - Q_{sal} = c_p m \frac{dT}{dt} \quad (2.40.)$$

El calor que entra es igual a la generación volumétrica, el calor se ha dividido en cinco calores de salida. Ver ecuación 2.41 y 2.42.

$$Q_{sal} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_{rad} \quad (2.41.)$$

$$q_1 = \frac{T(t) - T_{amb}}{R_1} ; q_2 = \frac{T(t) - T_{amb}}{R_2} ; q_3 = \frac{T(t) - T_{amb}}{R_3} ; q_4 = \frac{T(t) - T_{amb}}{R_4} \quad (2.42.)$$

Reemplazando la ecuación 2.41 en la 2.42 se tiene:

$$q_{gen} - (T(t) - T_{amb}) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) - \sigma \varepsilon A (T(t)^4 - T_{amb}^4) = c_p m \frac{dT}{dt}$$

Reemplazando las resistencias térmicas por un coeficiente global de transferencia de calor se tiene la ecuación 2.43. y 2.44:

$$q_{gen} - (T(t) - T_{amb})U - \sigma \varepsilon A (T(t)^4 - T_{amb}^4) = c_p m \frac{dT}{dt} \quad (2.43.)$$

$$Q_{ent} = q_{gen} + (T_{amb} * U) + (T_{amb}^4 * \sigma \varepsilon A) \quad (2.44.)$$

Reemplazando en la ecuación 2.43. se tiene la siguiente expresión:

$$Q_{ent} - (T(t)U + \sigma \varepsilon A T(t)^4) = c_p m \frac{dT(t)}{dt} \quad (2.45.)$$

Dado que el calor que sale no es una ecuación lineal es necesario linealizarla con la ayuda de las series de Taylor:

$$Q_{sal} = T_{(t)}U + \sigma \varepsilon AT_{(t)}^4 \quad (2.46.)$$

$$L(T) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(T_o)}{n!} (T - T_o)^n, \text{ ecuación lineal } n = 1, L(T) = f(T_o) + f'(T_o)(T - T_o) \quad (2.47.)$$

Donde:

$$\left(\frac{dQ_{sal}}{dT} \right)_{T=T_o} = U + 4\sigma \varepsilon AT_o^3$$

Al reemplazar en la ecuación 2.46. se tiene que:

$$Q_{sal} = Q_{sal}(T_o) + (U + 4\sigma \varepsilon AT_o^3)(T - T_o)$$

$$Q_{sal} = Q_{sal}(T_o) + B(T - T_o); \quad B = U + 4\sigma \varepsilon AT_o^3$$

Reemplazando en la ecuación 2.40.:

$$Q_{ent} - [Q_{sal}(T_o) + B(T - T_o)] = c_p m \frac{dT_{(t)}}{dt}; \quad C_T = c_p m$$

Variables de desviación:

$$Q_{ent} = Q_{ent} - Q_{sal}(T_o); \quad T_{(t)} = T - T_o$$

Por lo tanto, la expresión final esta expresado en la Ecuación 2.48.

$$Q_{ent} - BT_{(t)} = C_T \frac{dT_{(t)}}{dt} \quad (2.48.)$$

Aplicando la transformada de Laplace y simplificando la ecuación se tiene que la función de transferencia es la siguiente:

$$G(s) = \frac{1}{C_T s + B} \quad (2.49.)$$

Donde:

$$R_n = \frac{1}{h_n A_n}; \quad h_1 = h_2 = 4,7 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]; \quad h_3 = h_4 = 8,5 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]; \quad U = \sum \frac{1}{R_n}$$

$$A_1 = 3,64 \times 10^{-3} [m^2]; A_2 = 2 \times 10^{-4} [m^2]; A_3 = 0,0114 [m^2]; A_4 = 0,019 [m^2]$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]; \varepsilon = 0,8; A = A_1; C_p = 880 \left[\frac{J}{kgK} \right]$$

A continuación, se implementa un lazo cerrado del sistema a partir de su correspondiente función de transferencia mostrado en la Figura 2.39.:

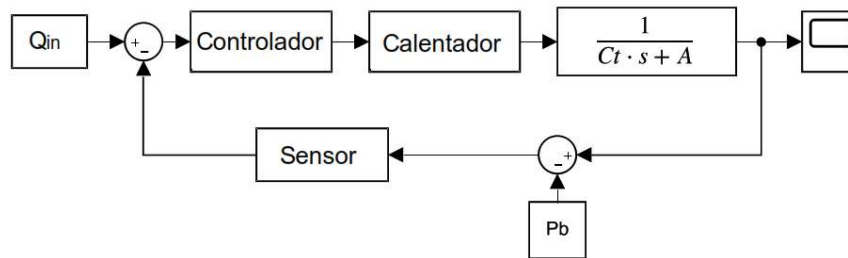


Figura 2.39. Sistema de lazo cerrado.

La constante Pb representa el gradiente de temperatura que existe desde la localidad de la pt100 a la zona de medición su valor es de $0,46^\circ\text{C}$ arrojado por la simulación en ANSYS.

El sensor de temperatura para la retroalimentación es una pt100 o sensor sensible de temperatura RTD, se usa en aplicaciones con rangos de trabajo relativamente bajos. El rango de trabajo va desde los -200°C a 649°C , Las características están representados en la Tabla X.1. del anexo X.

Con la ayuda de la aplicación Tuner App de simulink se realiza la sintonización de los controladores PID, PI y PD para el sistema, ver Figura 2.40.:

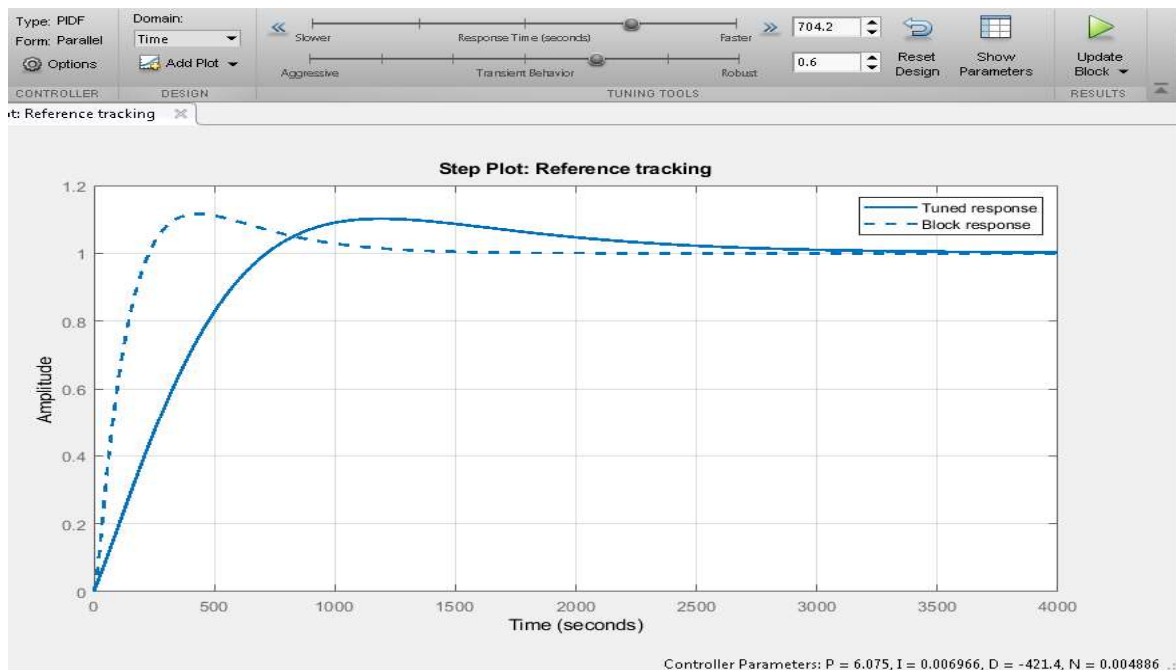


Figura 2.40. Sistema de lazo cerrado.

Las curvas características de calentamiento para cada controlador con una temperatura de trabajo $T_o = 250^{\circ}\text{C}$ se presentan a continuación en la Figura 2.41.:

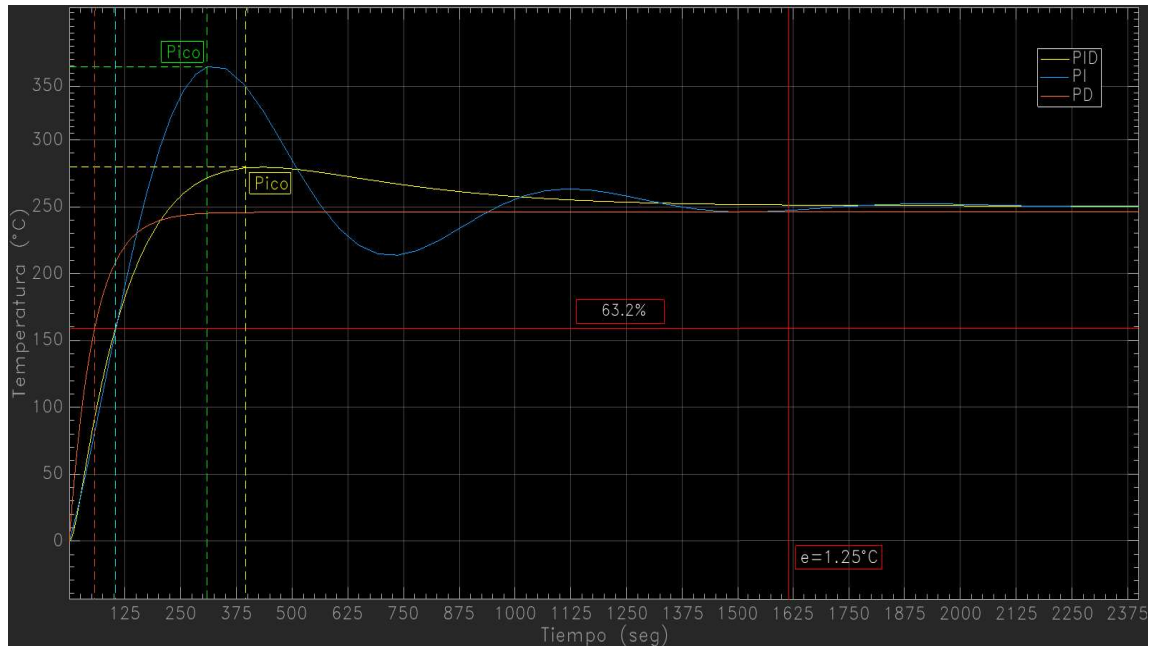


Figura 2.41. Curvas de estabilidad para controlador: PID, PI y PD.

Las mejores condiciones de estabilización presentan el controlador PID el cual mantiene un pico y un tiempo de estabilización relativamente menores, con respecto al controlador PI presenta resultados aceptables pero su sobre impulso y su tiempo de estabilización es mayor que él PID. Para el controlador PD presenta características de estabilización muy buenas, pero, bajo las mismas condiciones del sistema no logra llegar al punto de trabajo (T_o).

El error aceptable para el sistema en estado estable se analiza a continuación, para un error máximo es de 0.5% FS presente en la Tabla 2.1 se tiene que:

$$T_{(ts)} = 0,005 * 250 = 1,25^{\circ}\text{C}$$

En la Tabla 2.48. se presenta las respuestas para cada controlador:

Tabla 2.48. Resultados de curvas de control del sistema.

	Temperatura pico ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo pico (seg)	Constante de tiempo τ (seg)	$Ts_{0,5\% \text{ FS}}$ (seg)
PID	279,5	415,6	104,4	1616
PI	355,5	330,8	104,4	1647
PD	N/A	N/A	79,02	1,3E4

En conclusión, es necesario implementar un controlador PID para el calentamiento del sistema.

En la Tabla 2.49. se muestra los parámetros de cada controlador arrojados por Simulink de Matlab:

Tabla 2.49. Parámetros de los controladores.

	P	I	D
PID	19,081	0,048	-202,533
PI	10,654	0,154	N/A
PD	40,307	N/A	3

2.6.3. Módulo 3: Posicionamiento de los contactos eléctricos

2.6.3.1. Diseño del elevador

El mecanismo de elevación me permite variar la altura de las correderas ancladas al mismo de manera estable y precisa, está conformada de un eje cuya geometría de la sección no permita rotaciones sobre su cavidad y un tornillo de potencia, a continuación, se determinan las fuerzas y torques actuantes.

2.6.3.1.1. Cálculo del eje de elevación

El eje de elevación estará sometido a cargas de flexión, torsión y compresión generadas por los momentos, peso y fuerzas en las correderas, especialmente en la corredera inferior, es indispensable que sus movimientos sean únicamente de manera axial sin permitir movimientos rotacionales, en la Figura 2.42. se muestra el modelo.



Figura 2.42. Modelo del eje elevador.

No obstante, el maquinado de cavidades prismáticas con tolerancias reducidas representa un gran reto, en la Figura 2.43. se presenta la geometría del eje que pretende simplificar dichos inconvenientes.

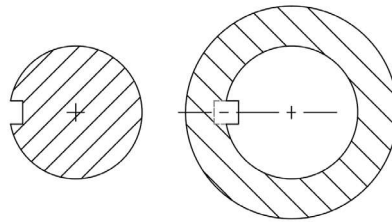


Figura 2.43. Sección transversal del eje elevador.

La forma circular del eje y el agujero es fácilmente reproducible en una máquina – herramienta incluso con tolerancias estrechas al igual que su muesca.

La Figura 2.44. muestra las fuerzas y torque que actúan sobre el cuerpo, el sistema de coordenadas se ubicó en el punto B en donde se presenta los mayores esfuerzos.

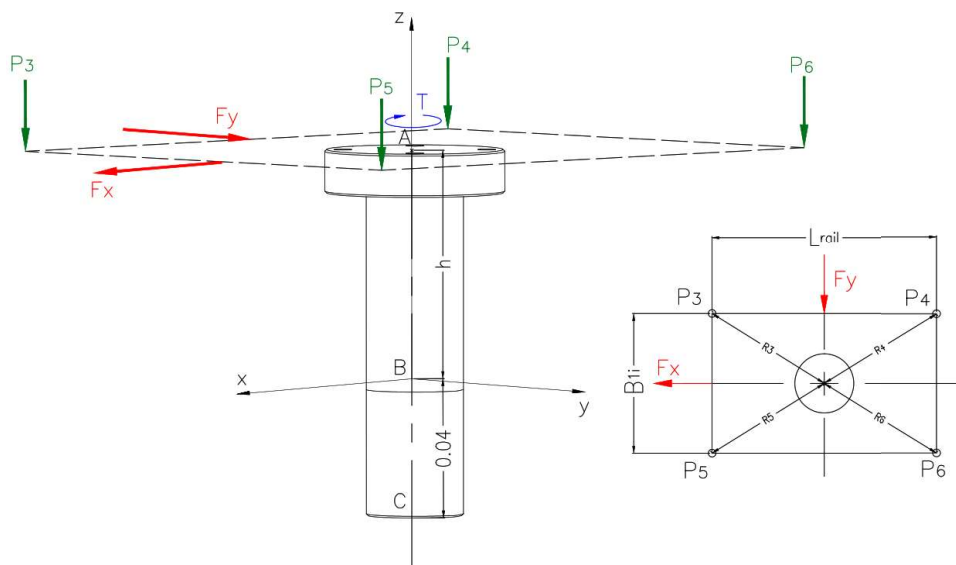


Figura 2.44. Fuerzas actuantes eje elevador.

