

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Informe Final

Proyecto:

Robots miniaturizados: diseño, implementación y aplicaciones

Número de Proyecto:

5402-1360-2401

FI-298-09

Participantes:

Dr.-Ing. Paola Vega Castillo, investigador responsable

M.Sc. Marta Vílchez Monge

M.Sc. Aníbal Coto Cortez

Lic. Milton Villegas Lemus

Dr.-Ing. Pablo Alvarado Moya

Escuelas Participantes

Escuela de Ingeniería Electrónica

Escuela de Física

Escuela de Ingeniería en Computación

31 de enero de 2014

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos y hacemos un reconocimiento a la Comisión de Fondo de Incentivos del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas por apoyar e impulsar la investigación en Costa Rica, y particularmente por el apoyo financiero que permitió construir este primer prototipo del minirobot.

Igualmente, agradecemos y hacemos un reconocimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por su fuerte apoyo tanto administrativo como financiero a esta iniciativa.

Agradecemos y reconocemos el trabajo del equipo de investigadores, tanto profesores como estudiantes, que contribuyeron o han contribuido a los resultados presentados en este informe, llevando a cabo sus labores con entrega y responsabilidad.

Damos un especial agradecimiento al Instituto de Nanoelectrónica de la Technische Universität Hamburg-Harburg por permitirnos llevar a cabo con su equipo la soldadura de los componentes de montaje superficial, posibilitando el ensamble del prototipo del minirobot y con ello la conclusión de este proyecto de investigación.

Profesores:

- Paola Vega Castillo
- Marta Vílchez Monge
- Aníbal Coto Cortés
- Milton Villegas Lemus
- Pablo Alvarado Moya

Estudiantes:

- Juan José Montero Rodríguez
- William Quirós Solano
- Juan Andrés Alfaro Barrantes
- Allan Granados Jiménez
- Juan Carlos Rivera Elizondo
- Stanley Hernández
- Taigin Acón Garro
- Pablo Núñez Morán
- Fabián Zamora Ramírez
- Agustín Meneses Fuentes
- Edgar Fernández
- Sergio Garro Cabezas
- Vianney Monestel
- Alejandro Córdoba Meneses

Tabla de Contenido

| | |
|--|----|
| 1. RESUMEN | 6 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 13 |
| 2.1 Antecedentes..... | 13 |
| 2.2 Revisión de literatura y problema a resolver | 20 |
| 2.3 Objetivos | 23 |
| Objetivo general | 23 |
| Objetivos específicos | 23 |
| 3. METODOLOGÍA | 24 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 27 |
| 4.1 Comunicación inalámbrica óptica..... | 27 |
| 4.1.1 Requerimientos del sistema de comunicación inalámbrica..... | 27 |
| 4.1.2 Concepción del sistema de comunicación óptica | 27 |
| 4.1.3 Caracterización experimental del emisor y receptor infrarrojos | 30 |
| 4.1.4 Imágenes del sistema migrado a la plataforma C8051F336DK | 33 |
| 4.1.5 Pruebas de comunicación con aplicación QT | 36 |
| 4.2 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA DE ENERGÍA | 43 |
| 4.2.1 SISTEMA DE LOCALIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL ROBOT | 43 |
| 4.2.1.1 Sistema de posicionamiento láser..... | 44 |
| 4.2.1.2 Modelo matemático utilizado | 48 |
| 4.2.1.2.1 Relación entre los ángulos del láser y el objetivo..... | 48 |
| 4.2.1.2.2 Relación entre los ángulos del láser y los ángulos de los servomotores... 50 | |
| 4.2.1.2.3 Relación entre el ángulo del servo y su entrada PWM..... | 52 |
| 4.2.1.2.4 Apertura del rayo láser | 53 |
| 4.2.1.2.5 Relación entre el ángulo mínimo del servo y el paso mínimo | 56 |
| 4.2.1.2.6 Sistema de Control..... | 60 |
| 4.2.1.2.7 Síntesis de la función de transferencia del controlador (GC) | 61 |
| 4.2.2 TRANSFERENCIA DE ENERGÍA DEL LÁSER A LA FOTOCELDA..... | 65 |
| 4.3 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN..... | 69 |
| 4.3.1 Desarrollo del sistema de locomoción | 69 |
| 4.3.2 Descripción del módulo de caminata | 72 |

| | |
|--|-----|
| 4.3.3 Prueba de concepto del Sistema de Locomoción | 75 |
| 4.3.3.1 Caracterización de los materiales y construcción de un prototipo de resonador..... | 75 |
| 4.3.3.2 Desarrollar un prototipo de tres miembros de un sistema de locomoción utilizando el material piezoeléctrico..... | 77 |
| 4.3.4.1 Estudio de la flexión estática..... | 78 |
| 4.3.4.2 Determinación de las frecuencias resonantes y deflexión en resonancia | 80 |
| 4.3.4.3 Determinación del peso que soporta la estructura. | 84 |
| 4.3.5 Optimización del resonador..... | 87 |
| 4.3.5.1 Simulación de una estructura bimorfa de tamaño real | 87 |
| 4.3.5.2 Estudio del desplazamiento dinámico de la estructura al considerar diferentes electrodos metálicos (Al, Cu, Ag, Au)..... | 91 |
| 4.3.5.3. Determinación del efecto de una fuerza (following load) en la estructura ... | 92 |
| 4.3.5.4 Efecto de la curvatura de la estructura como pata del Microrobot. | 93 |
| 4.3.6 Rediseño del sistema de locomoción del robot..... | 97 |
| 4.3.6.1 Características del sistema de locomoción | 97 |
| 4.3.6.2 Ensayos realizados para la obtención del sistema de locomoción..... | 100 |
| 4.4 MICROMANIPULADOR Y HERRAMIENTA DE MICROCORTE | 111 |
| 4.4.1 MICROMANIPULADOR..... | 111 |
| 4.4.1.1 Principio de funcionamiento..... | 111 |
| 4.4.1.2. Concepción y requerimientos del actuador..... | 113 |
| 4.4.1.3 Simulaciones..... | 115 |
| 4.4.1.4 Tensión mecánica máxima y resonancia | 118 |
| 4.4.1.5. Materiales del prototipo..... | 123 |
| 4.4.1.6 Ensamble del prototipo | 127 |
| 4.4.1.7 Prueba de funcionamiento | 129 |
| 4.4.2 HERRAMIENTA DE CORTE..... | 133 |
| 4.4.2.1 Materiales del prototipo..... | 133 |
| 4.4.2.2. Ensamble del actuador de pila..... | 134 |
| 4.4.2.3 Implementación de la pila | 137 |
| 4.4.2.4 Simulación de la herramienta de corte..... | 138 |
| 4.5 SOFTWARE Y ENSAMBLE | 150 |

| | |
|--|-----|
| 4.5.1. Ensamble del minirobot..... | 150 |
| 4.5.2. Software e interfaz humano-máquina | 159 |
| 4.5.2.1 Algoritmos de movimiento de las patas | 159 |
| 4.5.2.2 Rastreo y reconocimiento del minirobot..... | 166 |
| 4.5.2.2.1.Rastreo de Objetos | 167 |
| 4.5.2.2.2 Integración con el sistema de alimentación inalámbrica | 172 |
| 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 178 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 185 |
| 7. APORTES Y ALCANCES..... | 188 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 189 |
| 9. ANEXO..... | 192 |

1. RESUMEN

Este informe presenta los resultados obtenidos en el proyecto “Robots miniaturizados: diseño, implementación y aplicaciones”, con número de proyecto 5402-1360-2401.

Se presentan los resultados obtenidos con respecto a locomoción autónoma, comunicación inalámbrica óptica y alimentación inalámbrica, actuadores para manipulación y microcorte e interfaz con una PC para datos y comandos. El minirobot fue diseñado para operar en un área de al menos 30cm de diámetro y tiene un tamaño de 2.3 cm x 2.6 cm x 1.78 cm.

Para el estudio de los actuadores del minirobot se utilizó simulación multifísica por el método de elementos finitos con el software COMSOL Multiphysics.

La estructura del informe es la siguiente: en la sección de Introducción se tratan los antecedentes, la descripción del problema a resolver, así como los objetivos planteados en el proyecto de investigación. En la sección de metodología se resume el método de investigación y los flujos de diseño. En la sección de resultados se presentan los resultados obtenidos correspondientes a: comunicación inalámbrica óptica, sistema de locomoción, interfaz humano-máquina y software, alimentación inalámbrica de energía y actuadores. Posteriormente, se discuten los resultados obtenidos junto con las principales conclusiones del proyecto y las recomendaciones para su continuación y/o aprovechamiento de los resultados.

Palabras clave: Minirobots, MEMS, Microelectrónica, micromanipulación, robots autónomos, actuadores

ABSTRACT

This report presents the results obtained in the Project “Robots miniaturizados: diseño, implementación y aplicaciones”, with project number 5402-1360-2401.

The obtained results for autonomous locomotion, wireless optical communication and wireless energy transmission, manipulation and cut actuators and interface with the computer are presented. The minirobot was designed to operate in an area of at least 30cm diameter and its size is 2.3 cm x 2.6 cm x 1.78 cm.