A continuación, se determinan de manera vectorial las cargas y momentos actuante sobre el elemento, los datos necesarios para el cálculo esta detallado en la Tabla 2.43.:

$$T = M_{zs} + M_{zi} = -0,07 \text{ [Nm]} \quad (2.50.)$$

Se debe considerar que:

$$\vec{M} = \vec{r} \otimes \vec{F} \quad (2.51.)$$

Forma vectorial de las fuerzas:

$$\vec{P}_3 = 0 \vec{i} + 0 \vec{j} - P_3 \vec{k}$$

$$\vec{P}_4 = 0 \vec{i} + 0 \vec{j} - P_4 \vec{k}$$

$$\vec{P}_5 = 0\vec{i} + 0\vec{j} - P_5\vec{k}$$

$$\vec{P}_6 = 0\vec{i} + 0\vec{j} - P_6\vec{k}$$

Forma vectorial de las posiciones:

$$\vec{r}_3 = \frac{L_{rail}}{2}\vec{i} - \frac{B_{1i}}{2}\vec{j} + h\vec{k}$$

$$\vec{r}_4 = -\frac{L_{rail}}{2}\vec{i} - \frac{B_{1i}}{2}\vec{j} + h\vec{k}$$

$$\vec{r}_5 = \frac{L_{rail}}{2}\vec{i} + \frac{B_{1i}}{2}\vec{j} + h\vec{k}$$

$$\vec{r}_6 = -\frac{L_{rail}}{2}\vec{i} + \frac{B_{1i}}{2}\vec{j} + h\vec{k}$$

Los momentos resultantes están dados por la ecuación 2.52. [28]:

$$\vec{M} = \frac{B_{1i}}{2}(P_3 + P_4 - P_5 - P_6)\vec{i} + \frac{L_{rail}}{2}(P_3 + P_5 - P_4 - P_6)\vec{j} + 0\vec{k} \quad (2.52.)$$

Donde:

$h = 0,062[m]$: es la suma de la carrera máxima y el espesor de la brida de ajuste.

$$M_x = -1,73 [Nm]$$

$$M_y = 1,98 [Nm]$$

Diagrama de cortante y momento flector:

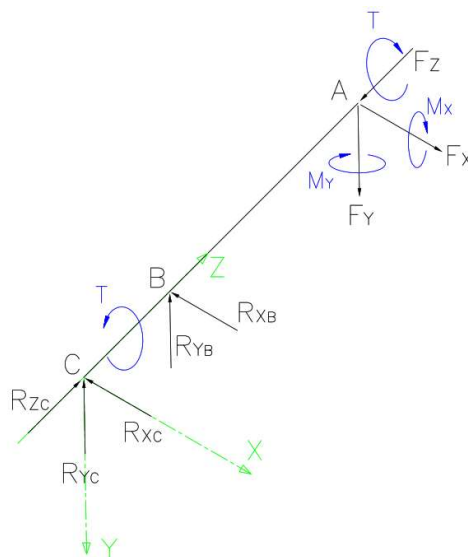


Figura 2.45. Reacciones y momentos del eje.

- Diagramas en plano XZ

$$+\uparrow \Sigma F_X = 0 \quad (2.53.)$$

$$F_X - R_{X_C} - R_{X_B} = 0$$

$$+\cup \Sigma M_B = 0 \quad (2.54.)$$

$$F_X h + M_Y + R_{X_C}(0,04) = 0$$

Al combinar las ecuaciones 5.53 y 5.54 determinadas anteriormente se obtiene:

$$R_{X_B} = 64,6 [N]$$

$$R_{X_C} = -58,68 [N]$$

En la Figura 2.46. se presenta los diagramas de esfuerzo cortante, momento flector y torsión en el plano XY.

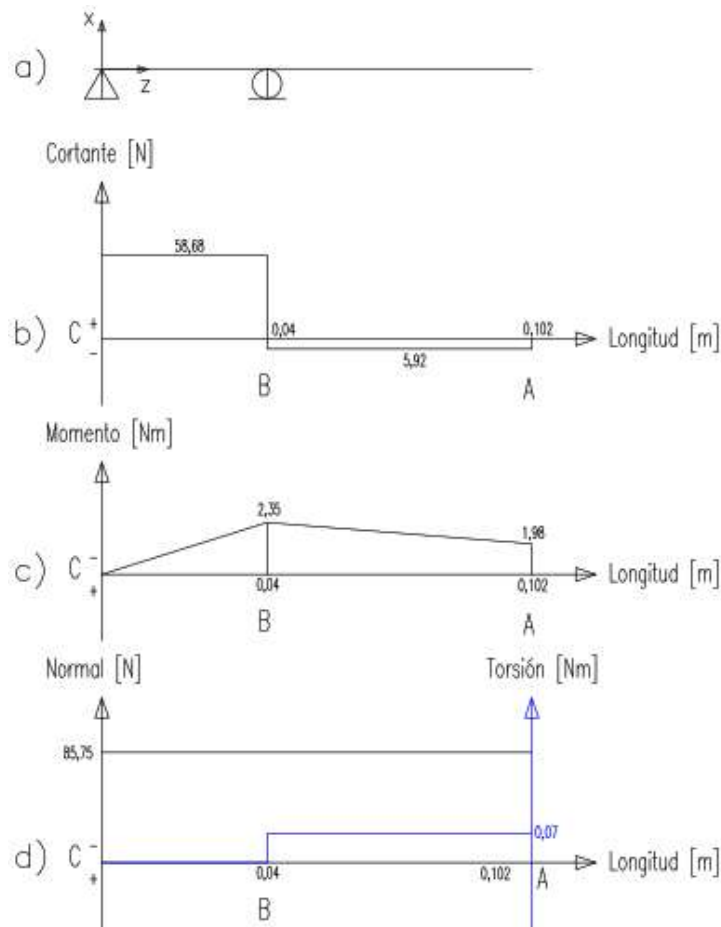


Figura 2.46. Diagramas en el plano XZ: a) Restricciones, b) fuerza cortante, c) momento flector y d) normal y torsión.

- Diagramas en plano YZ

$$+\uparrow \Sigma F_Y = 0$$

$$F_Y - R_{Y_C} - R_{Y_B} = 0$$

$$+\cup \Sigma M_B = 0$$

$$F_Y h - M_X + R_{Y_C}(0,04) = 0$$

Al combinar las ecuaciones determinadas anteriormente se obtiene:

$$R_{Y_B} = 57,05[N]$$

$$R_{Y_C} = -51,64 [N]$$

En la Figura 2.47. se presenta los diagramas de esfuerzo cortante, momento flector y torsión en el plano YZ.

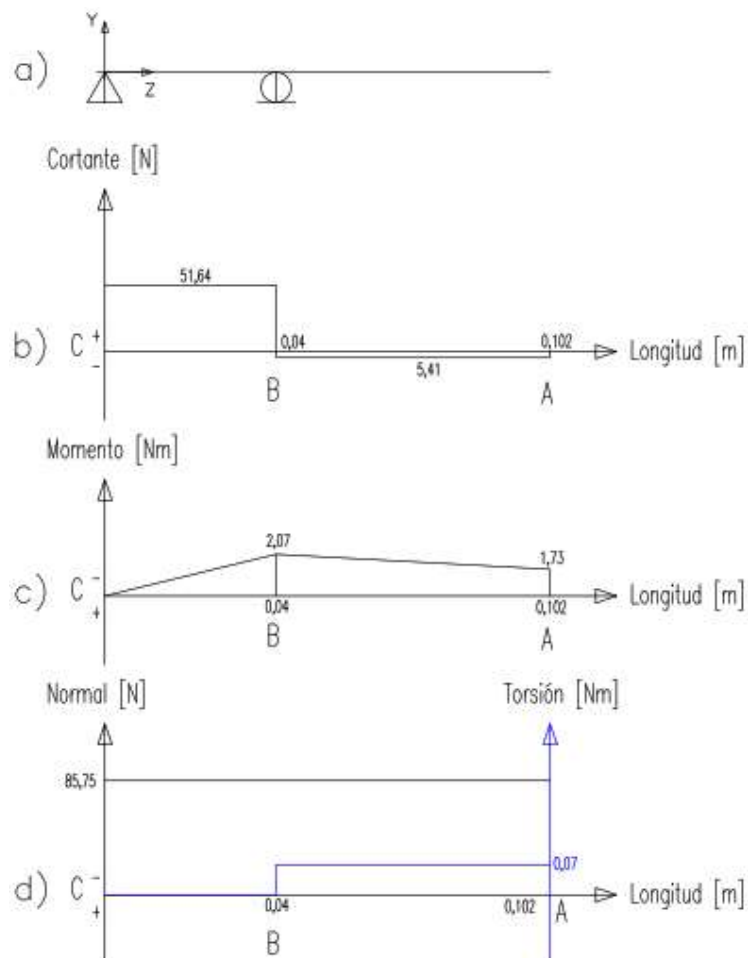


Figura 2.47. Diagramas en el plano YZ: a) Restricciones, b) fuerza cortante, c) momento flector y d) normal y torsión.

En conclusión, los mayores momentos para ambos planos se dan en el punto B, y el momento máximo se presenta en el plano XZ con un pico igual a $M_{m\acute{a}x} = 2,35 [Nm]$ y un cortante máximo de $V_{m\acute{a}x} = 58,68 [N]$.

- Flexión en dos planos

El esfuerzo máximo de flexión presente en el elemento debido a los momentos en X y Y se analizan de manera combinada con la ayuda de la ecuación 2.64. [30] y la Tabla VII.1 del anexo VII:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{32}{\pi d^3} (M_x^2 + M_y^2)^{1/2} ; S_y \geq \sigma_{m\acute{a}x} * FS \quad (2.55.)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo a tracción debido a momentos en X y Y

La Tabla 2.50. muestra los valores de momentos en X y Y, los esfuerzos máximos debido a la influencia de dichas cargas y su correspondiente factor de seguridad para diseño estático en función de su respectiva altura h y el diámetro del elemento

Tabla 2.50. Resultados de diseño de eje elevador.

		Diámetro $d [mm]$	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	F. Seguridad FS
$h [m]$	0,062	21	3,44	68,31
$M_x [Nm]$	-2,07	24	2,31	101,73
$M_y [Nm]$	2,35	27	1,62	145,06
$F_x [N]$	5,92	30	1,18	199,15
$F_y [N]$	5,41	33	0,89	264,04

A continuación, se determina la carrera en la siguiente expresión:

$$S_z = h - 12 = 50 [mm]$$

2.6.3.1.1.1. Criterio de Euler

El elemento también está sometido a esfuerzos de compresión debido a las cargas axiales, usando la ecuación 2.56. [30]. del criterio de Euler modificado para columnas de longitud intermedia con cargas centradas es posible determinar el diámetro con respecto a las cargas de compresión:

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \left(\frac{S_y h}{2\pi k} \right)^2 \frac{1}{CE} \quad (2.56.)$$

Donde:

P_{cr} : Es la carga crítica cuando el elemento se vuelve inestable

$$P_{cr} = FD * F_z ; FD = 4$$

$$P_{cr} = 343 [N]$$

$k = \sqrt{\frac{I}{A}}$: Es el radio de giro, para secciones circulares $k = \frac{d}{4}$

S_y : Es el esfuerzo de fluencia para el acero AISI 1018, ver Tabla VII.1. del anexo VII.

C : Constante de condición de los extremos, para condiciones de extremos empotrado y libre su valor es de $1/4$, ver Figura VII.1, del anexo VII.

Al sustituir los valores se llega a la siguiente expresión:

$$d = \sqrt{\frac{4P_{cr}}{\pi S_y} + S_y \left(\frac{2S_z}{\pi}\right)^2 \frac{4}{E}} ; \quad h = 0,05[m]$$

$$d = 3[mm]$$

El diámetro requerido para el elemento en el diseño estático de estabilidad es bastante pequeño del valor elegido anteriormente, por lo que la posibilidad de fallo por pandeo es casi nula.

2.6.3.1.1.2. Cálculo del límite a la fatiga del eje de elevación

Se tiene un AISI 1018; donde; $S_{ut} = 58 \text{ kpsi}$ (400 MPa); $S_y = 32 \text{ kpsi}$ (220 MPa), ver en la Tabla VII.2. del anexo VII)

Para determinar el límite de resistencia corregido (límite a la fatiga), se determina por la ecuación 2.57.

$$S_e = S'_e \times k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_f \quad (2.57.)$$

Donde:

S_e : Límite de resistencia a la fatiga corregido [kpsi, MPa]

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga sin corregir (de una probeta); $S'_e = 0,5 \times S_{ut}$ (por tener un $S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi}$); [kpsi, MPa]

k_a : Factor de corrección superficial; $k_a = a * (S_{ut})^b = 0,92$, ver Tabla VII.3 del anexo VII

k_b : Factor de tamaño; $k_b = 1$ (carga axial)

k_c : Factor de confiabilidad; $k_c = 0,814$, para una confiabilidad del 99%, ver Tabla VII.4. del anexo VII

k_d : Factor de corrección por temperatura; $k_d = 1$, ver Tabla VII.5. de anexo VII

k_f : Factor de efectos diversos, se asume $k_f = 1$

q : Sensibilidad a la ranura o entalles, a flexión o carga axial; $q = 0,63$, ver Figura VII.2. del anexo VII

k_{t1} : Factor teórico de concentrador de esfuerzos a flexión o carga axial, $k_t = 2,3$, ver Figura VII.3. del anexo VII

k_{t2} : Factor teórico de concentrador de esfuerzos del chavetero, $k_{t2} = 1,6$, ver Tabla VII.6. del anexo VII

k_e : Factor de concentración de esfuerzos, donde $k_e = \frac{1}{1+q(k_t-1)}$ y $k_t = k_{t1} * k_{t2} \dots K_{tn}$

Al resolver la ecuación 2.65 se obtiene un límite de resistencia corregido de 55,71 MPa.

2.6.3.1.1.3. Cálculo de tornillo de potencia

Una vez establecido el diámetro y la carrera del eje de elevación, se diseña el tornillo de potencia que está sometido a cargas de torsión, flexión, compresión y tracción. Para ello es necesario conocer el torque necesario para levantar el bloque y si es o no auto bloqueante.

Para este caso en particular, el diámetro elegido es mayor al diámetro requerido por lo que la posibilidad de fallo es casi nula.

Con la ecuación 1.24. se tiene que el torque necesario para elevar la máquina. Para ello se realiza un diagrama de cuerpo libre para analizar las fuerzas presentes en el eje en z, ver Figura 2.48.

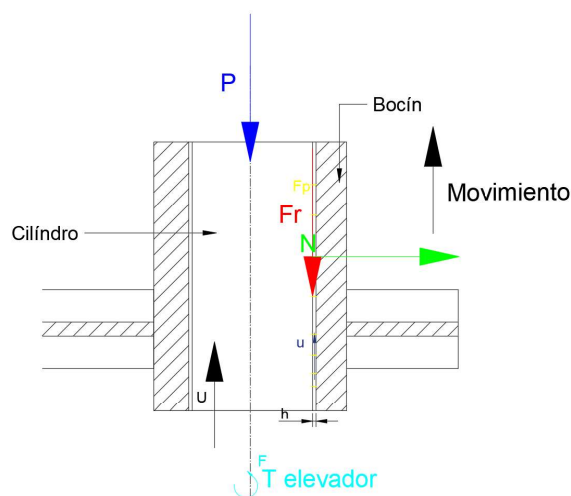


Figura 2.48. Diagrama de fuerzas en el cilindro y bocín. Como se indica en el DCL, se necesita conocer la fuerza de rozamiento para el cálculo del torque de elevación.

Para el cálculo de la fuerza de rozamiento, y suponiendo que es un flujo laminar, tenemos la ecuación 2.58. [30]

$$F_r = \mu \times A \times \frac{U}{h} \quad (2.58.)$$

$$F = 13.79 \times (2\pi(0.0135)(0.053) + 2\pi(0.0135)^2) \times \frac{0,00031}{0,000022}$$

$$F = 1,09 [N]$$

Donde:

F : Fuerza de rozamiento entre las capas del fluido [N]

A : Área de contacto entre ellas (paralela a la fuerza), [m^2]

ω : Velocidad angular [$\frac{rad}{s}$]

h : Altura del lubricante, $h: 0,022 [mm]$

μ : Viscosidad, Para un SAE 20 a temperatura ambiente, se tiene $\mu = 13.79 [Pa \times s]$; ver Figura VIII.1 del anexo VIII; $1 \text{ reyn} \cong 6895 [Pa \times s]$

U : Velocidad del cilindro [m/s] = velocidad de avance del tornillo, $U = 0,00031 [\frac{m}{s}]$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 12,57 [\frac{rad}{s}]$$

$$V_a = \frac{p * n * \omega}{60} = 0,00031 [\frac{m}{s}]$$

p : Paso $p = 0,0015 [m]$

n : Número de entradas, $n = 1$

T : Periodo, tiempo en dar una vuelta, $T = 0,5 [s]$

Las medidas del collarín se representan en la Figura 2.49.

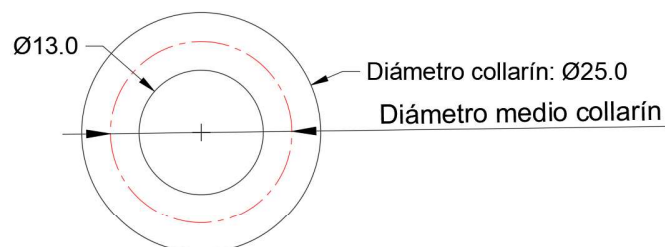


Figura 2.49. Medidas del collarín.

De la ecuación 1.21. y todos los valores obtenidos, calculamos el torque de elevación.

$$T_{\text{elevación}} = T_R + T_c = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} = 0,33136 + 0,49033$$

$$T_{\text{elevación}} = 0,82169 \text{ [Nm]}$$

Para el cálculo se selecciona rosca ACME de 10 [mm] de diámetro.

Donde:

d : Diámetro mayor, $d = 10 \text{ [mm]} = 0,01 \text{ [m]}$

p : Paso, $p = 1,5 \text{ [mm]} = 0,0015 \text{ [m]}$; ver en la Tabla VIII.1 del anexo VIII

d_m : Diámetro menor (paso), $d_m = d - \frac{p}{2} = 9,25 \text{ [mm]} = 0,00925 \text{ [m]}$

2α : Ángulo de la rosca, $\alpha = 14,5^\circ$ [30]

d_c : Diámetro medio del collarín $d_c = \frac{\phi_{\text{collarín}} - \phi_{\text{interno}}}{2} + \phi_{\text{interno}} = 19 \text{ [mm]} = 0,019 \text{ [m]}$

n : Número de entradas de la rosca, $n = 1$ (rosca simple)

l : Avance, $l = n \times p = 0,0015 \text{ [m]}$

f : Coeficiente de fricción de la rosca con grasa, $f = 0,15$, ver en la Tabla VIII.2. del anexo VIII).

f_c : Coeficiente de fricción del collarín, $f_c = 0,15$, ver en la Tabla VIII.3. del anexo VIII.

F_R : Fuerza de rozamiento, $F_R = 1,09 \text{ [N]}$

F : Fuerza de elevación, $F = P + F_r = 343 \text{ [N]} + 1,09 \text{ [N]} = 344,09 \text{ [N]}$

Adicionalmente se comprueba que el tornillo de potencia es sea auto bloqueante (no se baje por su propio peso) mediante la siguiente condición:

$$f \geq \frac{l}{\pi d_p} \cos(\alpha) \quad (2.59.)$$

$$0,15 \geq 0,05$$

Por lo tanto, el tornillo es auto bloqueante lo que impide que la máquina se desplace para abajo debido a su peso.

2.6.3.2. Posicionadores

En la Figura 2.50. se muestra en análisis vectorial de la posición del contacto eléctrico sobre la superficie de medición.

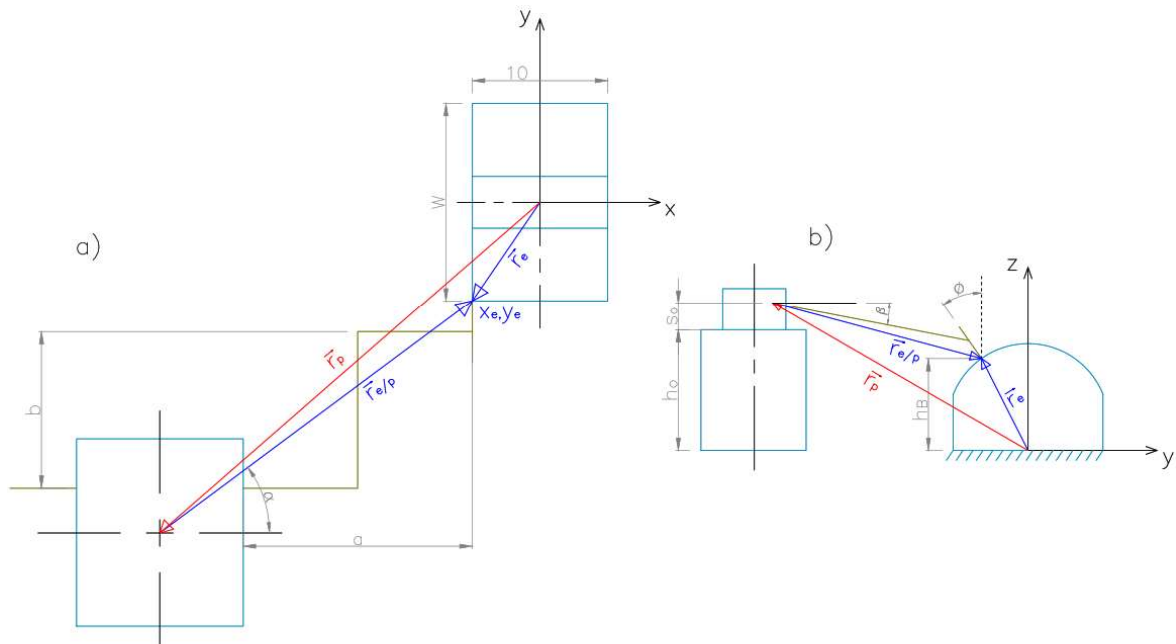


Figura 2.50. Análisis vectorial de la posición del contacto eléctrico; a) Plano xy, b) Plano yz.

Los vectores designados son calculados a continuación:

$$\vec{r}_B = -5\vec{i} - \frac{W}{2}\vec{j} + (h_B + s_B)\vec{k} \text{ [mm]} \quad ; \quad s_e = (0; 50)[\text{mm}] \quad (2.60.)$$

Vector del contacto:

$$\vec{r}_{e/p} = r_{e/p_x}\vec{i} + r_{e/p_y}\vec{j} + r_{e/p_z}\vec{k} \text{ [mm]} \quad ; \quad r_{e/p_z} = (h_B + s_B) - (h_o + s_p)[\text{mm}] \quad (2.61.)$$

En la Figura 2.51. se indica el análisis del ángulo de recorrido y longitud plana.

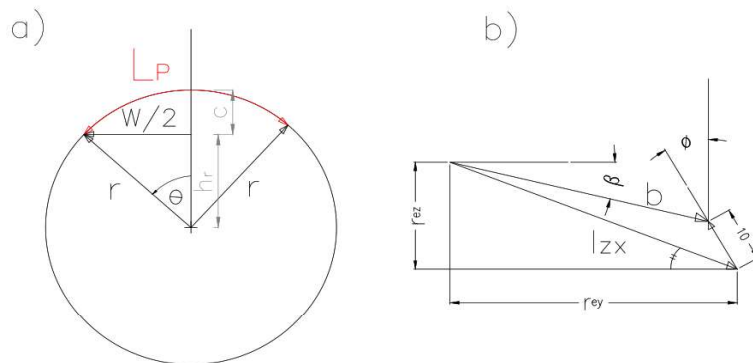


Figura 2.51. Análisis del ángulo de recorrido: a) ángulo, b) longitud plana yz.

El ángulo θ representa el desplazamiento angular necesario para cubrir la longitud de la probeta L_p , en la siguiente tabla se presenta sus valores para cada radio de curvatura:

Tabla 2.51. Desplazamiento angular para cada radio de curvatura.

$R [mm]$	θ°
6,40	90,00
12,0	47,75
17,6	32,55
23,2	24,70
28,8	19,89
34,4	16,66
40,0	14,32

Se debe tomar en cuenta que el contacto eléctrico debe situarse sobre la superficie de la probeta de manera perpendicular por lo que, el ángulo θ variara con el radio de curvatura del bloque.

$$W = 2rcos\theta \quad ; \quad c = r(1 - cos\theta)$$

$$W = 2rcos\theta \quad ; \quad c = r(1 - cos\theta) \quad (2.62.)$$

$$\hat{\alpha} = 90 + \theta + \beta \text{ (tensión)} \quad ; \quad \hat{\alpha} = 90 - \theta + \beta \text{ (compresión)}$$

Donde:

$$h_B = h_r - c$$

$$r_{e/p_y} = l_{yz} = b^2 + 10^2 - 20b * \cos(\hat{\alpha})$$

$$r_{e/p_y} = \sqrt{|\vec{r}_{e/p}| - r_{e/p_z}} \quad ; \quad \tan\alpha = \frac{r_{e/p_y}}{r_{e/p_x}}$$

La posición relativa del posicionador con respecto del bloque se define de la siguiente manera: ver Figura 2.50.

$$\vec{r}_{e/p} = \vec{r}_e - \vec{r}_p [mm]$$

En la Figura 2.52. y Figura 2.53. se presenta la posición para cada bloque de curvatura a tensión y a compresión respectivamente, al variar su ángulo θ y una inclinación de α , cada bloque será fabricado de tal forma que se ocupe la menor cantidad de material por lo que su altura h_B no será constante, en el recuadro de la segunda fila y columna se presenta su variación con respecto al radio de curvatura.

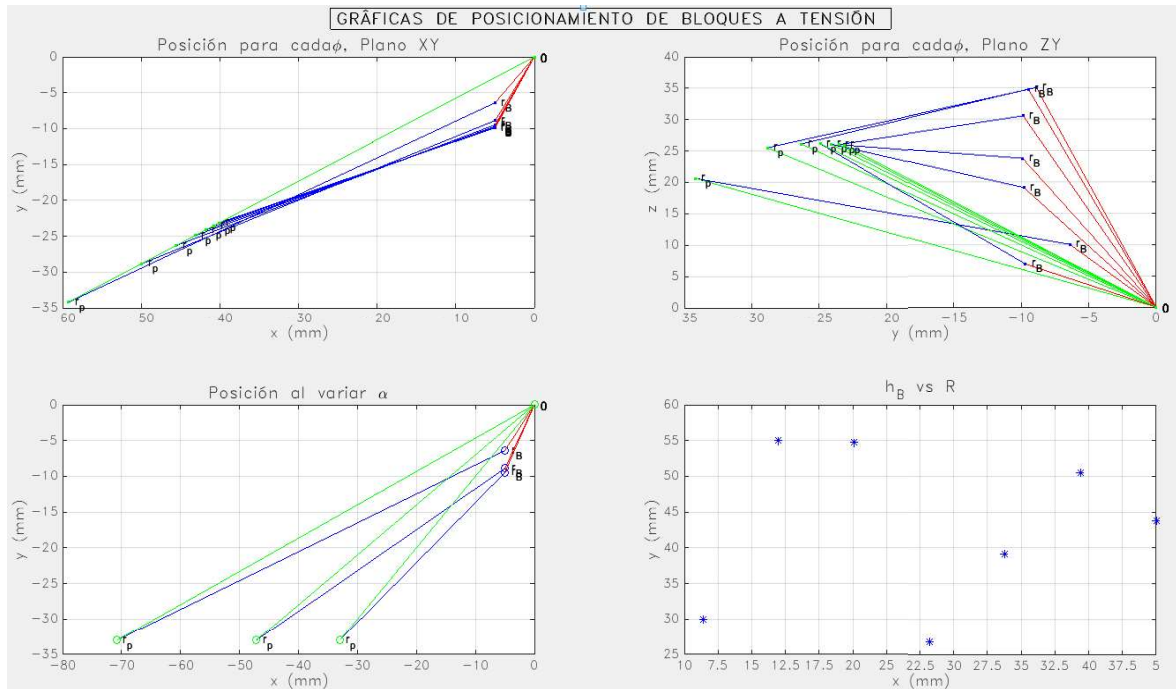


Figura 2.52. Gráficas de posicionamiento de bloques a tensión.

La máxima carrera que se requiere en total en el eje Z es de 30 mm como se muestra en la Figura 2.52. (2), del mismo modo el desplazamiento sobre el eje x oscila entre los 68 – 72 mm cuyo mayor valor corresponde una inclinación en el plano XY de 45° y un ángulo $\beta = 6^\circ$, adicionalmente el ángulo θ variara entre 14.33° a 90° para bloque de tensión y compresión. A continuación, se presenta las gráficas de posicionamiento a compresión.

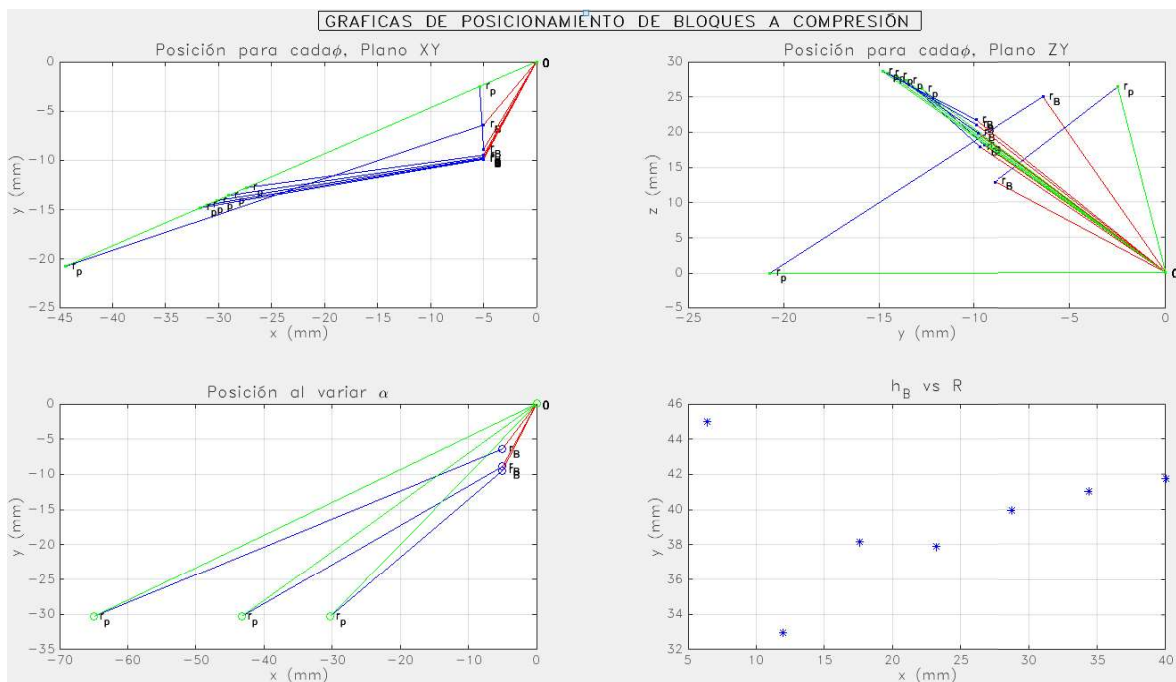


Figura 2.53. Gráficas de posicionamiento de bloques a compresión.