Key words: minirobots, MEMS. Microelectronics, micromanipulation, autonomous robots, actuators

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1. SISTEMA DE MEDICIÓN ELÉCTRICA MANUAL PARA CIRCUITOS INTEGRADOS [1]..... | 14 |
| FIGURA 2.2. CÁMARA DE VACÍO DE UN MICROSCOPIO DE BARRIDO ELECTRÓNICO [2]..... | 15 |
| FIGURA 2.3. SISTEMA DE MICROMANIPULADORES PARA CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA..... | 16 |
| DE CIRCUITOS INTEGRADOS [3]..... | 16 |
| FIGURA 2.4. DETALLE DE PUNTA DE PRUEBA DE TUNGSTENO PARA CARACTERIZACIÓN..... | 17 |
| ELÉCTRICA DE CIRCUITOS INTEGRADOS [4]..... | 17 |
| FIGURA 2.5. DETALLE DE MICROMANIPULADORES SOSTENIENDO PUNTAS..... | 18 |
| DE PRUEBA DE TUNGSTENO [5]..... | 18 |
| FIGURA 2.6. SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA CON CUATRO CANALES..... | 18 |
| FUENTE MEDIDOR MODELO 4200SCS MARCA KEITHLEY [6]..... | 18 |
| FIGURA 4.1.1. CONCEPCIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA CON EL ROBOT..... | 28 |
| FIGURA 4.1.2. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA..... | 28 |
| FIGURA 4.1.3. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS..... | 29 |
| FIGURA 4.1.4. HARDWARE DEL PRIMER PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN UNIDIRECCIONAL..... | 29 |
| FIGURA 4.1.5. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN..... | 32 |
| FIGURA 4.1.6. DIAGRAMA DE INKSCAPE DEL ANILLO CON LA DISTRIBUCIÓN DE CORTES..... | 33 |
| FIGURA 4.1.7. PLACA ACRÍLICA PARA EL ANILLO DE TRANSCPTORES..... | 33 |
| FIGURA 4.1.8. PROTOTIPO DEL ROBOT UTILIZANDO EL KIT DE DESARROLLO C8051F336DK..... | 34 |
| FIGURA 4.1.9. CONEXIONES UTILIZADAS EN LA PRUEBA DE COMUNICACIÓN..... | 35 |
| FIGURA 4.1.10. CONEXIONES MOSTRANDO LAS COMPUTADORAS DE DEPURACIÓN DE CÓDIGO Y CONTROL DEL ANILLO DE TRANSCPTORES..... | 35 |
| FIGURA 4.1.11. RESULTADOS DE UNA CONEXIÓN NO EXITOSA..... | 37 |
| FIGURA 4.1.12. RESULTADOS DE UNA CONEXIÓN EXITOSA UTILIZANDO LA ZONA 3..... | 37 |
| FIGURA 4.2.1. ESQUEMA FÍSICO GENERAL DEL SISTEMA DESARROLLADO PARA EL SEGUIMIENTO DEL ROBOT.... | 44 |
| FIGURA 4.2.2. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LASER DE ALIMENTACIÓN DEL ROBOT | 45 |
| FIGURA 4.2.3. DIAGRAMA DE LA PLANTA Y SUS RESPECTIVAS PARTES SEÑALADAS..... | 46 |
| FIGURA 4.2.4. DIAGRAMA DE LA PLANTA Y SUS RESPECTIVAS PARTES SEÑALADAS..... | 47 |
| FIGURA 4.2.5. CIRCUITO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LÁSER..... | 48 |
| FIGURA 4.2.6. DIAGRAMA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE LOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN DEL LÁSER (θ , ϕ) Y EL PUNTO (x , y) AL QUE APUNTA..... | 49 |
| FIGURA 4.2.7. DIAGRAMA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO ϕ DEL LÁSER Y EL ÁNGULO ϕ_s DEL SERVOMOTOR..... | 50 |
| FIGURA 4.2.8. DIAGRAMA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO θ DEL LÁSER Y EL ÁNGULO θ_s DEL SERVOMOTOR..... | 51 |
| FIGURA 4.2.9. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO A DEL SERVOMOTOR Y SU ENTRADA PWM..... | 52 |
| FIGURA 4.2.10. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO A DEL SERVOMOTOR Y EL TIEMPO QUE SU ENTRADA PWM SE MANTIENE EN NIVEL ALTO (T_{Hi})..... | 53 |
| FIGURA 4.2.11. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE LA APERTURA DEL LASER (A) Y EL ÁNGULO DE INCLINACIÓN θ | 54 |
| FIGURA 4.2.12. REPRESENTACIÓN DE LA FOTOCELDA COMO EL CÍRCULO INSCRITO EN SU ÁREA EFECTIVA..... | 55 |
| FIGURA 4.2.13. REPRESENTACIÓN DE LA DESVIACIÓN MÁXIMA QUE SE LE PUEDE PERMITIR AL LÁSER..... | 55 |
| FIGURA 4.2.14. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO MÍNIMO $\Delta\phi$ Y EL PASO MÍNIMO ΔR QUE PUEDE DAR EL SERVO ϕ | 57 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.2.15. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO MÍNIMO $\Delta\theta$ Y EL PASO MÍNIMO ΔP QUE PUEDE DAR EL SERVO θ | 58 |
| FIGURA 4.2.16. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA RELACIÓN ENTRE EL PASO MÍNIMO ΔP Y SUS COMPONENTES ΔX Y ΔY | 59 |
| FIGURA 4.2.17. BLOQUE FUNCIONAL QUE REPRESENTA EL SISTEMA DE CONTROL | 60 |
| FIGURA 4.2.18. DIAGRAMA DE TERCER NIVEL QUE REPRESENTA LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE CONTROL ... | 60 |
| FIGURA 4.2.19. DIAGRAMA QUE REPRESENTA EL PROCESO QUE SE EJECUTA EN LA PC | 61 |
| FIGURA 4.2.20. RESPUESTA DE LA PLANTA FÍSICA AL ESCALÓN $Au(t)$ | 63 |
| FIGURA 4.2.21. ARTICULACIONES IMPLEMENTADAS PARA EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO DEL ROBOT. A) PRIMERA VERSIÓN DE LA ARTICULACIÓN, B) SEGUNDA VERSIÓN, C) TERCERA VERSIÓN, D) DETALLE DE LA ARTICULACIÓN DEFINITIVA | 65 |
| FIGURA 4.2.22. POTENCIA DE SALIDA NORMALIZADA DEL DIODO LÁSER USADO PARA TRANSMITIR LA ENERGÍA. 66 | |
| FIGURA 4.2.23. EFICIENCIA DE CONVERSIÓN DE LA CELDA VS LONGITUD DE ONDA INCIDENTE | 67 |
| FIGURA 4.2.24. VISTA SUPERIOR DE LA FOTOCELDA RECEPTORA UTILIZADA | 68 |
| FIGURA 4.2.25. POTENCIA ELÉCTRICA DE SALIDA VS POTENCIA ÓPTICA INCIDENTE | 68 |
| FIGURA 4.3.1. SISTEMA DE LOCOMOCIÓN PARA LA ESCALA DE CENTÍMETROS, DEL PROTOTIPO DEL MINIROBOT 71 | |
| FIGURA 4.3.2. IMÁGENES DE LOS MICROROBOT DISEÑADOS POR EDQVIST, DONDE SE MUESTRA EL TAMAÑO EN COMPARACIÓN CON DOS OBJETOS COTIDIANOS. LAS FOTOS APARECEN EN [9] Y SON REPRODUCIDAS EN EL ARTÍCULO CON PERMISO DE E. EDQVIST. | 72 |
| FIGURA 4.3.3. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS ELEMENTOS DE DISEÑO DEL MINIROBOT | 73 |
| FIGURA 4.3.4. FLUJO DE CONSTRUCCIÓN GENERAL DE ACTUADORES (RESONADORES) BIMORFOS | 74 |
| FIGURA 4.3.5: A) SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA IMPEDANCIA DEL MATERIAL PIEZOELÉCTRICO, B) CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UN PIEZOELÉCTRICO CERCA DE LA RESONANCIA [14] | 76 |
| FIGURA 4.3.6: A) ESQUEMA DE MEDICIÓN DE CARGAS DESPLAZADAS E INTEGRACIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA B) CIRCUITO SAYER-TOWER PARA LA MEDICIÓN DE HISTÉRESIS FERROELÉCTRICA[14]. | 77 |
| FIGURA 4.3.7: ESQUEMA DE EXCITACIÓN ELÉCTRICA DEL BIMORFO MULTICAPA VISTA | 78 |
| DESDE SU SECCIÓN TRANSVERSAL. | 78 |
| FIGURA 4.3.8.: A) PROCESO DE FIJACIÓN DEL BIMORFO A LA ESTRUCTURA, B) ESTRUCTURA DEL MÓDULO DE CAMINATA TERMINADO [14] | 78 |
| FIGURA 4.3.9: POLARIDAD ESTABLECIDA EN EL BIMORFO SIMPLE | 79 |
| FIGURA 4.3.10: A) GRÁFICA DE TENSIÓN ELÉCTRICA VS DEFLEXIÓN PARA EL ACTUADOR BIMORFO. B) DESPLAZAMIENTO EN EL EJE Z OBTENIDO AL APLICAR 3 V DC AL ACTUADOR BIMORFO SIMPLE | 80 |
| FIGURA 4.3.11: POLARIDAD ESTABLECIDA EN EL BIMORFO SIMPLE CON SUBSTRATO DE KAPTON | 80 |
| FIGURA 4.3.12. DESPLAZAMIENTO EN EL EJE Z VS FRECUENCIA PARA EL ACTUADOR BIMORFO SIMPLE, PRIMERA APROXIMACIÓN | 82 |
| FIGURA 4.3.13: COMPORTAMIENTO DEL ACTUADOR BIMORFO SIMPLE AL UTILIZAR UNA TENSIÓN DE | 82 |
| 3 V PICO CON UNA FRECUENCIA DE A) 28,769731 Hz Y B) 181,249294 Hz | 82 |
| FIGURA 4.3.14: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE ESTRÉS DE VON MISES PARA EL BIMORFO SIMPLE AL UTILIZAR UNA TENSIÓN DE 3 V PICO CON UNA FRECUENCIA DE A) 28,769731 Hz Y B) 181,249294 Hz. | 83 |