Los posicionadores tienen una sujeción magnética mediante un imán de neodimio, su movimiento vertical se realiza mediante un conjunto tornillo – turca, que se desliza en una corredera prismática, ver Figura 2.54. La varilla de fijación del contacto provee de estabilidad necesario para la toma de las mediciones, también proporciona una gran flexibilidad al momento de posicionar y mover los contactos.

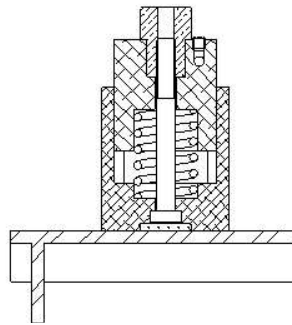


Figura 2.54. Posicionador de contactos.

En la Tabla 2.52. se puede observar algunas de las consideraciones para el posicionador:

Tabla 2.52. Características del posicionador.

Carrera	20 mm
Tipo de rosca	M6X1.0-N
Avance	1 mm/vuelta
Tipo de resorte	Alambre de piano A228 calibre 13, 10 espiras activas y paso 6mm
Imán de neodimio	Grado N52, Remanencia 1 - 1.4T, $\varnothing 16 \times 2,2$ mm

Por otro lado, el sujetador del contacto mostrado en la Figura 2.55, de igual forma proporciona una relación de 360° para maniobrar tanto en bloques cóncavos hacia arriba como cóncavos hacia abajo

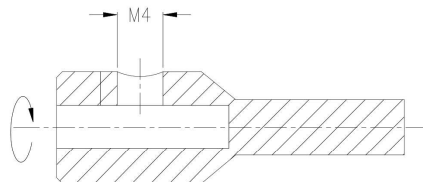


Figura 2.55. Sujetador del contacto.

La constante del resorte a compresión es calculada en la ecuación 2.63. [30]:

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3n} \quad (2.63.)$$

Donde:

$G = 79,28$ [GPa]: Es módulo de elasticidad a corte del alambre

$d = 1,3 [mm]$: Diámetro del alambre

$D = 20 [mm]$: Diámetro de la espira

$n = 10$: Número de espira

$$k = 123,89 \left[\frac{N}{m} \right]$$

Con la ayuda de la ecuación 1.21. se realiza el cálculo de la torsión:

$$T_{\text{posicionador}} = T_R + T_C = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) + \frac{F f_c d_c}{2}$$

Donde:

$$F = kx ; x = 0,02m$$

$$d_m = d_{M6} - \frac{P}{2} = 5,5 \text{ mm} ; P = 1$$

$$d_c = 9 \text{ mm} ; f_c = 0,61 ; f = 0,15$$

$$T_{\text{posicionador}} = 8,23 \times 10^{-3} [Nm]$$

Es decir, el torque necesario de para vencer al resorte es muy pequeño, cabe mencionar que el coeficiente de rozamiento f se considera para una rosca engrasada.

- Longitud desarrollada de la varilla de sujeción de los contactos

En la Figura 2.56. se presenta un diagrama de la varilla de sujeción de los contactos para su posterior cálculo de su longitud.

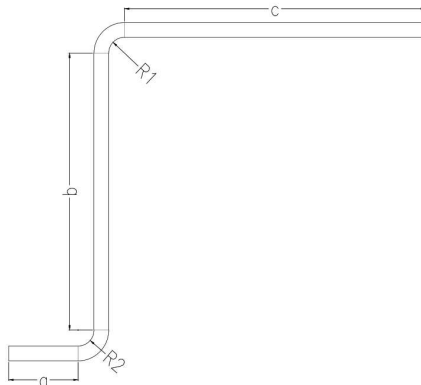


Figura 2.56. Varilla de sujeción de los contactos.

Este elemento presenta zonas dobladas para determinar la longitud necesaria con la ayuda de la ecuación 2.64.:

$$L = \frac{2\pi(R + i) \cdot \alpha^\circ}{360^\circ} \quad (2.64.)$$

Donde:

R : Radio de doblado [mm]

i : Distancia del eje neutro al exterior [mm]

α° : Ángulo de doblado, 90°

Los parámetros los valores de los radios de curvatura y longitudes de detallan a continuación:

$$R1 = R2 = 5 \text{ mm}$$

$$\emptyset = \frac{1}{8} \text{ pulg} = 3,175 \text{ mm} ; i = 1,59 \text{ mm}$$

La longitud desarrollada total de la varilla es igual a:

$$L = 2 * \frac{2\pi(5 + 1,59). \alpha^\circ}{360^\circ} + a + b + c \quad (2.65.)$$

$$L = 20,70 + 20 + 70 + 7 = 117,7 \text{ [mm]}$$

2.2. Costos

Aquí se detallan los costos de la materia prima, insumos, elementos normalizados y mano de obra y con ello obtener el costo total de la máquina.

La construcción de la máquina se la realizó en la metalmecánica de San Bartolo por lo que los costos de mano de obra (a excepción del corte por chorro y corte por plasma) corresponde a la experticia de sus colaboradores.

2.2.1. Costos de Insumos

Los insumos corresponden a los materiales que no se pueden encontrar bajo una norma de elemento mecánico o sus especificaciones requieren un ítem aparte. Ver Tabla 2.53.

Tabla 2.53. Costos de insumos.

Especificación	Cantidad	Unidad	Costo unit. [\$]	Total [\$]
Cinta térmica 1 cm de ancho (5 m)	1	u	\$ 5,00	\$ 5,00
Fresa acabado HSS+Co 4L 6mm Youfeng	1	u	\$ 6,83	\$ 6,83
Juego de machuelos HSS M6x1,0 BP	1	u	\$ 14,90	\$ 16,69
Controlador de temperatura SSK + Display	1	u	\$ 47,50	\$ 49,48
PT100 sonda - 20 A a 420°C	1	u	\$ 15,17	\$ 15,80
Fresa 16 mm HSS + Co	1	u	\$ 18,90	\$ 21,17
Cable flexible	4	u	\$ 0,17	\$ 0,76
Fresa KEX 6 mm	1	u	\$ 5,32	\$ 5,81
Fresa frontal 4 Labios HSS M2 CH 16 mm	1	u	\$ 18,78	\$ 18,78
Disco de corte industrial line norton 76x1x10	2	u	\$ 2,34	\$ 4,69
Fresa frontal 4 labios HSS M2 CH 3 mm.	1	u	\$ 3,08	\$ 3,08
Resistencias tipo cartucho	2	u	\$ 15,00	\$ 33,60
Contacto ohmico	4	u	\$ 25,00	\$ 100,00
Imán de neodimio diametro 16x2,20 mm	4	u	\$ 2,35	\$ 9,40
			TOTAL	\$ 291,09

2.2.2. Costos de materiales

En la Tabla 2.54. se detallan los costos de los materiales para la construcción de la máquina.

Tabla 2.54. Costos de materiales.

Parte	Especificación	Cantidad	Unidad	Costo unif. [\$]	Total [\$]
Carcasas inferior del posicionador	Barra cuadrada de duraluminio de 50 x 50 mm	0,176	kg	\$ 106,40	\$ 20,97
Carcaza móvil del posicionador	Barra cuadrada de duraluminio de 40 x 40 mm	0,152	kg	\$ 80,00	\$ 13,62
Sujetador depl bloque de curvatura	Plancha de duraluminio lisa 10 mm	2,2	kg	\$ 10,00	\$ 19,96
Base de soporte mayor	Plancha en pedazo L/C 4mm (plasma)	4,16	kg	\$ 1,50	\$ 6,99
Perilla en mov. en x	Barra de aluminio puro diametro 2"	0,054	kg	\$ 83,93	\$ 5,08
Bloque rigizador	Plancha de duraluminio lisa 3 mm (80x70)	0,4	kg	\$ 10,00	\$ 4,48
Perilla reguladora de posicionador	Bronce Fosfórico 3/4"x120 mm	1	kg	\$ 7,80	\$ 6,99
Pieza A	Eje acero de transmisión 2" x 60 mm	1	kg	\$ 1,76	\$ 1,97
Cilindro B para sopote de PT-100	Eje de acero de transmisión 3/4" x 50 mm	1	kg	\$ 0,25	\$ 0,28
Base de soporte menor	Plancha de ac A-36 430x350 e 5 mm, 2 de 172x225 e 5, 265x170 e 5	4	kg	\$ 1,75	\$ 7,84
Pieza B	Eje acero de transmisión 1" x 35 mm	1	kg	\$ 0,35	\$ 0,39
Soporte de calentador PT-100	Planca de acero A-36 285x80 mm espesor 3 mm	0,5	kg	\$ 1,23	\$ 0,69
Cilindro A para soporte de PT-100	Eje de acero de transmisión 1" 1/4 x 35 mm	1	kg	\$ 1,31	\$ 1,47
Regulador de movimiento en z	Eje acero de transmisión AISI 1045 2"x 110 mm	1	kg	\$ 3,57	\$ 4,00
Aislante térmico	Plancha de celerón 110x90 de 6 mm de espesor	0,25	kg	\$ 25,00	\$ 7,00
Regulador de movimiento en z	Acero de transmisión AISI 1045 2"x 80 mm	1	kg	\$ 3,02	\$ 3,38
Soporte de controlador PID	Plancha en pedazo L/C 4mm (plasma) 250x176	1	kg	\$ 1,50	\$ 1,68
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 50 x 50 mm	0,044	kg	\$ 121,58	\$ 5,99
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 70 x 70 mm	0,059	kg	\$ 121,58	\$ 8,03
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 60 x 60 mm	0,05	kg	\$ 121,58	\$ 6,81
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 50 x 50 mm	0,044	kg	\$ 121,58	\$ 5,99
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 60 x 60 mm	0,05	kg	\$ 121,58	\$ 6,81
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 70 x 70 mm	0,059	kg	\$ 121,58	\$ 8,03
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 70 x 70 mm	0,059	kg	\$ 121,58	\$ 8,03
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 60 x 60 mm	0,05	kg	\$ 121,58	\$ 6,81
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 70 x 70 mm	0,059	kg	\$ 121,58	\$ 8,03
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 70 x 70 mm	0,059	kg	\$ 121,58	\$ 8,03
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 60 x 60 mm	0,05	kg	\$ 121,58	\$ 6,81
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 70 x 70 mm	0,059	kg	\$ 121,58	\$ 8,03
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 50 x 50 mm	0,044	kg	\$ 121,58	\$ 5,99
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 50 x 50 mm	0,044	kg	\$ 121,58	\$ 5,99
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 50 x 50 mm	0,044	kg	\$ 121,58	\$ 5,99
Bloque de curvatura	Barra cuadrada de duraluminio de 50 x 50 mm	0,044	kg	\$ 121,58	\$ 5,99
Eje - bloque de curvatura	Eje de aluminio 1 7/32" x 45 mm	0,02	kg	\$ 89,00	\$ 1,99
Placas de sujeción MSTPD	Plancha de Acero A-36 de espesor 0,9 mm	0,05	kg	\$ 1,95	\$ 0,11
Chaveta corredera en Z	Bronce Fosfórico	0,03	kg	\$ 9,56	\$ 0,32
Placa superior en mov en y	Plancha de duraluminio espesor de 8 mm	0,071	kg	\$ 107,80	\$ 8,57
Placa superior izquierda en y	Plancha de duraluminio espesor de 10 mm	0,06	kg	\$ 107,80	\$ 7,24
Placa en movimiento en y	Plancha de duraluminio espesor de 10 mm	0,078	kg	\$ 107,80	\$ 9,42
Tope en y	Plancha de duraluminio espesor de 5 mm	0,012	kg	\$ 92,40	\$ 1,24
Placa superior derecha en y	Plancha de duraluminio espesor de 10 mm	0,072	kg	\$ 107,80	\$ 8,69
Refuerzo de cuerda dial	Plancha de duraluminio espesor de 5 mm	0,036	kg	\$ 92,40	\$ 3,73
Eje - bloque de curvatura	Eje de aluminio 1" 1/2 x 45 mm	0,05	kg	\$ 103,87	\$ 5,82
Perilla en mov. en x	Barra de aluminio puro diametro 1 1/2"	0,048	kg	\$ 83,93	\$ 4,51
Placa de mov derecha en y	Plancha de duraluminio espesor de 10 mm	0,07	kg	\$ 107,80	\$ 8,45
Eje estriado movimiento en y	Eje de acero de transmisión 1/2" x 75 mm	1	kg	\$ 1,31	\$ 1,47
Cilindro mov en x	Eje de bronce Fosfórico 1"x 65 mm	1	kg	\$ 8,67	\$ 9,71
Seperador de bolas	Placa de nylon de 2 mm	1	kg	\$ 0,95	\$ 1,06
Placa de mov en x	Plancha de duraluminio espesor de 10 mm	0,09	kg	\$ 107,80	\$ 10,87
Placa auxiliar izquierda	Plancha de duraluminio espesor de 10 mm	0,039	kg	\$ 107,80	\$ 4,71
Placa en mov. izquierda en x	Plancha de duraluminio espesor de 10 mm	0,032	kg	\$ 105,99	\$ 3,80
Placa guía de hilo dial	Plancha de duraluminio espesor de 10 mm	0,03	kg	\$ 105,99	\$ 3,56
Placa superior auxiliar izq. en x	Plancha de duraluminio espesor de 15 mm	0,1	kg	\$ 117,85	\$ 13,20
Cremallera en mov. en y	Plancha de Acero A-36 de espesor 10 mm	0,04	kg	\$ 2,38	\$ 0,11
Polea guía de cuerda dial	Eje de acero de transmisión ASTM 1045 1/2" x 20 mm	0,037	kg	\$ 3,19	\$ 0,13
Soporte de fijación de MSTPD	Plancha de acero de transmisión ASTM 1045 espesor de 4 mm	0,3	kg	\$ 3,01	\$ 1,01
Regulador de fijación de MSTPD	Eje de acero de transmisión ASTM 1045 3/4" x 150 mm	0,15	kg	\$ 3,01	\$ 0,51
Sop. de fijación de MSTPD comp.	Plancha de acero de transmisión ASTM 1045 espesor de 4 mm	0,25	kg	\$ 3,01	\$ 0,84
Perno regulador de posicionador	Eje de acero de transmisión ASTM 1045 1/2" x 65 mm	0,14	kg	\$ 2,87	\$ 0,45
Varilla de fijación de contacto	Eje de acero AISI 6150	0,045	kg	\$ 3,94	\$ 0,20
Soporte de contacto óhmico	Eje de cobre electrolítico 1/2"	0,12	kg	\$ 9,81	\$ 1,32
				TOTAL	\$ 324,40

2.2.3. Costos de elementos normalizados

En la Tabla 2.55. se detallan los costos de los elementos normalizados de la máquina.

Tabla 2.55. Costos de elementos normalizados.