| FIGURA 4.3.15: A) DIAGRAMA DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN PARA EL MINIBOT, ESCALA EN METROS. B) UNIÓN DE LA PLATAFORMA CON UNA DE LAS PATAS DEL PROTOTIPO | 85 |
| FIGURA 4.3.16: DEFORMACIÓN DEL PROTOTIPO (MM) AL APLICARLE UNA FUERZA DE $400,98 \times 10^{-3}$ N | 86 |
| SOBRE LA PLATAFORMA PRINCIPAL, EN LOS EJES: A) EJE Z, B) EJE X, C) EJE Y. | 86 |
| FIGURA 4.3.17: SOLUCIÓN OBTENIDA AL APLICARLE UN ANÁLISIS DE ESTRÉS VON MISES, | 87 |
| LA ESCALA ESTÁ EN PA | 87 |
| FIGURA 4.3.18: GEOMETRÍA DEL MODELO DE TAMAÑO REAL QUE INCLUYE LAS CAPAS METÁLICAS | 88 |
| FIGURA 4.3.19: COMPORTAMIENTO DEL CANTILÉVER AL ESTAR EN : A) PRIMERA, B) SEGUNDA, Y C) TERCERA FRECUENCIA DE RESONANCIA | 89 |
| FIGURA 4.3.20: GRÁFICO DE DESPLAZAMIENTO EN EL EJE Z OBTENIDO AL HACER LA SIMULACIÓN. | 90 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 4.3.21: VARIACIÓN DEL ESFUERZO DE VON MISES OBTENIDO AL HACER VARIAR EL TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO EN LA SIMULACIÓN..... | 90 |
| FIGURA 4.3.22: DESPLAZAMIENTO DEL CANTILÉVER BIMORFO DE 4 CAPAS, AL APLICARLE UNA SEÑAL CUADRADA CON AMPLITUD DE 3 V PICO EN FRECUENCIA DE RESONANCIA Y BAJO LA ACCIÓN DE UNA MASA DE 13, 33 MG..... | 92 |
| FIGURA 4.3.23: COMPORTAMIENTO DEL BIMORFO DE 4 CAPAS, AL APLICARLE UNA SEÑAL CUADRADA CON AMPLITUD DE 3 V EN FRECUENCIA DE RESONANCIA Y BAJO UNA CARGA DE 13, 33 MG | 93 |
| FIGURA 4.3.24: MODELO UTILIZADO QUE CONTEMPLA LA CURVATURA EN LA UNIÓN DE LA PLATAFORMA | 93 |
| FIGURA 4.3.25: MODELO MEJORADO QUE CONTEMPLA EL PERFILADO DE LA PUNTA DE LA PATA PARA MEJORAR SU DESEMPEÑO EN CONDICIONES DE FRICCIÓN, SE OBSERVAN LAS DIMENSIONES REALES EN VISTA A) DE PERFIL, B) FRONTAL..... | 94 |
| FIGURA 4.3.26: COMPORTAMIENTO DEL CANTILÉVER BIMORFO DE 4 CAPAS CON CURVATURA AL APLICARLE UNA SEÑAL CUADRADA CON AMPLITUD DE 3 V PICO EN FRECUENCIA DE RESONANCIA Y SOPORTAR UNA MASA DE 13, 33 MG, A) DESPLAZAMIENTO, B) TENSIÓN DE LA ESTRUCTURA, C) DESPLAZAMIENTO DEL MODELO MEJORADO, D) TENSIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO MEJORADO. | 96 |
| FIGURA 4.3.27: IMAGEN DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DEL ROBOT SPIDERBOT | 98 |
| FIGURA 4.3.28: IMAGEN DE LAS CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS PROPORCIONADAS POR LA EMPRESA PHYSIK INSTRUMENTE UTILIZADAS EN EL MÓDULO DE LOCOMOCIÓN DEL SPIDERBOT..... | 98 |
| FIGURA 4.3.29: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE LOS ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS SEGÚN EL FABRICANTE | 99 |
| FIGURA 4.3.30: DIAGRAMA DE CONEXIÓN EXPERIMENTAL DE LOS ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS. | 100 |
| FIGURA 4.3.31. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DEL PROTOTIPO PARA EL ENSAYO CON UNA PATA Y CUERPO DE KAPTON..... | 101 |
| FIGURA 4.3.32. CONFIGURACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL ROBOT PARA EL ENSAYO CON UNA PATA Y KAPTON. | 102 |
| FIGURA 4.3.33: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DEL PROTOTIPO PARA EL ENSAYO CON UNA PATA, KAPTON Y LÁMINA DE COBRE..... | 103 |
| FIGURA 4.3.34: CONFIGURACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL ROBOT PARA EL ENSAYO CON UNA PATA, KAPTON Y LÁMINA DE COBRE..... | 103 |
| FIGURA 4.3.35. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DEL PROTOTIPO PARA EL ENSAYO CON UNA PATA, KAPTON, IMPRESO, LÁMINA DE COBRE Y UNA CAPA DELGADA DE EPOXY COMO BISAGRA..... | 105 |
| FIGURA 4.3.36: CONFIGURACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL ROBOT PARA EL ENSAYO CON UNA PATA, KAPTON, IMPRESO, LÁMINA DE COBRE Y EL EPOXY. | 105 |
| FIGURA 4.3.37: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DEL PROTOTIPO PARA EL ENSAYO ... | 106 |
| CON UNA PATA, PLACA DE CIRCUITO IMPRESO Y BISAGRA DE ALUMINIO. | 106 |
| FIGURA 4.3.38: CONFIGURACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL ROBOT PARA EL ENSAYO CON UNA PATA, PLACA DE CIRCUITO IMPRESO Y BISAGRA DE ALUMINIO..... | 106 |
| FIGURA 4.3.39: ESTRUCTURA FINAL DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DEL ROBOT CON TODAS LAS PATAS..... | 107 |
| FIGURA 4.3.40. IMAGEN DEL DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR LOS ELEMENTOS DE ACTUACIÓN (UNIDAD FUENTE-MEDIDORA KEITHLEY 2636A)..... | 108 |
| FIGURA 4.4.1. GEOMETRÍA BÁSICA DE UN ACTUADOR LAMINAR BIMORFO | 114 |
| FIGURA 4.4.2. ACTUADOR PARA POSICIONAMIENTO CON DOS GRADOS DE LIBERTAD | 114 |
| FIGURA 4.4.3. DESPLAZAMIENTO DEL ACTUADOR LAMINAR BIMORFO VS VOLTAJE APLICADO A $L = 805 \mu\text{M}$ | 116 |
| FIGURA 4.4.4. DESPLAZAMIENTO EN EL EJE Y CONTRA VOLTAJE APLICADO PARA EL MICROPOSICIONADOR DE ESPESOR REDUCIDO | 117 |
| FIGURA 4.4.5. DESPLAZAMIENTO EN EL EJE X CONTRA VOLTAJE APLICADO PARA EL MICROPOSICIONADOR DE ESPESOR REDUCIDO | 117 |
| FIGURA 4.4.6. REGIONES DE MAXIMA TENSION DE VON MISES PARA EL MICROPOSICIONADOR GRUESO | 119 |
| FIGURA 4.4.7. DESPLAZAMIENTO EN EL EJE X CONTRA FRECUENCIA PARA EL ACTUADOR LAMINAR BIMORFO CON $L = 805 \mu\text{M}$ | 120 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 4.4.8. COMPORTAMIENTO DEL ACTUADOR LAMINAR BIMORFO A..... | 121 |
| LA PRIMERA FRECUENCIA DE RESONANCIA PARA $L = 580 \mu\text{M}$ | 121 |
| FIGURA 4.4. 9. DEFORMACIÓN DEL ACTUADOR LAMINAR BIMORFO..... | 121 |
| A LA SEGUNDA FRECUENCIA DE RESONANCIA PARA $L = 580 \mu\text{M}$ | 121 |
| FIGURA 4.4.10. DESPLAZAMIENTO EN EL EJE X CONTRA FRECUENCIA PARA EL MICROPOSICIONADOR GRUESO | 122 |
| FIGURA 4.4.11. DESPLAZAMIENTO EN EL EJE Y CONTRA FRECUENCIA PARA EL MICROPOSICIONADOR GRUESO | 122 |
| FIGURA 4.4.12. DIAGRAMA GENERAL DEL ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO. | 123 |
| FIGURA 4.4.13. LÁMINA DE KAPTON PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE ESTRUCTURAL DEL ACTUADOR.... | 124 |
| FIGURA 4.4.14. LÁMINA DE MATERIAL PIEZOELÉCTRICO PVDF | 124 |
| FIGURA 4.4.15. ESPECIFICACIÓN DE LOS SEGMENTOS DE MATERIAL PIEZOELÉCTRICO (PVDF) NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL ACTUADOR PARA POSICIONAMIENTO..... | 125 |
| FIGURA 4.4.16. DIMENSIONES DE LAS PIEZAS DE KAPTON PARA LA ESTRUCTURA DEL ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO | 126 |
| FIGURA 4.4.17. CABLE Y LÁMINA DE COBRE..... | 126 |
| FIGURA 4.4.18. DIMENSIONES DE LAS PIEZAS DE COBRE PARA LOS CONTACTOS DEL ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO | 127 |
| FIGURA 4.4.19. DIAGRAMA DEL PROCESO DE ENSAMBLE DEL ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO SIN CONTACTOS EXTERIORES..... | 128 |
| FIGURA 4.4.20. DIAGRAMA DEL PROCESO DE ENSAMBLE DEL ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO CON CONTACTOS EXTERIORES Y CORTE FINAL..... | 129 |
| FIGURA 4.4.21. ALIMENTACIÓN DE SEÑAL DE PRUEBA EN EL ACTUADOR..... | 130 |
| FIGURA 4.4.23. IMAGEN DEL ACTUADOR DE POSICIONAMIENTO IMPLEMENTADO | 131 |
| CON SEGMENTO INICIAL DE 1 CM. | 131 |
| FIGURA 4.4.24. ALIMENTACIÓN DE LOS SEGMENTOS DEL ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO..... | 132 |
| FIGURA 4.4.25. DIAGRAMA DE COMPROBACIÓN ALTERNATIVA DE LOS ACTUADORES IMPLEMENTADOS | 133 |
| FIGURA 4.4.26. DIAGRAMA GENERAL DE LA PILA PIEZOELÉCTRICA | 134 |
| FIGURA 4.4.27. DIAGRAMA DEL PROCESO DE ENSAMBLE DE LA PILA PIEZOELÉCTRICA | 136 |