Especificación	Cantidad	Unidad	Costo unit. [\$]	Total [\$]
Perno prisionero 4x0,70x4 mm	10	u	\$ 0,01	\$ 0,10
Perno Allen AC. GR 12,9 mm DIN 912 4x0,70x10	4	u	\$ 0,04	\$ 0,17
Perno allen AC. GR.12.9 MM DIN 912 4X0.70X16	7	u	\$ 0,03	\$ 0,22
Perno allen C.PLANA AC. GR.10.9 MM DIN 7991 M4X0.70X16	4	u	\$ 0,04	\$ 0,17
Perno prisionero AC.INOX. MM DIN 913 304(A2) 10X10	1	u	\$ 0,13	\$ 0,14
Perno prisionero AC.INOX. MM DIN 913 304(A2) 4X10	6	u	\$ 0,03	\$ 0,19
Perno allen AC. GR.12.9 MM DIN 912 5X0.80X16	3	u	\$ 0,05	\$ 0,16
Perno allen AC. GR.12.9 MM DIN 912 6X1.00X16	10	u	\$ 0,06	\$ 0,60
Perno Allen AC. GR 12,9 mm DIN 912 6x25	1	u	\$ 0,06	\$ 0,06
Perno allen AC. GR.12.9 MM DIN 912 6XX12	4	u	\$ 0,07	\$ 0,28
Tornillo de sujeción ISO 7045 M3x12-Z	3	u	\$ 0,10	\$ 0,30
Anillo Seeger externo M13	1	u	\$ 0,50	\$ 0,50
Perno prisionero ranura hexagonal M4x6	16	u	\$ 0,04	\$ 0,64
Pasador elástico ranurado M3x20 mm ISO 13337	4	u	\$ 0,17	\$ 0,68
Arandela plana 9x4,5x1	3	u	\$ 0,12	\$ 0,36
Perno allen AC. GR. 19,9 MM DIN 912 M4x20	5	u	\$ 0,07	\$ 0,35
Perno allen AC. GR. 19,9 MM DIN 912 M4x12	3	u	\$ 0,06	\$ 0,18
Anillo Seeger externo M16	1	u	\$ 0,59	\$ 0,59
Pasador elástico ranurado ISO 13337 1/8"x11/16"	2	u	\$ 0,37	\$ 0,74
Perno prisionero ranura hexagonal M4x8	8	u	\$ 0,05	\$ 0,40
Balines de acero al cromo-carbono calibre 4,5	44	u	\$ 0,03	\$ 1,32
Perno cabeza avellanada hexagonal ISO 10642 M4x12	4	u	\$ 0,05	\$ 0,20
Resorte de posicionador	4	u	\$ 2,00	\$ 8,00
Perno prisionero ranura hexagonal M4x4	4	u	\$ 0,03	\$ 0,12
			TOTAL	\$ 16,45

2.2.4. Costo total del diseño y construcción de la máquina

El costo total es la suma de todos los costos: materiales, insumos, elementos normalizados y mano de obra (los costos de mano de obra se pueden encontrar en la Tabla XI.1. del anexo XI), al subtotal se le sumo un cierto porcentaje correspondiente al costo del diseño y las utilidades que proyecta una hipotética comercialización futura.

Tabla 2.56. Costo total de máquina.

Costo del material (\$)	324,40
Costo de elementos normalizados (\$)	16,45
Costo de mano de obra (\$)	992,00
Costo de insumos (\$)	291,09
SUBTOTAL (\$)	1623,94
Costo de diseño (10%)	162,39
Utilidad (15%)	243,59
COSTO TOTAL DE LA MAQUINA (\$)	2029,93

2.3. Proceso experimental

Al finalizar de cada etapa en el diseño de la máquina, en la Figura 2.57., Figura 2.58., Figura 2.59. y Figura 2.60 se presenta la máquina ya en funcionamiento.



Figura 2.57. Máquina para ensayar un material termoeléctrico de película delgada por el método de Van der Pawn.

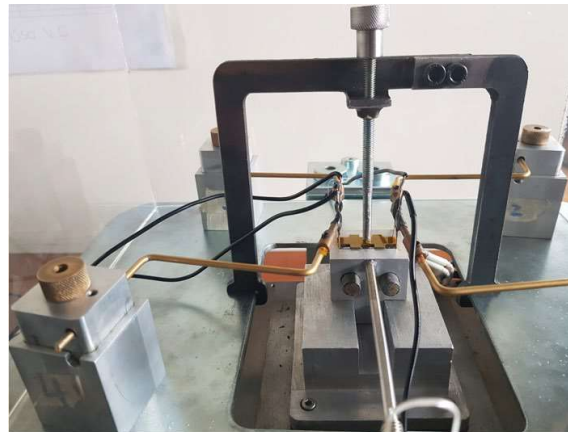


Figura 2.58. Medición del voltaje en las esquinas de la muestra.

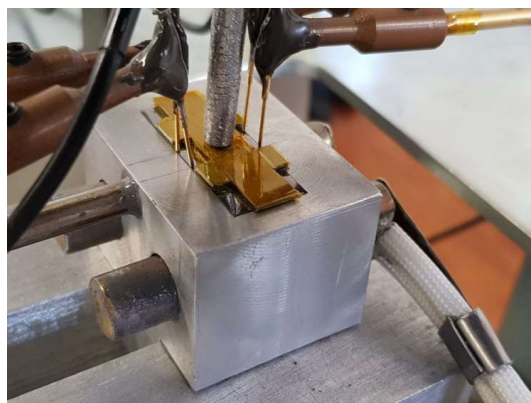


Figura 2.59. Medición del voltaje a 5 [mm] del centro.



Figura 2.60. Medición del voltaje a 5 [mm] del centro de la muestra sometido a un radio de curvatura.

2.3.1. Deformación vs el radio de curvatura

Para determinar la deformación para cada radio de curvatura, hay que tener en cuenta que son dos materiales en uno; el SPD ($\mu\text{c-Si: H}$) y el sustrato (Kapton). Tal como se indica en la Figura 1.8.

El cálculo de la deformación en función del diámetro de curvatura para dos capas se determina por la ecuación 1.22. su curva característica presenta una tendencia exponencial decreciente con los radios de deformación en las abscisas y la deformación en unidades porcentuales en las ordenadas.

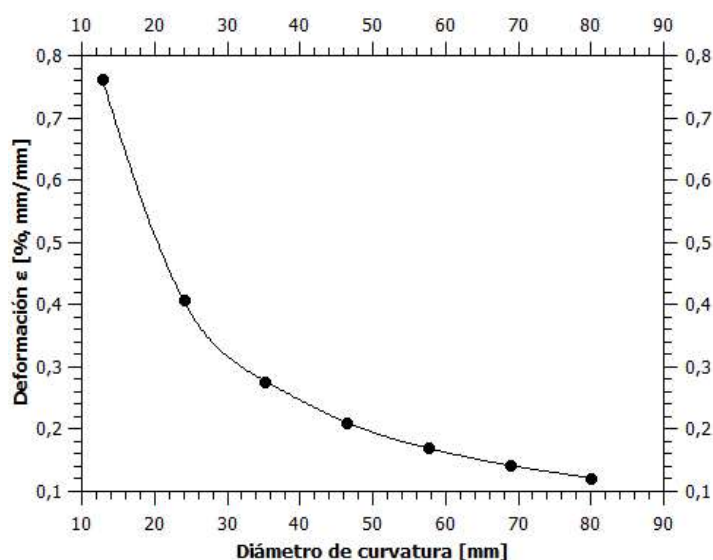


Figura 2.61. Deformación del MSTPD en función del radio de curvatura.

2.4. Protocolo de pruebas y mediciones

En este apartado se planeará un protocolo de pruebas cuyo fin es descubrir los posibles inconvenientes que podría tener el usuario con la máquina, con la misma metodología se

propone un protocolo o procedimiento a seguir al aplicar el método de Van Der Pauw en probetas adecuadas.

2.4.1. Protocolo de pruebas

Para el uso correcto de la máquina es necesario obtener el gradiente de temperatura real de la máquina, dicha gradiente se refiere a la diferencia de temperaturas que existe entre la superficie de prueba provista para cada cubo y el agujero donde está alojado el sensor de temperatura Pt100.

2.4.1.1. Objetivo

Determinar los pasos a seguir para obtener la gradiente de temperatura real en la máquina y determinar la temperatura suministrada al MTSPD.

2.4.1.2. Responsable

Operador.

2.4.1.3. Conjunto de actividades

- Determinar la temperatura de trabajo, cuyo rango va desde la temperatura ambiente hasta los 250 °C.
- Seleccionar el bloque de curvatura, ya sea para flexión o compresión; adicionalmente se tiene un bloque plano dando en total quince bloques.
- Asegurar el bloque de curvatura.
- Seleccionar la termocupla a usar en función de la temperatura de trabajo y la sensibilidad que se requiera tener. Para el caso, las pruebas se las realizó a (150°C) se usó una termocupla tipo J.
- Ingresar las resistencias eléctricas tipo cartucho en los agujeros de los bloques. Se recomienda utilizar pasta térmica en el contacto superficial de la resistencia con el agujero del bloque para mejorar la precisión de los resultados.
- Distribuir los puntos de medida como se indica en la Figura 1.20a. Esta distribución se la realiza tanto en la superficie cóncava, convexa y en el plano.
- Conectar el controlador digital de temperatura con un sensor tipo Pt100 (Equipo acoplado a la máquina).
- Energizar el equipo a una fuente de 110 [V].
- Encender el controlador de temperatura y las resistencias eléctricas tipo cartucho.

- Iniciar el modo auto – tuning del controlador de temperatura cambiando de 0 a 1. El auto – tuning ajusta de manera automática los parámetros del controlador PID sin necesidad de que el usuario tenga que calcular e ingresar de manera manual.
- Setear el equipo para que suministre una temperatura de 150 °C (temperatura de experimentación) y esperar a que esta temperatura se estabilice gracias al controlador PID.
- Conectar la termocupla al medidor de temperatura marca FLUX
- Obtener las medidas de temperatura proporcionadas por la termocupla en cada uno de los puntos. (3 mediciones en cada punto), ver la Figura 2.62.

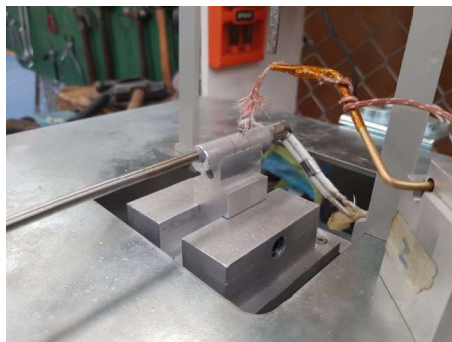


Figura 2.62. Mediciones de la temperatura de la superficie en el punto 3 del bloque de 12.8 [mm].

- Controlar la caída de temperatura (el controlador PID establece este parámetro como P_b) desde la localidad de la pt100 hasta el correspondiente punto de medición.
- Establecer una temperatura promedio de todos los puntos y el P_b promedio que se obtuvo experimentalmente.
- Calcular la diferencia de temperaturas (P_b) mediante la ecuación 2.66.

$$P_b = (T_{prom} - T_{PT100}) + (T_{PT100} - T_{in}) \quad (2.66.)$$

Donde:

P_b : Diferencia de temperaturas que existe entre la superficie de prueba y el agujero donde está alojado el sensor de temperatura Pt100.

T_{prom} : Temperatura promedio de la distribución de puntos

T_{PT100} : Temperatura dada por la Pt100 en el controlador digital de temperatura PID.

T_{in} : Temperatura de seteo de la máquina.

- Determinar el error en estado estable y comprobar si es menor que su error admisible establecido, si el error es mayor se tiene que encontrar los coeficientes de PID adecuados (se tiene que variar progresivamente hasta encontrar los adecuados).

2.4.1.4. Entradas

- Máquina para ensayar un material termoeléctrico de película delgada.
- Medidor de temperatura marca FLUX.
- Termocupla tipo J

2.4.1.5. Salidas

Diferencia de temperatura que existe entre la superficie de prueba y el agujero donde está alojado el sensor de temperatura Pt100.

2.4.2. Protocolo de mediciones

2.4.2.1. Objetivo

Determinar los pasos a seguir para realizar las mediciones de resistividad superficial en probetas de semiconductores de película fina con substratos flexibles sometidos a una temperatura.

2.4.2.2. Responsable

Operador

2.4.2.3. Sugerencias para el manejo de muestras

- Utilice siempre guantes de nitrilo y pinzas para manipular las muestras, nunca con las manos; para evitar contaminar y/o dañar el material.
- No respire cerca de la muestra, el vapor que sale de su boca se oxide la muestra. Se sugiere el uso de mascarilla.
- Nunca ponga la muestra en contacto con agua.
- No exponga la muestra innecesariamente a la luz.
- Tome en cuenta en no causar rasguños en la muestra al colocar en el cilindro.

2.4.2.4. Conjunto de actividades

- Determinar la temperatura de trabajo, cuyo rango va desde la temperatura ambiente, hasta los 250 °C.

- Seleccionar el bloque de curvatura.
- Asegurar el bloque de curvatura.
- Colocar cuidadosamente el material a ensayar en la superficie de prueba, (ver en sugerencias para el manejo de la muestra).
- Colocar la placa de sujeción encima del MSTPD
- Ajustar la placa de sujeción con el MSTPD por medio del regulador de fijación.
- Posicionar en cada contacto eléctrico en las esquinas de la probeta, se sugiere el uso de algún instrumento óptico como la lupa para obtener un buen contacto óhmico (nota los parámetros de medición solo están especificados para probetas rectangulares con dimensiones específicas, teóricamente es posible realizar la medición en probetas con perfil indefinido, pero es necesario determinar sus respectivos parámetros de medición).
- Ingresar las resistencias eléctricas tipo cartucho en los agujeros de los bloques; dependiendo del tipo de bloque, se colocará una resistencia o dos. Se recomienda utilizar pasta térmica en el contacto superficial de la resistencia con el agujero del bloque para mejorar la precisión de los resultados.
- Conectar el controlador digital de temperatura con un sensor tipo Pt100 (Equipo acoplado a la máquina).
- Energizar el equipo a una fuente de 110 V.
- Encender la fuente de corriente (CC) marca Keithley, serie 2400
- Conectar los bornes tipo banana de los contactos óhmicos a la fuente de corriente marca Keithley, tal como se indica en la Figura 2.63.

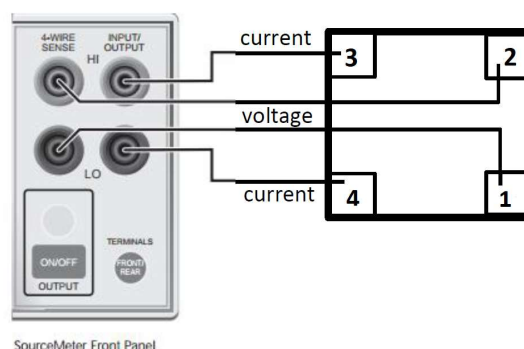


Figura 2.63. Conexión de bornes de los contactos óhmicos en la fuente de corriente Keithley. (Fuente: [20])

- Parametrizar la fuente de corriente por el método de 4 puntas y suministrar una corriente de 1 mA.

- Verificar que exista contacto óhmico con dos condiciones: la primera que exista linealidad entre la corriente suministrada y el voltaje medido y la segunda que al no inyectar una corriente no exista un voltaje medido.
- Determinar su voltaje de inyección de corriente (compliance voltage), es necesario determinar que la corriente seteada es la corriente que se suministra al a muestra, si no es el caso se debe subir su compliance voltage hasta obtener una corriente seteada y suministrada iguales (es muy importante no excederse con dicho parámetro porque se podría dañar la muestra).
- Ajustar la escala de voltaje (μV , mV , V) para las mediciones en el multímetro.
- Realizar las mediciones del voltaje por el método de Van Der Pawn intercambiando las polaridades de los contactos en la fuente, tal como se indica en la Figura 1.15.
- Anotar las mediciones de voltaje y de corriente aplicada, dando en total 8 mediciones.
- Apagar la fuente de corriente.

El método de Van Der Pauw finaliza hasta aquí, a continuación, se especificarán algunos pasos adicionales únicamente aplicados en este caso, debido a que la investigación relevante a las probetas necesita obtener la resistividad en un área concentrada de 5 [mm] con centro en el centro de la probeta como se muestra en la Figura 2.64., al alternar entre bloques de curvatura el bloque plano, el procedimiento seguido se especifica a continuación:

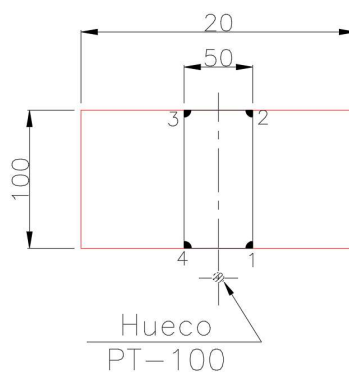


Figura 2.64. Puntos de contacto de en centro.

- Realizar las mediciones de igual manera que cuando se hizo en los extremos.
- Apagar la fuente e intercambiar el bloque plano por el bloque curvado de 80 [mm] de diámetro. (se debe seleccionar previamente si se va a realizar las mediciones a compresión o a tensión; ya que con ello se selecciona el bloque curvado.)
- Asegurar la muestra en el bloque curvado.

- Posicionar los contactos a 50 [mm] del centro, ver Figura 2.60.
- Encender el controlador de temperatura y las resistencias eléctricas tipo cartucho.
- Setear el controlador digital de temperatura MAXWELL / MTB-48 a 60°C proporcionando los datos P, I, D, y T_b determinados en el protocolo de uso.
- Accionar el controlador de temperatura a la temperatura seteada y esperar a que se estabilice.
- Realizar las mediciones de voltaje como el caso anterior (a 50 [mm] del centro e intercambiando las polaridades).
- Apagar todo el equipo y esperar a que se disipe todo el calor.
- Intercambiar nuevamente el bloque curvo por el bloque plano.
- Repetir nuevamente el proceso, seteando el controlador de temperatura a 60°C y con los valores del P, I, D, y T_b determinados en el protocolo de uso a 50 [mm] del centro.
- Apagar el equipo, y esperar a que se disipe todo el calor.
- Cambiar el bloque plano al bloque de 68.8 [mm] y continuar con el procedimiento anterior a 50 [mm] del centro y 60 [°C] (No olvide setear los valores del controlador de temperatura).
- Continuar con las siguientes mediciones hasta terminar con el bloque de 12.8 [mm] de diámetro. (tanto en curvo como en plano).

2.4.2.5. Entradas

- Máquina para ensayar un material termoeléctrico de película delgada.
- Fuente de corriente (CC) marca Keithley serie 2400.
- Multímetro de alta precisión marca Keysight.
- Pasta térmica. (Opcional).
- Lupa (Opcional).

2.4.2.6. Salidas

Diferencia de voltaje del material sometido a flexión (doble específico) y temperatura determinada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son a partir de una muestra $\mu\text{-Si}$: H de tipo N y P depositado en un sustrato de kapton, mediante el proceso de PECVD dando propiedades termoeléctricas y flexibles. Se midió el voltaje aplicando el método de Van der Pawn.

3.1. Resultados

Para comprobar el funcionamiento de máquina, se requiere de una comparación de medidas con respecto a una máquina comercial y en las mismas condiciones (muestra, temperatura, compliance voltage y bloque).

Se analizó un total de 12 probetas, 4 fueron de 2x1 [cm] y 8 de 3x1[cm], las cuales fueron enviadas por la Universidad de Heriot-Watt del Reino Unido con sus respectivas mediciones de voltaje y corriente, así como sus especificaciones de posición y codificación. En la Tabla 3.1 se muestra los valores obtenidos y enviados para las probetas que mejores resultados presentaron:

Tabla 3.1. Comparación de datos obtenidos con los proporcionados.

Cod. Muestra	Tipo	Curvatura	Temperatura		
EC-01-01	N	Plano	20,3°C		
Corriente		Compliance Voltage			
1 mA		10 V			
Polaridad		Voltaje medido (mV)	Voltaje de comprobación (mV)	Error (%)	Promedio (%)
I12-43		1,302	1,419	8,25	4,77
I21-34		1,327	1,412	6,02	
I23-14		177,03	174,2	1,62	
I32-41		177	173,7	1,90	
I34-21		1,287	1,418	9,24	
I43-12		1,301	1,413	7,93	
I41-32		176,74	174,3	1,40	
I14-23		176,77	173,7	1,77	
Cod. Muestra	Tipo	Curvatura	Temperatura		
EC-01-02	N	Plano	20,3°C		
Corriente		Compliance Voltage			
1 mA		10 V			
Polaridad		Voltaje medido (mV)	Voltaje de comprobación (mV)	Error (%)	Promedio (%)
I12-43		2,664	2,806	5,06	3,51
I21-34		2,646	2,806	5,70	
I23-14		272,56	269,4	1,17	
I32-41		272,57	268,5	1,52	
I34-21		2,63	2,816	6,61	
I43-12		2,651	2,8	5,32	
I41-32		272,61	269,5	1,15	
I14-23		272,56	268,5	1,51	
Cod. Muestra	Tipo	Curvatura	Temperatura		
188-05-01	N	Plano	20,3°C		
Corriente		Compliance Voltage			
1 mA		10 V			
Polaridad		Voltaje medido (mV)	Voltaje de comprobación (mV)	Error (%)	Promedio (%)
I12-43		0,948	0,948	0,00	1,65
I21-34		0,988	0,954	3,56	
I23-14		372,8	367	1,58	
I32-41		372,6	366	1,80	
I34-21		0,943	0,96	1,77	
I43-12		0,963	0,952	1,16	
I41-32		372,6	367	1,53	
I14-23		372,6	366	1,80	

Cod. Muestra	Tipo	Curvatura	Temperatura		
18B-04-01	P	Plano	20,3°C		
Corriente		Compliance Voltage			
1 mA		50			
Polaridad		Voltaje medido (mV)	Voltaje de comprobación (mV)	Error (%)	Promedio (%)
I12-43		1,132	1,017	11,31	8,27
I21-34		1,049	1,018	3,05	
I23-14		748,6	723,5	3,47	
I32-41		748,5	722,8	3,56	
I34-21		1,019	0,96	6,15	
I43-12		1,188	0,97	22,47	
I41-32		753,7	698,4	7,92	
I14-23		753,3	695,7	8,28	
Cod. Muestra	Tipo	Curvatura	Temperatura		
18B-05-03	N	Plano	18,2°C		
Corriente		Compliance Voltage			
1 mA		20 V			
Polaridad		Voltaje medido (mV)	Voltaje de comprobación (mV)	Error (%)	Promedio (%)
I12-43		0,663	0,661	0,30	1,39
I21-34		0,672	0,658	2,13	
I23-14		285,87	285	0,31	
I32-41		285,86	283	1,01	
I34-21		0,64	0,663	3,47	
I43-12		0,636	0,657	3,20	
I41-32		285,56	285	0,20	
I14-23		285,54	284	0,54	
Cod. Muestra	Tipo	Curvatura	Temperatura		
18B-04-04	P	Plano	18,2°C		
Corriente		Compliance Voltage			
1 mA		20 V			
Polaridad		Voltaje medido (mV)	Voltaje de comprobación (mV)	Error (%)	Promedio (%)
I12-43		0,401	0,518	22,59	10,02
I21-34		0,465	0,519	10,40	
I23-14		764,5	738	3,59	
I32-41		764,6	735	4,03	
I34-21		0,576	0,522	10,34	
I43-12		0,395	0,514	23,15	
I41-32		758,9	738	2,83	
I14-23		758,8	735	3,24	

La universidad de Heriot-Watt proporcionó en total 12 probetas, de las cuales, el error medido promediado para cada probeta se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Porcentaje de error de todas las probetas analizadas.

Probeta	Tipo	Error promedio %		
EC-01-01	N	4,77		
EC-01-02	N	3,51		
EC-100-01	P	500,73		
EC-100-02	P	892,69	Bueno	
18B-05-01	N	1,65	Regular	
18B-04-01	P	8,27	Malo	
18B-05-02	N	12,48		
18B-04-02	P	117,74		
18B-05-03	N	1,39		
18B-04-03	P	49,27		
18B-05-04	N	13,55		
18B-04-04	P	10,02		

Cabe mencionar que las probetas con más error presentaban daños superficiales por lo que medición no fue confiables.

Para comprobar la variación de la temperatura en la superficie, se comparó el proceso experimental (indicado en el protocolo de pruebas) y con una simulación procesado por el software ANSYS. Por lo cual, tenemos la Tabla 3.3. para un bloque plano.

Tabla 3.3. Resultados obtenidos experimentales y simulados del bloque plano.

RESULTADOS SIMULADOS PARA T_input												
T Input	PT-100	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8	Temp 9	Tprom	Heatside (Pb)
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
20	20,001	20,001	20,001	20,001	20,001	20,001	20,001	20,001	20,001	20,001	20,001	0,001
30	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	-0,01
40	39,99	39,99	39,98	39,99	39,99	39,99	39,98	39,98	39,99	39,98	39,99	-0,01
50	49,98	49,98	49,98	49,98	49,98	49,98	49,98	49,98	49,98	49,98	49,98	-0,02
60	59,97	59,97	59,97	59,97	59,97	59,97	59,97	59,97	59,97	59,97	59,97	-0,03
70	69,97	69,96	69,96	69,96	69,96	69,96	69,96	69,96	69,96	69,96	69,96	-0,04
80	79,96	79,95	79,95	79,95	79,95	79,95	79,95	79,95	79,95	79,95	79,95	-0,05
90	89,95	89,95	89,94	89,94	89,94	89,94	89,94	89,94	89,94	89,94	89,94	-0,06
100	99,94	99,94	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93	-0,07
110	109,94	109,93	109,92	109,92	109,91	109,92	109,91	109,91	109,92	109,91	109,92	-0,08
120	119,93	119,92	119,90	119,91	119,90	119,91	119,90	119,90	119,91	119,90	119,91	-0,09
130	129,92	129,91	129,89	129,90	129,89	129,90	129,89	129,89	129,90	129,89	129,89	-0,11
140	139,91	139,90	139,88	139,88	139,88	139,88	139,88	139,88	139,88	139,88	139,88	-0,12
150	149,90	149,89	149,87	149,87	149,86	149,87	149,86	149,86	149,87	149,86	149,87	-0,13
160	159,89	159,87	159,85	159,86	159,85	159,86	159,85	159,85	159,86	159,85	159,86	-0,14
170	169,88	169,86	169,84	169,84	169,83	169,85	169,83	169,83	169,85	169,83	169,84	-0,16
180	179,87	179,85	179,82	179,83	179,82	179,83	179,82	179,82	179,83	179,82	179,83	-0,17
190	189,86	189,84	189,81	189,81	189,80	189,82	189,80	189,80	189,82	189,80	189,81	-0,19
200	199,85	199,82	199,79	199,80	199,79	199,80	199,78	199,78	199,80	199,78	199,79	-0,21
210	209,83	209,81	209,77	209,78	209,77	209,78	209,77	209,77	209,78	209,77	209,78	-0,22
220	219,82	219,80	219,76	219,77	219,75	219,77	219,75	219,75	219,77	219,75	219,76	-0,24
230	229,81	229,78	229,74	229,75	229,73	229,75	229,73	229,73	229,75	229,73	229,74	-0,26
240	239,80	239,76	239,72	239,73	239,71	239,73	239,71	239,71	239,73	239,71	239,72	-0,28
250	249,78	249,75	249,70	249,71	249,69	249,71	249,69	249,69	249,71	249,69	249,70	-0,30
RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA 150°C												
150	150,20	150,50	149,30	150,00	150,50	150,40	149,70	149,80	149,70	149,80	149,97	-0,45

En la Tabla 3.3. indica la diferencia de temperatura (P_b) que existe entre la superficie de prueba prevista para bloque en plano 4 y el agujero donde está alojado el sensor de temperatura Pt100.

Representando estos valores, se obtiene una gradiente de temperaturas comparando los valores simulados vs el valor tomado experimentalmente a 150 °C. Estos valores están dados en la Figura 3.1.

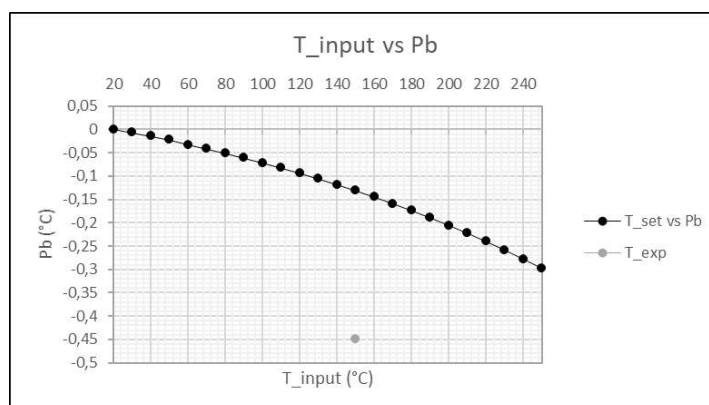


Figura 3.1. Gradiente de temperaturas simulados y valor experimental a 150 °C en el bloque plano.

La graficas de la diferencia de temperatura obtenidas para los demás diámetros se presentan desde la Figura 3.2. hasta la Figura 3.8.:

- Bloques de diámetro 12,8 [mm]

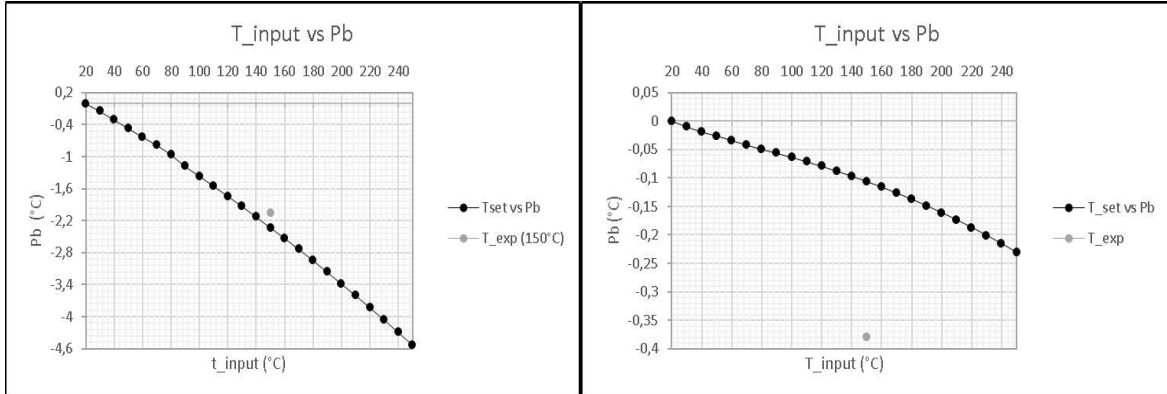


Figura 3.2. Bloque de diámetro 12,8 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.

- Bloques de diámetro 24,0 [mm]

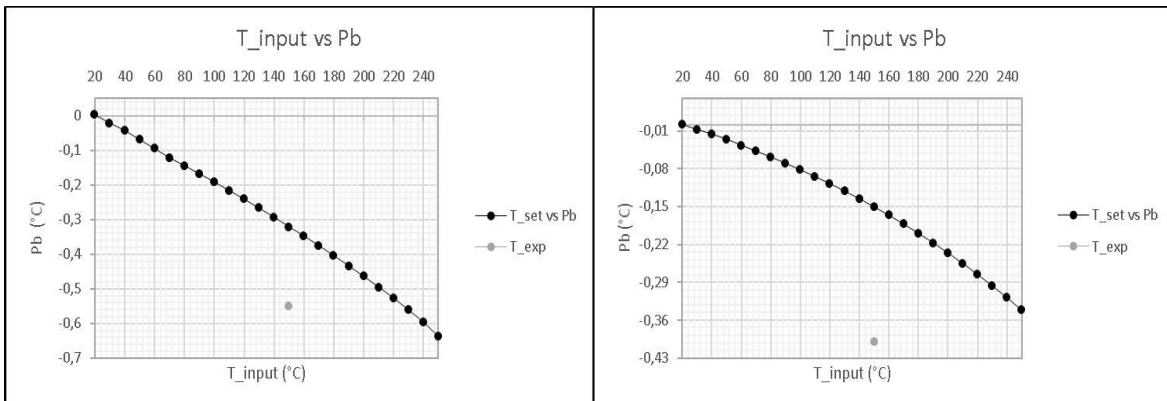


Figura 3.3. Bloque de diámetro 24,0 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.