| FIGURA 4.4.28 IMAGEN DE LA PILA PIEZOELÉCTRICA IMPLEMENTADA..... | 137 |
| FIGURA 4.4.29. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE LA PILA PIEZOELÉCTRICA Y EL COMPORTAMIENTO ESPERADO AL APLICAR UN POTENCIAL ELÉCTRICO | 138 |
| FIGURA 4.4.30. GEOMETRÍA UTILIZADA PARA LA SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE | 139 |
| FIGURA 4.4.31. ASIGNACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LA SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE | 140 |
| FIGURA 4.4.32. ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA..... | 142 |
| FIGURA 4.4.33. MALLADO DE LA GEOMETRÍA | 143 |
| FIGURA 4.4.34. DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DEL MALLADO | 143 |
| FIGURA 4.4.35. ANÁLISIS DE VON MISES Y DESPLAZAMIENTO MÁXIMO DE LA HERRAMIENTA DE CORTE CON PUNTA DE DIAMANTE..... | 144 |
| FIGURA 4.4.36. ACERCAMIENTO DE LA FIGURA 4.4.35 EN LA ZONA DE CORTE CON PUNTA DE DIAMANTE | 145 |
| FIGURA 4.4.37. ANÁLISIS DE VON MISES Y DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON PUNTA DE TUNGSTENO | 146 |
| FIGURA 4.4.38. ACERCAMIENTO DE LA FIGURA 4.4.37..... | 146 |
| FIGURA 4.4.39. ANÁLISIS DE VON MISES Y DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON PUNTA DE DIAMANTE TRAS UN SEGUNDO GOLPE DE LA HERRAMIENTA..... | 147 |
| FIGURA 4.4.40. ACERCAMIENTO DE LA FIGURA 4.4.39..... | 147 |
| FIGURA 4.4.41. SECUENCIA DE SIMULACIONES PARA APROXIMAR EL CORTE DE LA INTERCONEXIÓN. | 149 |
| FIGURA 4.5.1. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE CONEXIONES DEL PCB EN SU DISEÑO FINAL | 150 |
| FIGURA 4.5.2. DIAGRAMA DE CONEXIONES (LAYOUT) DEL PCB EN DISEÑO FINAL | 151 |
| FIGURA 4.5.3. UTENSILIOS PARA APLICACIÓN DE LA PASTA DE SOLDADURA | 153 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 4.5.4. MÁQUINA DE ENSAMBLE..... | 154 |
| FIGURA 4.5.5. REPOSITORIO DE COMPONENTES Y BRAZO DE VACÍO DE LA MÁQUINA DE ENSAMBLE | 154 |
| FIGURA 4.5.6. ACERCAMIENTO DEL BRAZO DE VACÍO Y LA CÁMARA DE LA MÁQUINA DE ENSAMBLE | 155 |
| FIGURA 4.5.7. VISTA SUPERIOR DEL PROTOTIPO DEL MINIROBOT..... | 156 |
| FIGURA 4.5.8. VISTA FRONTAL DEL PROTOTIPO DEL MINIROBOT | 156 |
| FIGURA 4.5.9. DISTRIBUCIÓN FÍSICA DE COMPONENTES Y FUNCIONES ELECTRÓNICAS IMPLEMENTADAS EN EL PROTOTIPO DEL MINIROBOT..... | 157 |
| FIGURA 4.5.11. OSCILOGRAMAS DE PRUEBA DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN..... | 159 |
| FIGURA 4.5.12. VISTA SUPERIOR DEL PRIMER MODELO PARA ESTUDIO DE LOS ALGORITMOS DE LOCOMOCIÓN..... | 160 |
| FIGURA 4.5.13. VISTA INFERIOR DEL PRIMER MODELO PARA ESTUDIO DE LOS ALGORITMOS DE LOCOMOCIÓN . | 161 |
| FIGURA 4.5.14. KÍT DE DESARROLLO CONECTADO A LOS SERVOMOTORES DEL SEGUNDO MODELO PARA EVALUACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE LOCOMOCIÓN | 163 |
| FIGURA 4.5.15. MODELO 2 EJECUTANDO MOVIMIENTO BASADO EN LA CAMINATA DE LOS CONEJOS | 164 |
| FIGURA 4.5.16. MODELO 2 EJECUTANDO MOVIMIENTO BASADO EN EL TROTE..... | 165 |
| FIGURA 4.5.17. MODELO DE ROBOT IMPRESO EN PAPEL PARA PROBAR LOS ALGORITMOS DE SEGUIMIENTO.... | 168 |
| FIGURA 4.5.18. MARCAS CON DIFERENTES FONDOS RECONOCIDAS POR EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO DEL ROBOT | 168 |
| FIGURA 4.5.19. A) FAJA SIN FIN PARA SIMULAR EL MOVIMIENTO DEL MINIROBOT EN LOS EXPERIMENTOS DE DETECCIÓN DE IMAGEN, B) SERVOMOTORES PARA EL MOVIMIENTO DE LA FAJA | 170 |
| FIGURA 4.5.20. ALTERNANCIA DE MODELOS DE PAPEL BLANCOS Y NEGROS PARA SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL MINIROBOT | 170 |
| FIGURA 4.5.21. APERTURA DEL OBJETIVO DE LA CÁMARA PARA RECONOCIMIENTO DEL MINIROBOT | 171 |
| FIGURA 4.5.22. APERTURA MÁXIMA AL APLICAR EL MÁXIMO ZOOM DISPONIBLE | 172 |
| FIGURA 4.5.23. ROBOT AUXILIAR PARA LAS PRUEBAS DE INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SEGUIMIENTO Y CAPTURA DE IMAGEN | 173 |
| FIGURA 4.5.24. MAQUETA PARA LA PRUEBA DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y CAPTURA DE IMAGEN | 173 |
| FIGURA 4.5.25. VENTANAS DE LA APLICACIÓN INTEGRADORA DE DETECCIÓN Y RASTREO DEL MINIROBOT SIN CONEXIÓN ESTABLECIDA | 175 |
| FIGURA 4.5.26. VENTANAS DE LA APLICACIÓN INTEGRADORA DE DETECCIÓN Y RASTREO DEL MINIROBOT CON CONEXIÓN ESTABLECIDA | 175 |
| FIGURA 4.5.27. INTERFAZ DE PRUEBA DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO [24]..... | 176 |
| FIGURA 4.5.28. APLICACIÓN DE DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO EN PLENA EJECUCIÓN..... | 176 |
| FIGURA 4.5.29. APLICACIÓN CLIENTE RECIBIENDO LAS COORDENADAS DE UBICACIÓN DEL ROBOT | 177 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| TABLA 4.1.1. MEDICIÓN DE LA TENSIÓN OBTENIDA EN EL DIODO RECEPTOR (EN VOLTIOS) AL CAMBIAR EL ÁNGULO Y LA DISTANCIA CON RESPECTO A UN DIODO TRANSMISOR FIJO | 30 |
| TABLA 4.3.1. CONSTANTES PIEZOELÉCTRICAS OBTENIDAS DE LA IMPEDANCIA DEL MATERIAL KAPTON LAMINADO [14] | 76 |
| TABLA 4.3.2. VALORES DE POLARIZACIÓN REMANENTE Y CAMPO COERCITIVO PARA DIFERENTES TENSIONES DE EXCITACIÓN..... | 77 |
| TABLA 4.3.3. VALORES TEÓRICOS Y OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN PARA LAS CONFIGURACIONES DEL ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO | 80 |
| TABLA 4.3.4 VALORES OBTENIDOS DEL ANÁLISIS EN FRECUENCIA PARA EL ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO | 83 |
| TABLA 4.3.5. FRECUENCIAS DE RESONANCIA OBTENIDAS AL APLICAR EL ANÁLISIS DE FRECUENCIA | 88 |
| TABLA 4.3.6. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA PARA DIFERENTES ELECTRODOS METÁLICOS MEDIANTE LA SIMULACIÓN..... | 91 |
| TABLA 4.3.7. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA AL UTILIZAR DIFERENTES CAPAS DE MATERIAL ACTIVO PVDF | 91 |
| TABLA 4.3.8. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA AL UTILIZAR 4 CAPAS DE MATERIAL ACTIVO PVDF EN DISTINTOS MODELOS BAJO LA CARGA DE UNA MASA DE 13,334 MG..... | 97 |
| TABLA 4.3.9. FRECUENCIAS DE RESONANCIA PARA LOS ELEMENTOS DE LOCOMOCIÓN DEL SISTEMA FINAL DE LA FIGURA 4.3.1 | 100 |
| TABLA 4.3.10. DATOS DE CORRIENTE PICO SUMINISTRADA A UN ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO (PATA) DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN PARA DIFERENTES TIEMPOS MEDIDOS EN EL SMU KEITHLEY 2636A | 108 |
| TABLA 4.3.11. DATOS DE CORRIENTE PICO SUMINISTRADA A DOS ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS (PATAS) DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN PARA DIFERENTES TIEMPOS MEDIDOS EN EL SMU KEITHLEY 2636A | 110 |
| TABLA 4.3.12. DATOS PARA DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE POTENCIA DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DEL ROBOT DE ACUERDO CON EL NÚMERO DE PATAS ACTIVADAS | 110 |
| TABLA 4.4.1. DESPLAZAMIENTO MÁXIMO DE LOS ACTUADORES SIN CARGA | 116 |
| TABLA 4.4.2. TENSIÓN DE VON MISES SIN CARGA | 119 |
| TABLA 4.4.3. FRECUENCIA DE RESONANCIA OBSERVABLE OBTENIDA PARA CADA UNO DE LOS ACTUADORES IMPLEMENTADOS | 132 |
| TABLA 4.4.4. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE | 140 |
| TABLA 4.5.1. COMPONENTES ELECTRÓNICOS INCLUIDOS EN EL PROTOTIPO DEL MINIROBOT | 151 |
| TABLA 4.5.2. CONEXIONES DEL PROGRAMADOR..... | 157 |