- Bloques de diámetro 35,2 [mm]

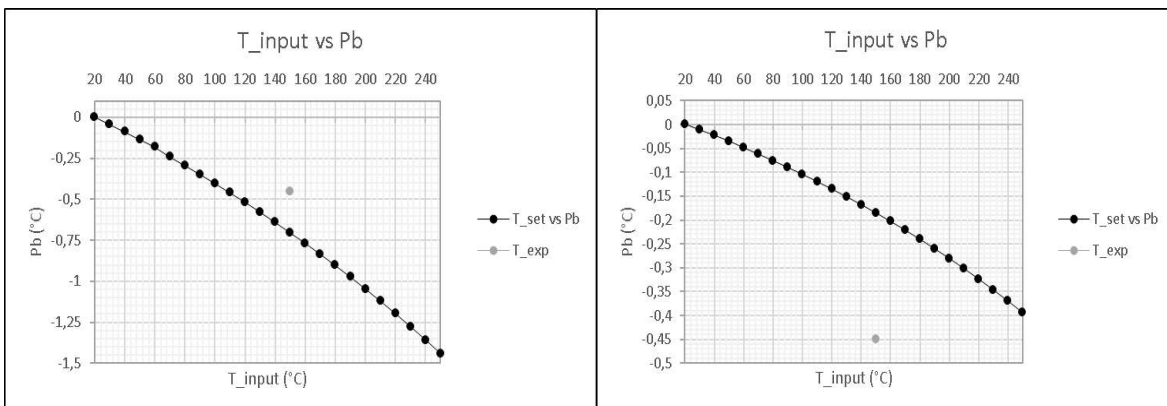


Figura 3.4. Bloque de diámetro 35,2 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.

- Bloques de diámetro 46,4 [mm]

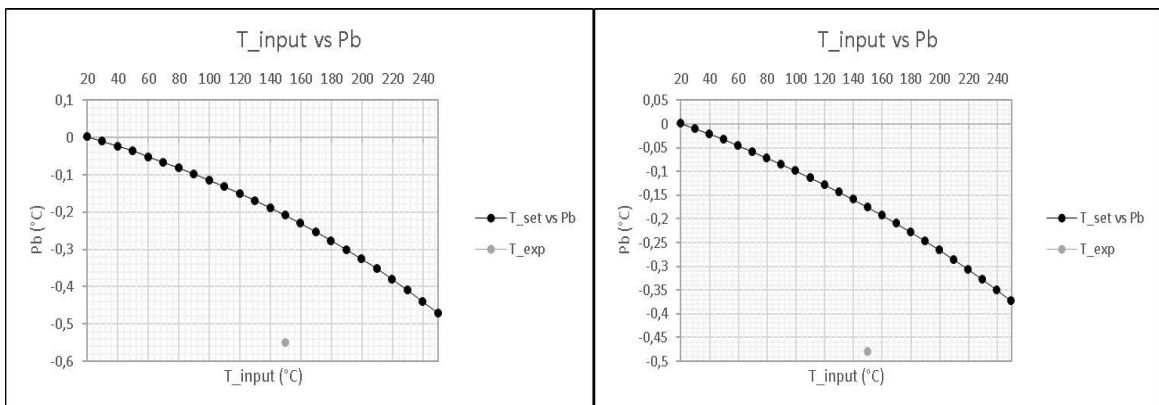


Figura 3.5. Bloque de diámetro 46,4 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.

- Bloques de diámetro 57,6 [mm]

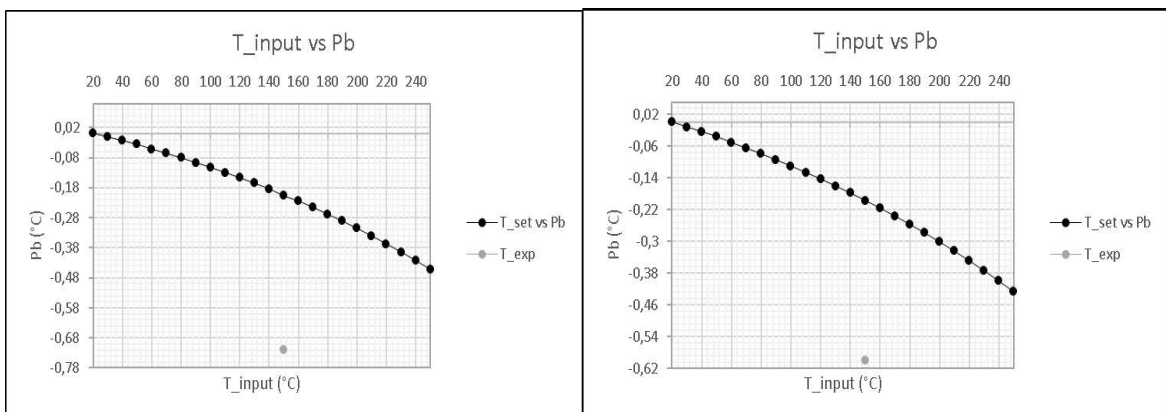


Figura 3.6. Bloque de diámetro 57,6 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.

- Bloques de diámetro 68,8 [mm]

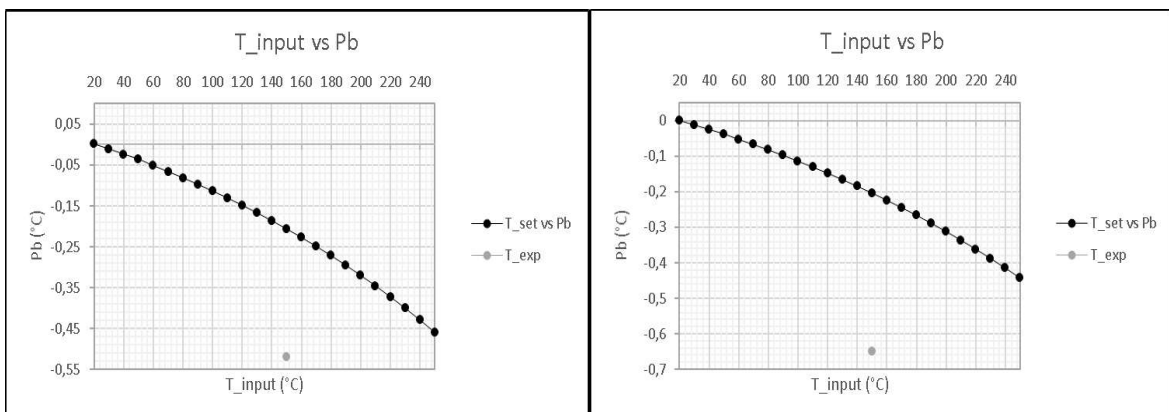


Figura 3.7. Bloque de diámetro 68,8 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.

- Bloques de diámetro 80,0mm

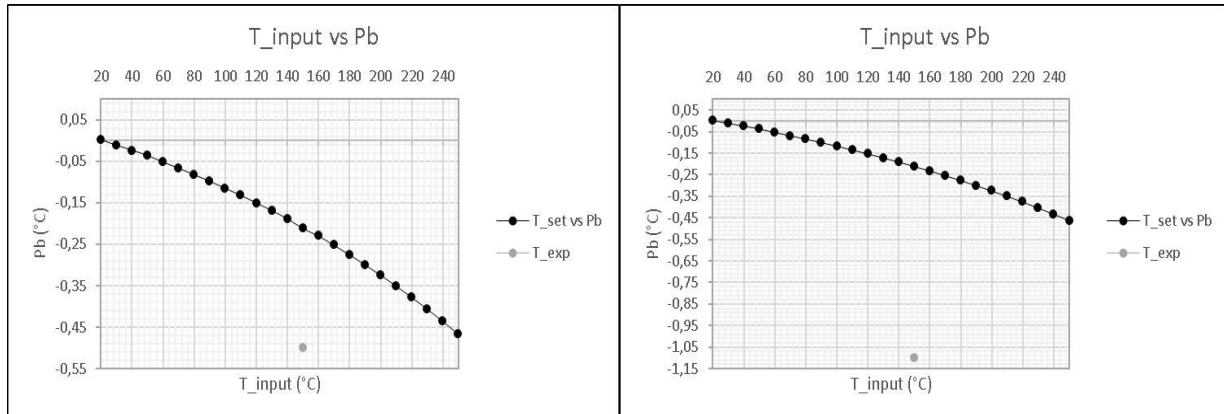


Figura 3.8. Bloque de diámetro 80,0 [mm]. Izquierda: tensión, derecha: compresión.

A pesar de no estar en los objetivos del proyecto, también se realizaron las mediciones de la conductividad eléctrica (inversa a la resistividad) por el método de Van der Pawn de las muestras de $\mu\text{-Si}$: H de tipo N y P depositado en un substrato de kapton, presentados en el anexo XII. La manera de medir fue definida por el ingeniero Edwin Acosta (ver protocolo de mediciones).

Por lo cual se representa la conductividad axial y transversal (ver Figura 3.9. y Figura 3.10. respectivamente) tanto en el plano como curvado para una muestra a tensión (18B-05-03) y otra a compresión (18B-05-01), ver Figura 3.11. y Figura 3.12.

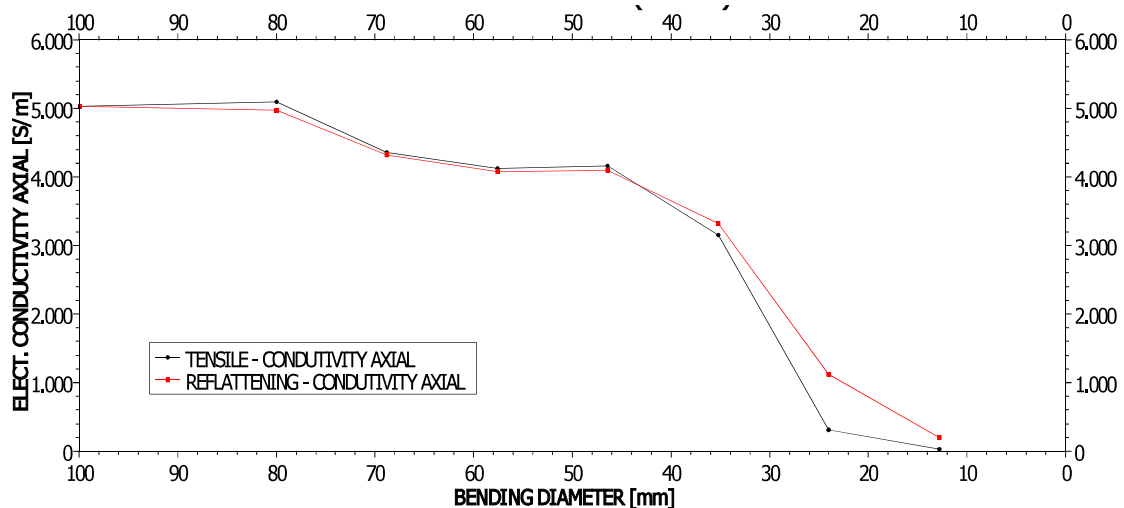


Figura 3.9. Variación de la conductividad eléctrica axial en función de la flexión negativa (tensión) en la muestra post-tratada 18B-05-03 (tipo N).

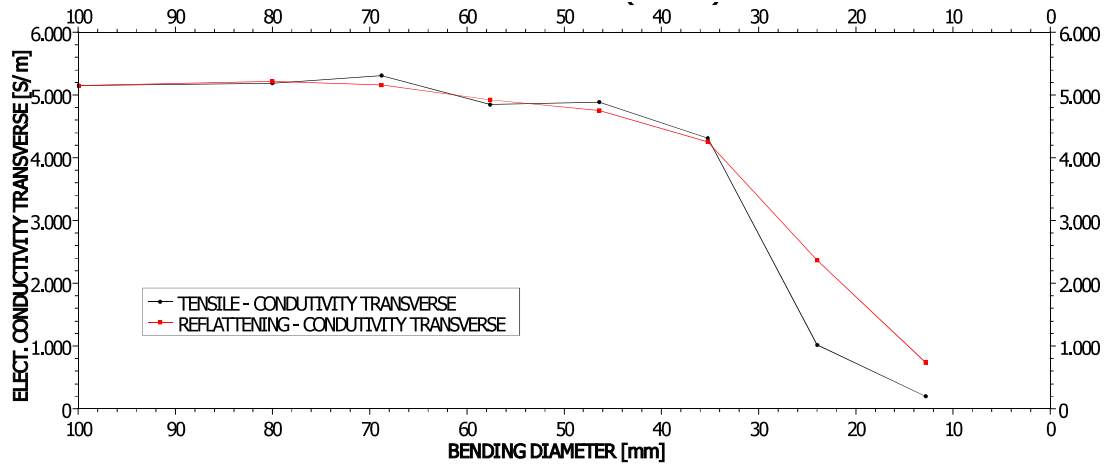


Figura 3.10. Variación de la conductividad eléctrica transversal en función de la flexión negativa (tensión) en la muestra post-tratada 18B-05-03 (tipo N).

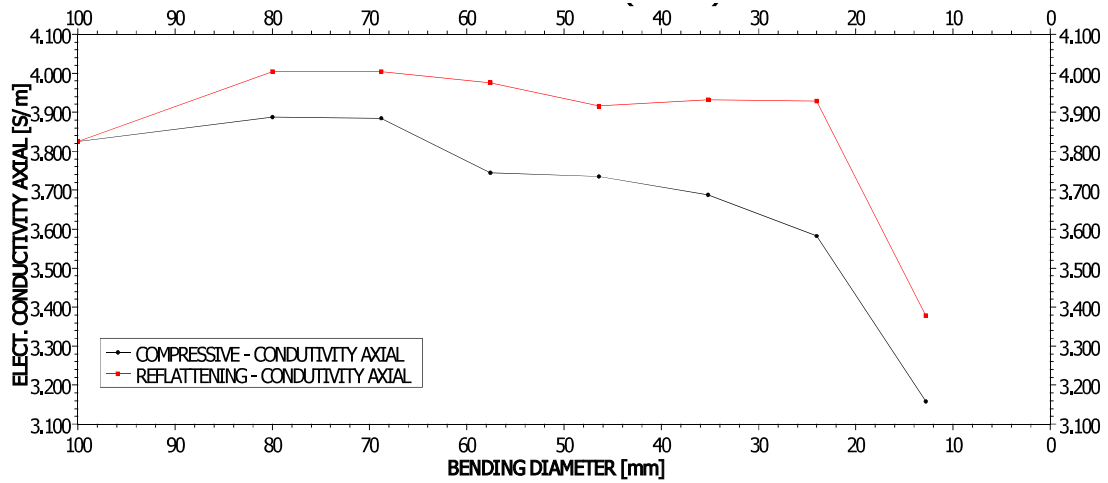


Figura 3.11. Variación de la conductividad eléctrica axial en función de la flexión positiva (compresión) en la muestra post-tratada 18B-05-01 (tipo N).