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Antecedentes

Después de su fabricación, un circuito integrado pasa por varias etapas de caracterización y prueba para verificar su funcionalidad y el cumplimiento de las especificaciones eléctricas. Todo este proceso se lleva a cabo para detectar fallas en los circuitos integrados. En caso de fallas repetitivas en diferentes dados de silicio, debe determinarse la causa de la falla para su corrección, de forma que se minimice la cantidad de datos defectuosos por cada oblea.

La determinación del lugar, causa y forma de corrección de la falla se conoce como análisis de fallas.

Inicialmente en la etapa de detección de fallas se utilizan pruebas paramétricas y se aplican vectores de prueba en los pines de entrada del circuito integrado, para diagnosticar la existencia de fallas según la respuesta del circuito medida en los pines de salida.

La caracterización eléctrica de un circuito permite interpretar con mayor precisión cuál es la zona de falla, en comparación con la primera aproximación por medio de pruebas paramétricas utilizando los pines de entrada y salida del chip, y constituye una técnica muy importante en el análisis de fallas. Asimismo, los resultados de la caracterización eléctrica permiten determinar el tipo de falla que se está presentando y por lo tanto ayudar a encontrar su causa exacta, como por ejemplo, un dieléctrico de compuerta dañado, un cortocircuito debido a electromigración, un circuito abierto causado por metalización defectuosa, efectos de portadores de carga calientes, daños por descargas electrostáticas, entre otros posibles mecanismos de falla.

La figura 2.1 muestra un sistema típico de caracterización eléctrica manual utilizada para probar prototipos de circuitos integrados, incluyendo un analizador de redes principalmente utilizado para las pruebas de circuitos de radio frecuencia. Cuando los circuitos no operan en el rango de radiofrecuencias, típicamente se utiliza un sistema de caracterización de semiconductores (SCS por sus siglas en inglés) para determinar la respuesta eléctrica de los circuitos a probar. En la figura 2.1 se aprecia el sistema de visualización que permite determinar la posición en la se colocan las puntas de prueba manejadas por los manipuladores en los sistemas de manipulación

convencionales. Estos sistemas manuales se utilizan para circuitos prototipo; en este caso se cuenta con un microscopio óptico por medio del cual el operador puede determinar la posición de las puntas de prueba, las cuales están sostenidas y manejadas por los micromanipuladores.

En sistemas más avanzados de medición, como por ejemplo los de microprocesadores de última tecnología no es posible observar las estructuras de tamaño mínimo con microscopio óptico, ya sean éstas transistores o contactos. Para observarlas debe recurrirse a un microscopio de barrido electrónico, SEM por sus siglas en inglés.

Dentro de la cámara del microscopio electrónico debe existir un ambiente de vacío. Por lo tanto, la comunicación con el mundo exterior se realiza por medio de las conexiones triaxiales que llevan las señales del sistema de caracterización eléctrica hasta los micromanipuladores. La figura 2.2 muestra una cámara de vacío de un microscopio SEM.

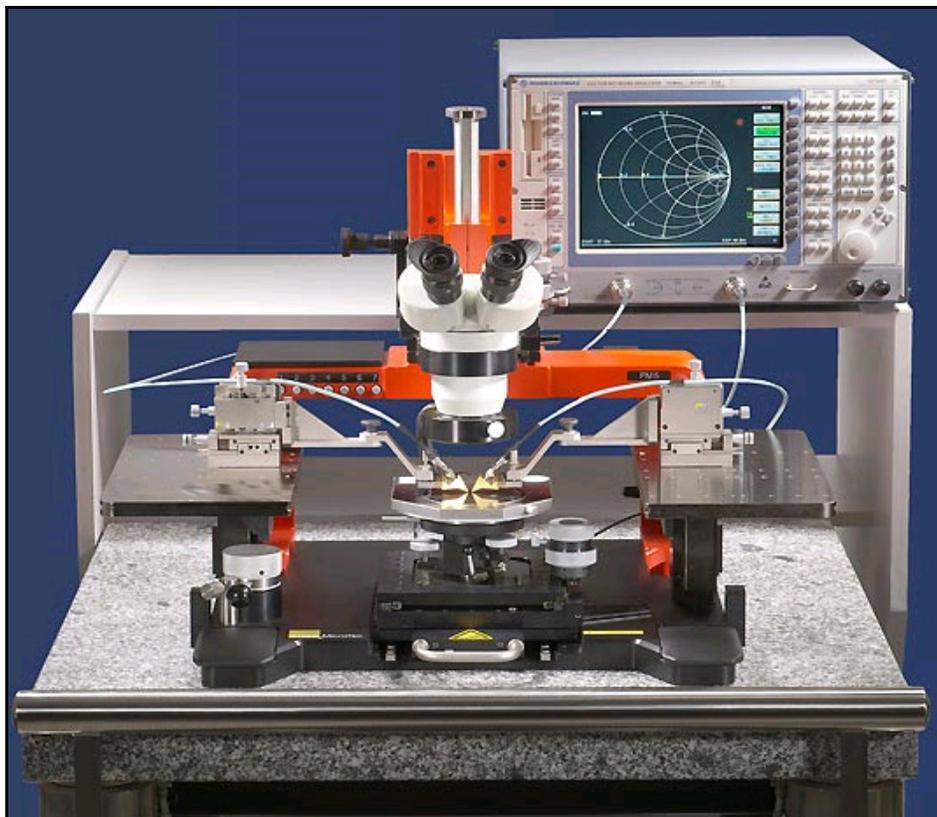


Figura 2.1. Sistema de medición eléctrica manual para circuitos integrados [1]

Los micromanipuladores son sistemas mecánicos que permiten un posicionamiento preciso en el rango de los micrómetros o nanómetros en los ejes X, Y y Z. Estos

micromanipuladores pueden también ser electromecánicos. En este caso, los micromanipuladores son controlados por actuadores piezoeléctricos, alcanzando una gran precisión de manipulación. Típicamente las tensiones de actuación de estos sistemas piezoeléctricos son altas, alcanzando el rango de decenas a centenas de voltios.

El tamaño de los micromanipuladores impide colocar más de cuatro puntas de prueba en la cámara del SEM, y por lo tanto no pueden hacerse pruebas más avanzadas a los circuitos integrados. La figura 2.3 muestra un ejemplo de 4 micromanipuladores electromecánicos sosteniendo 4 puntas de prueba para la medición de circuitos integrados. Puede verse el tamaño de los micromanipuladores, los cuales son demasiado grandes para muchas cámaras de medición y por lo tanto no permiten colocar más de cuatro puntas de prueba a la vez.

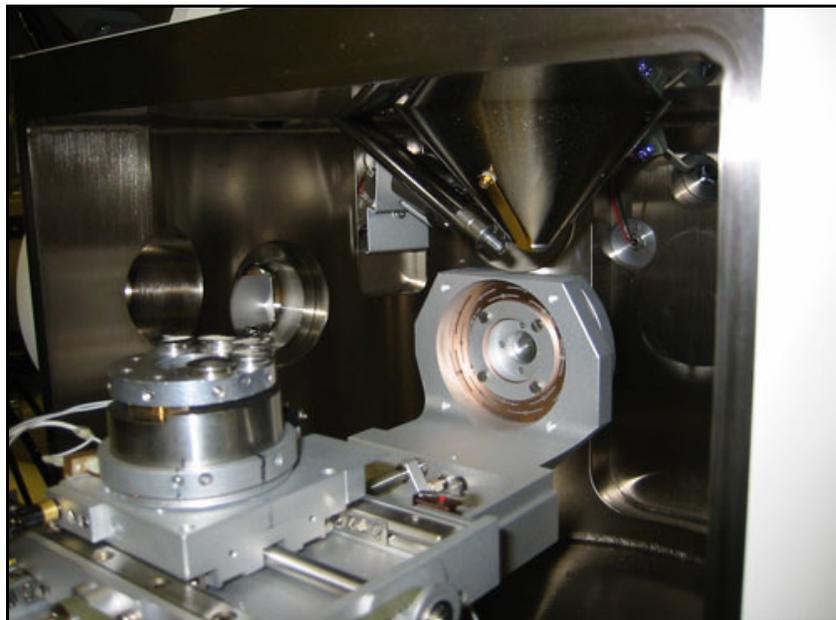


Figura 2.2. Cámara de vacío de un microscopio de barrido electrónico [2]

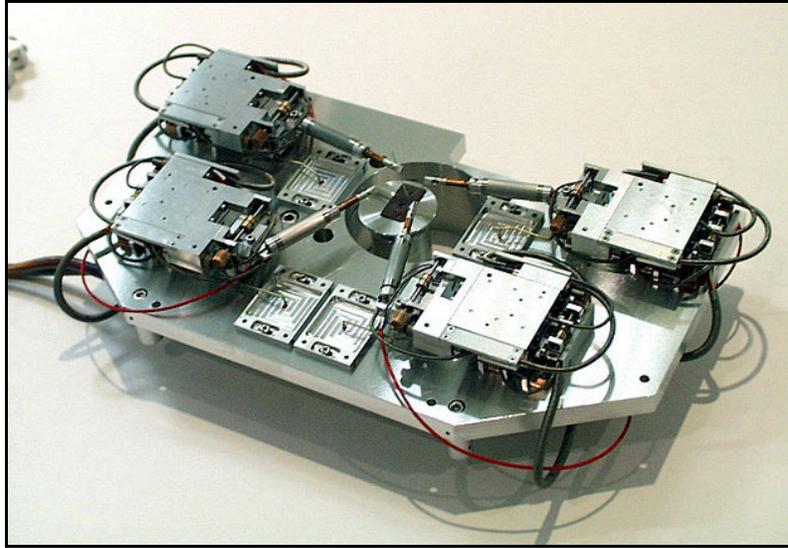


Figura 2.3. Sistema de micromanipuladores para caracterización eléctrica de circuitos integrados [3]

Aunque para la caracterización básica de circuitos integrados se requieren al menos cuatro puntas de prueba, en muchos casos no se requieren medir solamente transistores sino sistemas más complejos como compuertas lógicas o registros. En este caso es muy probable que existan múltiples terminales de entrada y de salida que deban contactarse, además de las conexiones de alimentación y tierra. En estos casos cuatro puntas no son suficientes para realizar otras pruebas eléctricas que permitan entender mejor la causa de la falla.

Las puntas de prueba son colocadas en los puntos de contacto del circuito. Normalmente, los puntos de contacto para entrada y salida de un circuito integrado son contactos metálicos (pads), con dimensiones de aproximadamente $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$. Sin embargo, en el análisis de fallas se intenta aislar una zona específica del circuito integrado como la causante de la falla. Los pines de entrada y salida conectados a la región de falla se determinan por medio de pruebas paramétricas. Posteriormente, el diseñador del circuito realiza una primera aproximación de los posibles circuitos que al fallar, causan el comportamiento observado. Un análisis más profundo de la ubicación de la falla se da al tomar regiones específicas del circuito integrado y contactar directamente las estructuras existentes utilizando puntas de prueba, en vez de utilizar los pines metálicos de entrada y salida.

Con la miniaturización de los circuitos integrados hasta alcanzar escalas nanométricas, el posicionamiento de puntas de prueba para analizar circuitos integrados fabricados utilizando dimensiones mínimas menores que $45\ \text{nm}$ se hace sumamente difícil. Conforme la tecnología de integración avanza, el espacio deben

colocarse estos puntos de prueba se disminuye cada vez más, así como la separación entre las interconexiones metálicas a contactar. Por lo tanto, las puntas de prueba de diámetros micrométricos podrían contactar de forma involuntaria dos o más conexiones adyacentes provocando una aplicación errada de estímulos eléctricos al circuito, ya que se estimula eléctricamente no solamente la región que se desea analizar sino también regiones adyacentes.

La figura 2.4 muestra el detalle de una punta de tungsteno para caracterización eléctrica de circuitos integrados. Puede observarse cómo el fabricante debe ir afinando la punta hasta lograr 50nm de diámetro. Al disminuir el diámetro de la punta, ésta se vuelve más costosa y más frágil. La punta convencional no puede seguir empequeñeciendo su diámetro por medio de los métodos estándar de fabricación. Por esto debe buscarse una forma alternativa de fabricar la punta, cambiando el material o la forma que se implementan.

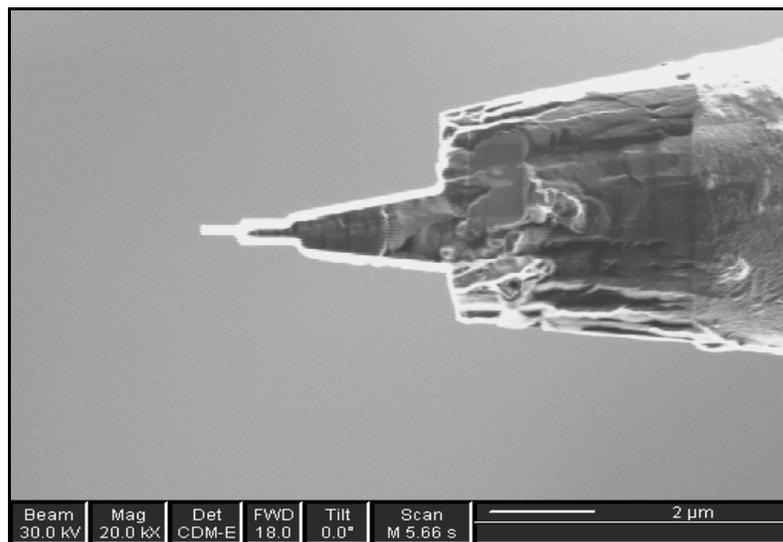


Figura 2.4. Detalle de punta de prueba de tungsteno para caracterización eléctrica de circuitos integrados [4]

Otra razón para disminuir el diámetro de las puntas de prueba es que para algunas pruebas deben interrumpirse conexiones metálicas para aislar el punto de falla. Estas interconexiones tienen normalmente un ancho mínimo menor que $1\mu\text{m}$, pero algunas de ellas pueden tener anchos de hasta $10\mu\text{m}$. Las interconexiones angostas reducen grandemente el área disponible para posicionar las puntas de prueba, que normalmente se hubieran ubicado en los pads correspondientes a los pines de entrada y salida. Por esta razón no solamente se requiere una gran precisión de posicionamiento sino también puntas de prueba con diámetros muy reducidos que permitan llegar a los puntos específicos donde se desean contactar. La figura 2.5

muestra el detalle de un micromanipulador manual sosteniendo las puntas de prueba de tungsteno que permiten contactar las estructuras a medir en el circuito integrado.

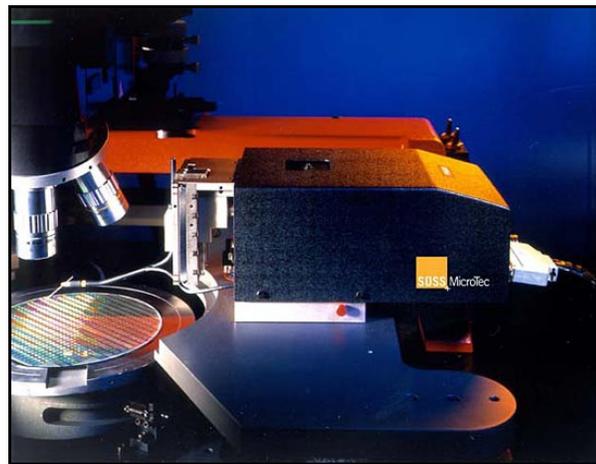


Figura 2.5. Detalle de micromanipuladores sosteniendo puntas de prueba de tungsteno [5]

La aplicación de los estímulos de caracterización eléctrica y la medición de la respuesta de los circuitos se realiza por medio de un sistema de caracterización eléctrica. La figura 2.6 muestra una fotografía de un sistema de caracterización eléctrica de semiconductores modelo SCS-4200 de la marca Keithley. Este sistema de caracterización eléctrica puede manejar hasta 4 canales de unidad fuente-medidor con los cuales se aplican estímulos eléctricos a los dispositivos bajo prueba y se mide su respuesta.



Figura 2.6. Sistema de caracterización eléctrica con cuatro canales fuente medidor modelo 4200SCS Marca Keithley [6]

Los sistemas fuente-medidor industriales permiten medir un amplio rango de corrientes, desde 10^{-15} A hasta 1A o más, así como un rango de tensiones desde 10^{-6} V hasta las decenas de voltios.

Los dispositivos fuente-medidor se localizan fuera del ambiente de prueba de la estación medidora de circuitos integrados. Se conectan con el interior de la cámara de medición por conexiones triaxiales o coaxiales. La cámara de medición normalmente se encuentra aislada del mundo exterior por medio de una cubierta metálica que permite de interferencia electromagnética. Dentro de la cámara, los micromanipuladores se conectan con los dispositivos fuente-medidor por medio de una conexión triaxial, transmitiendo la señal hasta la punta de prueba.

La versatilidad de estos sistemas consiste en utilizar señales de prueba variables, usando un patrón definido por el usuario. Una aplicación común es obtener las curvas I-V de un dispositivo, lo cual se logra realizando un barrido de tensión en períodos de tiempo y obteniendo los valores correspondientes de corriente. Una SMU opera junto con un sistema de control, que le proporcione las señales necesarias para programar el modo de operación y obtener los datos medidos.

Con la miniaturización de la microelectrónica a escalas nanométricas (dimensiones menores que 100nm), el tamaño de los manipuladores y puntas de prueba para caracterización eléctrica en el análisis de fallas de circuitos integrados disponible actualmente en el mercado es demasiado grande para la medición de estructuras de las dimensiones mínimas de la tecnología, pues el tamaño de las puntas de prueba no es suficientemente pequeño para contactar los circuitos y el número de manipuladores para las pruebas se incrementa conforme aumenta la complejidad de los circuitos a medir y las pruebas requeridas. Se estima que debido a su tamaño, estos dispositivos de caracterización eléctrica no sean aplicables para análisis de fallas de circuitos fabricados con tecnologías de dimensiones mínimas menores que 45nm. Actualmente, en las instalaciones de Intel Costa Rica se ensamblan y prueban circuitos integrados con dimensiones mínimas de 32nm.