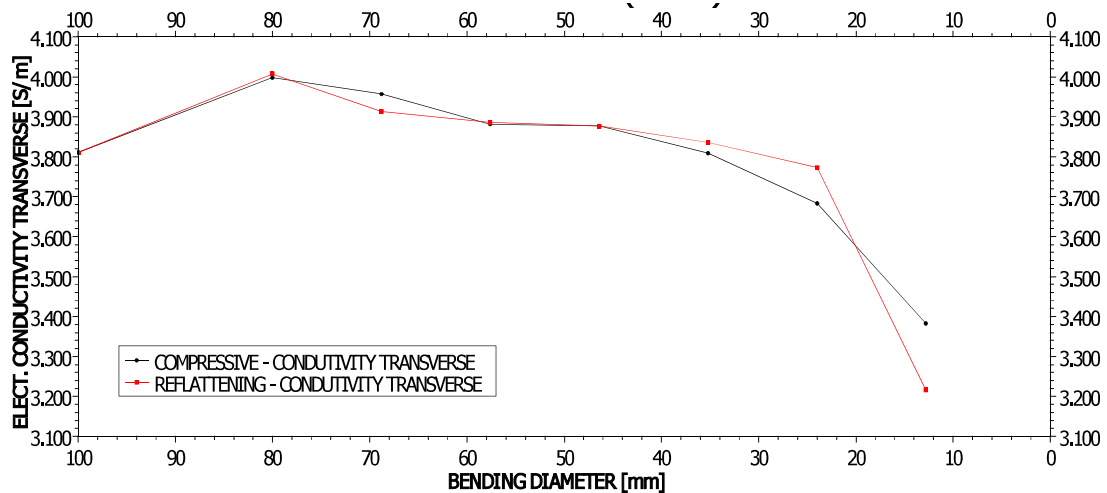


Figura 3.12. Variación de la conductividad eléctrica transversal en función de la flexión positiva (compresión) en la muestra post-tratada 18B-05-01 (tipo N).

3.2. Discusión

En la Tabla 3.2. se obtiene el error en las mediciones en comparación con las proporcionadas, de lo cual se determina una variación del voltaje medido en las muestras de tipo N que van desde el 1,65% hasta el 13,55%; mientras que en las probetas de tipo P hay una variación que van desde el 10,02% hasta 892,69%.

Analizando la Figura 3.1. se determina que la temperatura de compensación experimental en comparación con la simulada varía en 0,34 °C a una temperatura de entrada de 150 °C.

Al comprobar de la misma manera con el resto de los bloques (Figura 3.2.– Figura 3.8.) se tiene una variación máxima de 0,89 °C. Al ser una variación de menos un grado en donde la temperatura de seteo es de 150 °C, por lo que la máquina se considera funcional para la toma de mediciones.

Adicionalmente se determina que existe una mayor variación en la temperatura en los bloques a flexión positiva (compresión) en comparación con los de flexión negativa (flexión) debido a la geometría que estos presentan. En la Figura 2.33. se observa que se reduce la variación de temperaturas mientras más acercado estén los calentadores a la curva, además; si se aumenta el número de calentadores a dos, el error se reduce tal como se muestra en la curva de color negro para una distancia de 12 [mm].

En la Figura 2.23. se establece la temperatura máxima para la manipulación de la máquina, esta temperatura máxima corresponde a 253,3 °C, por lo que la temperatura que se llega a transferir a las perillas es de 44,36°C, cumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas en la Tabla 2.1.

En el análisis adicional con respecto a la conductividad eléctrica en las muestras de tipo N y tipo P; se determina que la conductividad máxima es de 5315 [S/m] en la muestra 18B-05-03 de tipo N sometida a tensión (Figura 3.9 y Figura 3.10), dicha conductividad va decreciendo conforme va disminuyendo el diámetro de curvatura por lo que se va flexionando más. La conductividad eléctrica axial decrece hasta los 3000 [S/m] y 4000 [S/m] en la sección transversal de la conductividad eléctrica en el cubo de diámetro 35,2 [mm] luego de esto se evidencia una rotura del material.

En la Figura 3.11 y Figura 3.12 se determina la conductividad eléctrica a compresión, en donde la muestra 18B-05-01 tiene un pico de conductividad eléctrica máxima de 4000 [S/m] tanto axialmente como transversalmente. En este caso se tiene una tendencia a decrecer con respecto a la disminución del diámetro de curvatura y se rompe el material en el cubo

de los 24 [mm] alcanzando una conductividad eléctrica de 3600 [S/m] en la sección axial y en la transversal es de 3700 [S/m]

Por lo tanto, las muestras tienen una mayor conductividad eléctrica transversalmente sometida a flexión y la menor conductividad eléctrica axial se tiene cuando la muestra está sometida a compresión.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se finalizó exitosamente el diseño y la construcción de la máquina, así como las pruebas de funcionamiento y las posteriores mediciones de probetas del MSTPD sometidas a flexión y temperatura.
- El nivel de tolerancias en las piezas que conforman la máquina, sobre todo los elementos mecánicos que forman los movimientos en X, Y y Z es de suma importancia en la idealización de una máquina de estas características, con tolerancias del orden de IT5 aún se presentan pequeños errores al momento de posicionar los contactos en la medición.
- La variación de la temperatura en la superficie para una distribución de calentadores mostradas en la Figura 2.33., presenta un error de 0,013% con variaciones entre 149,98 y 150°C con respecto a los resultados arrojados por la simulación, estos valores fueron comparados con valores obtenidos experimentalmente que oscilan entre 149,5 y 150,2°C con un error de 0,8% para un bloque a tensión de 44,4 mm de radio de curvatura; se debe tomar en cuenta los dígitos significativos ya que el controlador solo proporciona un dígito significativo, de cualquier manera los valores resultantes están muy por debajo del valor nominal requerido de 1°C.
- En total se comprobó la efectividad de la máquina en 12 probetas las cuales presentaron errores de entre 1% a 892,69% como se puede observar en la Tabla 3.2. estos últimos valores en dos probetas con imperfecciones y rayaduras relativamente pronunciadas.
- Una causa de la variación en las mediciones son las condiciones a las cuales estuvieron sometidas las probetas al ser analizadas en Edimburgo con respecto a las mediciones realizadas en Ecuador, adicionalmente el lapso del envío también pudo causar daños como oxidación y variaciones en la estructura cristalina de las probetas al estar expuestas al ambiente. Por otro lado, esta variación también se debe a la falta de precisión en el posicionamiento de los contactos, considerando una variación pronunciada entre los mecanismos de posicionamiento del presente proyecto con avances mínimos de 0,5mm en comparación con posicionadores especializados con avances mínimos de 0,001mm, estos últimos con costos muy altos.
- En probetas sometidas a la máxima deformación con radio de curvatura de 6,4 mm con irregularidades superficiales presentaron rupturas parciales de su estructura

cristalina, registrando voltajes ridículamente grandes del orden de los kV, su rotura es parcial dado que su voltaje aun fue legible.

- En las mediciones, se determinó que la conductividad eléctrica en las muestras tipo N es mayor a las del tipo P; donde la muestra 8B-05-03 sometida a tensión mostrada en la Figura 3.9 y Figura 3.10 al alcanzar la mayor conductividad cuyo valor es de 5000 [S/m], este comportamiento se debe en parte a la proporción mayor de electrones libre en dopados tipo N y una mayor movilidad de electrones al ser sometidas a temperaturas mayores a la del ambiente.

4.2. RECOMENDACIONES

- Es importante realizar un mantenimiento preventivo y evaluación periódica del lubricante de las correderas lineales de bola debido a las altas temperaturas que se presentan en el elemento, así también, la grasa lubricante debe ser para trabajos a altas temperaturas se recomienda grasas sintéticas a base de poliurea o fluorado con grado de penetración NLGI 0 ó NLGI 1.
- Para mejorar el aislamiento eléctrico entre el semiconductor y la superficie de prueba se puede realizar un recubrimiento superficial de anodizado a cada elemento de aluminio en especial los cercanos a la zona de medición.
- Es recomendable que no exista mucha fluctuación de aire para realizar las mediciones, puesto que esta fluctuación provoca una variación en la temperatura proporcionada y a su vez los valores del voltaje varían. Por lo que el cálculo de la resistividad superficial del elemento a ensayar por el método de Van der Pawn no es tan preciso.
- Para trabajos derivados, se sugiere la implementación de un sistema mili/micrométrico de posicionamiento de los contactos eléctricos sobre la oblea de semiconductor, adicionalmente se puede acoplar un microscopio para observar la variación de la microestructura del cristal sometido a flexión y temperatura.

Referencias Bibliográficas

- [1] E. Acosta, V. Smirnov, P. S. B. Szabo, J. Buckman, and N. S. Bennett, "Optimizing Thermoelectric Power Factor in p-Type Hydrogenated Nano-crystalline Silicon Thin Films by Varying Carrier Concentration," *J. Electron. Mater.*, vol. 48, no. 4, pp. 2085–2094, 2019.
- [2] D. Abol-Fotouh *et al.*, "Farming thermoelectric paper," *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 716–726, 2019.
- [3] S. Janfaoui, C. Simon, N. Coulon, and T. Mohammed-Brahim, "Behavior of the parameters of microcrystalline silicon TFTs under mechanical strain," *Solid. State. Electron.*, vol. 93, pp. 1–7, 2014.
- [4] R. D. Abelson *et al.*, *Thermoelectrics Handbook- Macro to Nano*, vol. 23, no. 1. 2006.
- [5] A. I. Boukai, Y. Bunimovich, J. Tahir-Kheli, J.-K. Yu, W. A. Goddard III, and J. R. Heath, "Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials," *Nature*, vol. 451, no. 7175, pp. 168–171, 2008.
- [6] J. Tang *et al.*, "Holey silicon as an efficient thermoelectric material," *Nano Lett.*, vol. 10, no. 10, pp. 4279–4283, Oct. 2010.
- [7] B. Yu *et al.*, "Enhancement of thermoelectric properties by modulation-doping in silicon germanium alloy nanocomposites," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 2077–2082, Apr. 2012.
- [8] A. Yusufu *et al.*, "Bottom-up nanostructured bulk silicon: a practical high-efficiency thermoelectric material," *Nanoscale*, vol. 6, no. 22, pp. 13921–13927, 2014.
- [9] N. S. Bennett, N. M. Wight, S. R. Popuri, and J. W. G. Bos, "Efficient thermoelectric performance in silicon nano-films by vacancy-engineering," *Nano Energy*, 2015.
- [10] E. Acosta, N. M. Wight, V. Smirnov, J. Buckman, and N. S. Bennett, "Hydrogenated Nano-/Micro-Crystalline Silicon Thin-Films for Thermoelectrics," *J. Electron. Mater.*, vol. 47, no. 6, pp. 3077–3084, 2018.
- [11] H. P. Zhou, S. Xu, and S. Q. Xiao, "High-Density Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Si-Based Materials for Solar Cell Applications," in *Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices*, InTech, 2016.

- [12] “Aplicaciones de los semiconductores En dispositivos eléctricos.” [Online]. Available:
<https://previa.uclm.es/profesorado/maarranz/Documentos/alumnosmateriales0506/APLICACIONES DE LOS MATERIALES SEMICONDUCTORES.doc>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [13] J. A. E. García Álvarez, “Qué son los semiconductores,” 2012. [Online]. Available:
http://www.asifunciona.com/fisica/ke_semiconductor/ke_semiconductor_4.htm. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [14] L. Mendoza, “Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica en películas delgadas semiconductoras por el método de Van der Pauw,” Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017.
- [15] Morales Contreras. Rafael, “Resistencia y Resistividad,” *Instituto Politécnico Nacional*, 2017. [Online]. Available:
<http://www.academico.cecyt7.ipn.mx/Fisicalll/temas/resistencia.htm>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [16] ASTM, “Standard Test Methods for Measuring Resistivity and Hall Coefficient and Determining Hall Mobility in Single-Crystal Semiconductors,” *Annu. Books ASTM Stand.*, vol. 10, no. 5, p. 41, 2019.
- [17] I. Miccoli, F. Edler, H. Pfnür, and C. Tegenkamp, “The 100th anniversary of the four-point probe technique: The role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 27, no. 22, 2015.
- [18] L. J. Van der Pauw, “A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shapes,” in *Semiconductor Devices: Pioneering Papers*, Philips, 1958.
- [19] W. L. V Price, “Extension of Van der Pauw’s theorem for measuring specific resistivity in discs of arbitrary shape to anisotropic media,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 5, no. 6, pp. 1127–1132, 1972.
- [20] C. Hood, “van der Pauw Measurement using Keithley 2400 and LabTracer,” 2017.
- [21] J. Estrella, “Mediciones eléctricas por el método de cuatro puntas en películas delgadas de interés fotovoltaico,” p. 95, 2016.
- [22] M. Gómez Fernández, “Fabricación y caracterización de Contactos metal-semiconductor para Microelectrónica,” Universidad de Vigo, 2017.

- [23] F. Beer and R. Johnston, *Mecánica de materiales*, 5ta ed. USA, 2009.
- [24] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*, 4ta ed. 1999.
- [25] FormFactor, "Cascade PM8."
- [26] Wentworth Laboratories, "Aspect L1."
- [27] norelem, "Guías de carro de cola de milano," 2019. [Online]. Available: <https://www.norelem.com/us/es/Productos/Vista-general-de-producto/Sistemas-y-componentes-para-la-construcción-de-plantas-y-máquinas/21000-Guías-de-carro-Carriles-guía-Mesas-de-posicionamiento-Guías-de-deslizamiento-en-miniatura-In>. [Accessed: 02-Sep-2019].
- [28] SKF, "Precision rail guides," United Stated, 2016.
- [29] Schaeffler, "Selección de sistemas de guiado lineal." [Online]. Available: https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/seleccion_de_sistemas_de_guiado_lineal.pdf. [Accessed: 04-Sep-2019].
- [30] R. Budynas and J. Keith, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 8va ed. USA, 2008.
- [31] Wordpress, "Soldaduracap3." [Online]. Available: <https://soldaduracap3.wordpress.com/procesos-de-soldadura/>.
- [32] H. Dong, "Microcrystalline silicon based Thin Film Transistors fabricated on Flexible Substrate," Universidad de Rennes 1, 2015.
- [33] C. Riba Romeva, *Diseño concurrente*, Universita. 2002.
- [34] M. E. Enrique Magariño, A. Ramírez de Arellano López, J. Martínez Fernández, and K. Goretta, "Propiedades mecánicas de carburo de silicio poroso de estructura celular abierta," 2002.
- [35] Nippon Bearing, "Guía de los Sistemas de Movimiento Lineal," 2019. [Online]. Available: <https://www.nbcorporation.com/es/lista-de-noticias/recursos/guide-to-linear-motion-systems/>. [Accessed: 21-Aug-2019].
- [36] HIWIN and GAES, "Guías Lineales," España, 2015.
- [37] Electrocome, "NYLON - PA.6 - ELECTROCOME." [Online]. Available:

<https://www.electrocome.com/p-1-28/NYLON---PA6.htm>. [Accessed: 03-Sep-2019].

- [38] Kualitool, "Catálogo Resistencias De Cartucho."
- [39] M. Ashby, "CES EduPack." Cambridge, 2010.
- [40] Dupont, "DuPont™ Kapton®," 2017.
- [41] Ivan Bohman, "Catálogo de Productos," *IBCA*, vol. 3era edici, Guayaquil, p. 402, 2018.
- [42] AXxecol S.A., "Acero 1045," pp. 1–1.
- [43] V. M. Faires, *Diseño de elementos de máquinas*, 4ta edició. México, 1992.
- [44] F. Kreith, R. M. Manglik, and M. S. Bohm, *Principio de transferencia de calor(Kreith)*, 7ma ed., vol. 7, no. 3. 2012.
- [45] Alliance Sensors Group, "RTD Sensor Probe Industrial Head Assembly - PT100 3-Wire." [Online]. Available: <http://alliancesensors.com/rtd-sensor-probe-industrial-head-assembly-pt100-3-wire>. [Accessed: 18-Nov-2019].