Un dispositivo miniaturizado, es decir un robot miniaturizado, ayudaría a resolver este problema. La integración de las puntas de prueba y sus manipuladores, así como las unidades de fuente-medición en un solo dispositivo permitiría mejorar el posicionamiento global y fino de las puntas de prueba, así como a reducir el tamaño de las puntas de prueba y sus manipuladores tal como es requerido por las nuevas tecnologías. El robot llevaría a cabo caracterización eléctrica y manejaría el posicionamiento de las puntas de prueba. Asimismo, incluiría los circuitos de control necesarios para la manipulación de otras herramientas mecánicas que podrían incorporarse más adelante. La exploración de este problema originó los proyectos de

investigación de nombre “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos”. Las especificaciones principales del robot en su versión final, para esta aplicación específica, son:

- Pequeño volumen: de ser posible, no mayor que 5 mm³
- 8 unidades fuente-medidor
- Rango de voltaje para caracterización eléctrica: -1.3V a 1.3V
- Rangos de medición de corriente: mA, μ A and nA.
- Desplazamiento mínimo x-y: 35 mm x 35 mm
- Altura máxima: distancia entre dispositivo de prueba y microscopio: 5 mm
- Ventana de visión para el microscopio: mínimo 30 μ m x 30 μ m
- Tamaño máximo de dados de silicio a medir: 35mm x 35 mm
- Tamaño máximo de obleas a medir: 8” de diámetro

Para explorar la posibilidad de implementar un sistema de este tipo, Intel Costa Rica financió parcialmente, con una donación de fondos de investigación administrados por la Fundación del Centro Nacional de Alta Tecnología (según el propio deseo de Intel), los proyectos de nombre “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos”. Cabe destacar que en estos proyectos el apoyo financiero de Intel se dio en el marco de un incentivo a la investigación al ITCR y no como un contrato de investigación. Por otra parte, no fue posible para Intel continuar financiando investigación ni en el ITCR ni en la UCR debido a un cambio de políticas de la casa matriz, el cual se dio cuando aún los proyectos de nombre “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos” no habían terminado. Estos proyectos fueron concluidos previamente al inicio del proyecto “Robots miniaturizados: diseño, implementación y aplicaciones”, del cual se reporta en el presente informe.

Considerando que el minirobot, como un todo o en sus partes, podría ser utilizado posteriormente también para otras aplicaciones, se planteó el proyecto “Robots miniaturizados: diseño, implementación y aplicaciones”, que constituye un esfuerzo de investigación financiado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones por medio del Fondo de Incentivos. En este proyecto se exploran partes específicas del minirobot para realizar un primer prototipo simplificado y de mayor tamaño al requerido en la aplicación planteada en los proyectos anteriores, con el fin de no restringir el uso del minirobot a una única aplicación.

2.2 Revisión de literatura y problema a resolver

Como resultado de la revisión bibliográfica de los proyectos “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos”, se determinó que el minirobot más pequeño hasta ahora reportado en la literatura es el I-SWARM (Intelligent Small World Autonomous Robot for Micromanipulation), con un volumen total de 18 mm³. El proyecto en el cual se desarrolló el I-SWARM concluyó en junio del 2008 [7].

I-SWARM es capaz de locomoción autónoma y está equipado, como única herramienta, con un manipulador básico consistente en un cantilever, con lo que puede realizar operaciones muy sencillas de manipulación y exploración. Además de esto, puede comunicarse sin errores con otros minirobots de su mismo tipo localizados a una distancia máxima de 7mm y 10mm con la posibilidad de errores de comunicación. I-SWARM está concebido para operar en colaboración con otros minirobots del mismo tipo, logrando así una colonia inteligente que coopera para lograr una tarea específica, tal como las colonias de insectos. I-SWARM obtiene su energía de celdas solares y la almacena en capacitores de tantalio.

Por otra parte, el tamaño y consumo de potencia de los sistemas de radiofrecuencia hace difícil la comunicación de los minirobots por radio frecuencia. Además, en aplicaciones biomédicas y de microcirugía existen restricciones aún mayores en la energía de transmisión, pues deben contemplarse además las magnitudes límites para campos eléctricos y magnéticos definidas como seguras para el ser humano y que permitirán operar sin interferir con otros dispositivos médicos, así como las frecuencias de transmisión definidas para ambientes hospitalarios, por la misma razón de la interferencia con dispositivos médicos. En ambientes de microscopía electrónica, la comunicación por medio de radiofrecuencia interfiere con el funcionamiento del microscopio.

En los proyectos de investigación, “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos” se inició la concepción general del minirobot. De acuerdo con el conocimiento de la literatura que tenemos hasta ahora, no existe un minirobot similar al que se requiere para la caracterización de circuitos integrados o con características similares al que se planteó en este proyecto. Aspectos que diferencian este robot de los documentados en la literatura son:

- 1) Los robots reportados en la literatura pueden realizar solamente una tarea de manipulación, la cual además es muy simple. Algunos logran solamente locomoción. En este proyecto se exploró el desarrollo de dos herramientas para el minirobot: manipulación y corte.
- 2) La literatura no reporta ningún minirobot diseñado para operación en ambientes SEM.

- 3) La literatura reporta sistemas microelectromecánicos y robots capaces de locomoción enfocados en recorrer grandes distancias en comparación con su tamaño, pero ninguno enfocado a mejorar la resolución de paso.
- 4) En caso de utilizarse el minirobot para caracterización eléctrica, como en el análisis de fallas de circuitos integrados, la literatura no reporta ningún minirobot para mediciones eléctricas o aplicación de estímulos eléctricos, sea esto en proyectos de investigación o comerciales. El circuito integrado para este propósito fue implementado en el proyecto “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos”, y aunque en este proyecto no se planteó su incorporación en el prototipo del minirobot, en el futuro se podría incorporar.
- 5) La literatura no reporta ningún minirobot con un consumo de potencia tan alto como lo exige la aplicación de caracterización eléctrica y que se consideró en los proyectos “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos”. Esta es una característica muy particular de dicha aplicación, sin embargo el robot puede utilizarse sin problemas para otras tareas que requieran menos energía y así expandir su espectro de aplicaciones.
- 6) La literatura no reporta ningún robot con características similares, de ningún tamaño.

Considerando los requerimientos planteados para el minirobot en los proyectos anteriormente mencionados, y particularmente el tamaño y condiciones de operación del minirobot, en el proyecto descrito en este informe se abordaron con más detalle los siguientes aspectos:

- Reducción de consumo de potencia del mecanismo de locomoción
 - El mecanismo inicialmente considerado estaba basado en actuadores térmicos; en este proyecto se basó en actuadores piezoeléctricos
- Implementación de comunicación óptica bidireccional
 - La comunicación óptica se había implementado sólo en una dirección; en este proyecto es bidireccional
- Posible implementación de los manipuladores
 - Se habían comparado diversos principios de actuación, concluyendo que la mejor opción era el piezoeléctrico, pero no se había intentado implementar ninguno. En este proyecto descrito en este informe se trabajó en ahondar en detalles de simulación y en explorar la implementación.
- Posible implementación de la herramienta de corte
 - Se habían comparado diversos principios de actuación, concluyendo que debía ahondar en la posibilidad de utilizar actuación piezoeléctrica, pero

no se implementó ningún prototipo, sino que se realizaron primeras simulaciones de la posible geometría. En este proyecto se completó el estudio de simulación y se exploró la implementación. Sin embargo, las simulaciones permitieron determinar que el uso de piezoeléctricos era inviable, por lo que no se continuó trabajando en la implementación.

- Mecanismos para proveer de energía al minirobot
 - No se había considerado cómo podría proveerse de energía inalámbrica. En este proyecto se abordó el mecanismo de alimentación y su implementación.

2.3 Objetivos

Objetivo general

Implementar un prototipo de minirobot autónomo con un volumen menor a 100 mm^3 con las siguientes características:

- Locomoción autónoma con dos grados de libertad
- Herramienta de microcorte
- Al menos dos micromanipuladores con tres grados de libertad y precisión nanométrica
- Comunicación óptica inalámbrica
- Alimentado inalámbricamente

Objetivos específicos

- 1) Implementar un sistema de comunicación óptica bidireccional para cobertura en un área mínima de 30cm de diámetro
- 2) Implementar la alimentación inalámbrica de energía del minirobot para cobertura en un área mínima de 30cm de diámetro
- 3) Implementar un mecanismo de locomoción con al menos dos grados de libertad con un consumo de potencia menor o igual al obtenido en el diseño actual
- 4) Implementar una herramienta de microcorte
- 5) Implementar un micromanipulador con tres grados de libertad y precisión nanométrica
- 6) Manejo del minirobot por medio de una PC
- 7) Implementación de prototipo final

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para desarrollar este proyecto de investigación es el método de investigación en ingeniería, el cual consiste en:

- a) Desarrollar una descripción clara del problema
Se analizaron y compararon con detalle los antecedentes bibliográficos con las especificaciones del robot, para desarrollar la descripción del problema.
- b) Identificar los factores importantes que afectan el problema e influyen significativamente la solución
Se estudió el problema para determinar los aspectos críticos para la implementación del robot en sus características finales, así como la aplicabilidad y viabilidad de variaciones o mejoras de los sistemas documentados en la literatura.
- c) Proponer un modelo para la solución problema, considerando los requerimientos, especificaciones y limitaciones del problema

Para el modelado del robot, se definió la arquitectura del sistema de caracterización eléctrica del cual forma parte el robot, así como del robot en sí, en los dominios comportamental, estructural y físico, así como la concepción de un sistema simplificado basado en las funciones básicas del robot. Se propusieron soluciones para el sistema simplificado y el sistema final.

- d) Realizar los experimentos necesarios, por medio de la implementación de prototipos o simulaciones
Los experimentos se realizaron con ayuda de pruebas de concepto que incluyen simulaciones, prediseños y prototipos a mayor escala de versiones simplificadas de partes del diseño.
- e) Evaluar la solución del problema, tomando como elementos de evaluación el cumplimiento de requerimientos y especificaciones, así como las limitaciones del problema
Se compararon los resultados de las pruebas de concepto con las especificaciones del sistema simplificado y el sistema final. Para la evaluación se consideró también el tamaño, costo, consumo de energía y facilidad de implementación de la solución.
- f) Optimizar la solución propuesta o descartarla, si no cumple con lo indicado en el punto 5)
- g) Obtener conclusiones y recomendaciones con base en la solución del problema.
Se obtienen conclusiones con base en los resultados de las implementaciones

simplificadas, así como recomendaciones sobre la implementación del robot en su versión final, considerando que se conocen ahora más detalles sobre la tecnología de fabricación necesaria.

A continuación un resumen de la metodología utilizada según cada objetivo específico:

Objetivo específico 1: Implementación de un sistema de comunicación óptica bidireccional para cobertura en un área mínima de 30cm de diámetro

Primeramente se obtuvo experimentalmente el patrón de radiación del cinturón de transceptores, con lo que se comprobó la cobertura y se determinaron las optimizaciones necesarias (número de transceptores, ubicación de transceptores en el cinturón, reflexiones e interferencia). Se construyó un prototipo de transceptor para el robot con componentes discretos en el menor tamaño posible, para disminuir costos de prototipado. De las pruebas experimentales se obtuvo información del consumo de potencia y la señal mínima detectable por los transceptores del cinturón. También se mejoró el diseño para disminuir su consumo de potencia procurando utilizar la menor cantidad de transceptores posible.

Objetivo específico 2: Implementar la alimentación inalámbrica de energía del minirobot para cobertura en un área mínima de 30cm de diámetro

Se eligió la alternativa con mayor viabilidad técnica, implementada con el uso de una celda fotovoltaica sobre la cual se enfoca un rayo láser para seguir al robot, alimentándolo siempre dentro del área de cobertura.

Objetivo específico 3: Implementar un mecanismo de locomoción con al menos dos grados de libertad con un consumo de potencia menor o igual al obtenido en el diseño actual

Para el diseño y/o optimización de un actuador (una pata), primero se realizaron simulaciones con el método de elementos finitos. Posteriormente se determinó el flujo de fabricación requerido, favoreciendo los diseños que podían ensamblarse a bajo costo, en lugar de utilizar micromaquinado de superficies o de substrato. Posteriormente se realizaron pruebas experimentales y se procedió al ensamble del sistema de locomoción completo. Se sustituyó el mecanismo de actuación térmico por el piezoeléctrico para disminuir el consumo de potencia.

Objetivo específico 4: Implementar una herramienta de microcorte

Para el diseño y/o optimización de la herramienta de corte primero se realizaron simulaciones con el método de elementos finitos. Posteriormente se determinó el flujo de fabricación requerido y inició el ensamble de un prototipo a mayor escala del actuador piezoeléctrico, sin embargo este no se concluyó debido a que las simulaciones demostraron la inviabilidad del uso de piezoeléctricos para implementar esta herramienta de corte.

Objetivo específico 5: Implementar un micromanipulador con tres grados de libertad y precisión nanométrica

Para el diseño y/o optimización de un micromanipulador, primero se realizaron simulaciones con el método de elementos finitos. Posteriormente se determinó el flujo de fabricación requerido, favoreciendo los diseños que pudieran ensamblarse a bajo costo, en lugar de utilizar micromaquinado de superficies o de sustrato. Se realizó el ensamble de un actuador de dos grados de libertad, así como pruebas experimentales.

Objetivo específico 6: Manejo del minirobot por medio de una PC

Se programaron las rutinas básicas del robot y la transmisión de datos al cinturón de transceptores, así como la interfaz con la PC. También se programó el seguimiento del robot por medio de una cámara y se realizaron pruebas con otros sistemas robóticos para probar el código del robot.

Objetivo específico 7: Implementación de prototipo final

Se ensamblaron las partes y se realizaron las primeras pruebas de funcionamiento del prototipo ensamblado, para determinar que había conectividad y reacción en las partes después del ensamble. Se documentaron los resultados de las pruebas, así como la recopilación de la documentación detallada del diseño de cada una de las partes. Por motivos de tiempo, no se logró ensamblar los manipuladores ni se pudieron realizar pruebas más elaboradas del prototipo, pero se logró llevar el prototipo hasta el punto en el cual puede continuarse con las pruebas más elaboradas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Comunicación inalámbrica óptica

Investigadores: Paola Vega Castillo, Aníbal Coto Cortés

Estudiantes: William Quirós Solano, Juan José Montero Rodríguez, José Pablo Castro Valverde

4.1.1 *Requerimientos del sistema de comunicación inalámbrica*

Dado que el robot operaría dentro de la cámara de vacío del microscopio de barrido electrónico y hay aplicaciones donde esta característica podría ser de utilidad, se requiere un sistema de comunicación inalámbrica que permita la recepción de comandos y la transmisión de datos de medición sin distorsionar los campos eléctricos dentro del microscopio. Algunos comandos esenciales para ser transmitidos son las instrucciones de movimiento, la toma de datos, el envío de los datos hacia la computadora, y la realización de operaciones aritméticas simples. De acuerdo con la información existente sobre la cámara de vacío, ésta tiene un diámetro de 30cm.

4.1.2 *Concepción del sistema de comunicación óptica*

La concepción del sistema de comunicación se muestra en la figura 4.1.1, y el diagrama de bloques en la figura 4.1.2.

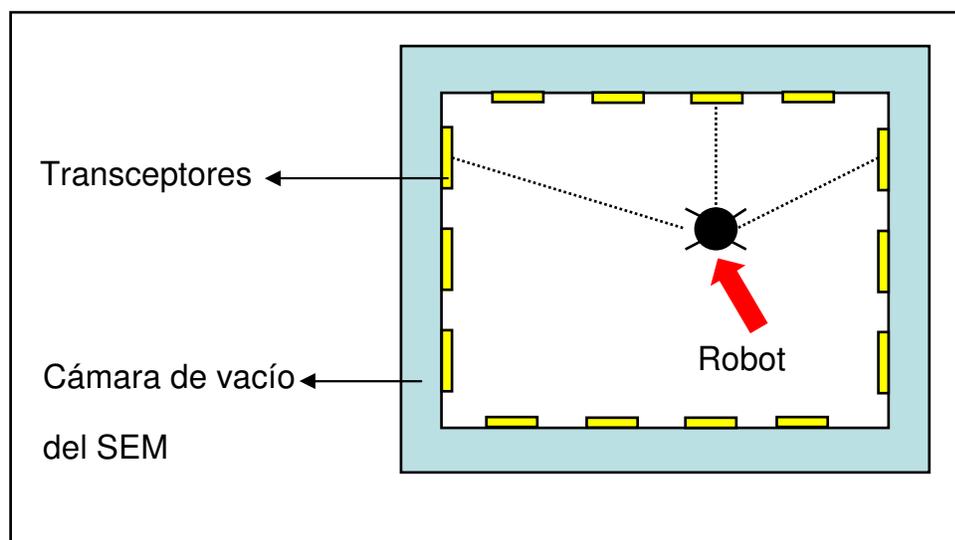


Figura 4.1.1. Concepción del sistema de comunicación óptica con el robot

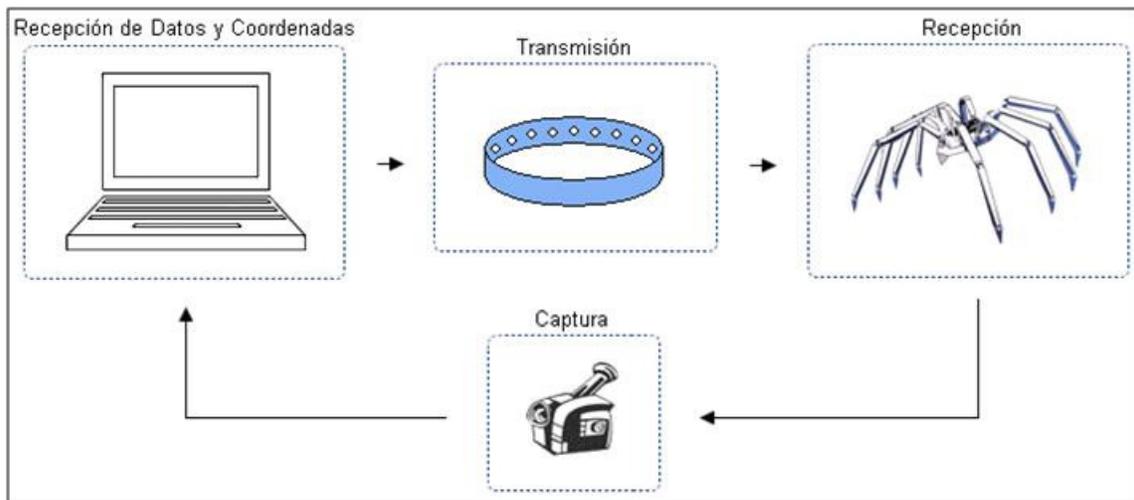


Figura 4.1.2. Diagrama de bloques del sistema de comunicación óptica

El sistema de comunicación inalámbrica consiste en un anillo de transceptores (transmisor-receptor) infrarrojos rodeando al robot dentro de la cámara de vacío. En el exterior de la cámara, una PC transmite los datos y comandos de configuración por medio del puerto USB. La información del puerto se traduce al formato de comunicación serial RS-232 conectada una interfaz eléctrico-óptica. Esta interfaz incluye los transceptores infrarrojos, los cuales permiten traducir los pulsos eléctricos a pulsos ópticos que son recibidos por el robot.

El robot recibe los datos por medio de un fotodiodo, que está conectado a un op-amp LM321 para acondicionar la señal, y eso se conecta a un pin de entrada digital.

Cuando el microcontrolador transmite datos al exterior de la cámara, su interfaz RS-232 generará pulsos eléctricos en las terminales de salida del microcontrolador. Estos pulsos se alimentarán a una interfaz electro-óptica que incluye un transmisor infrarrojo para traducirlos a pulsos ópticos, que son recibidos por el anillo de transceptores y transmitidos eléctricamente en formato RS-232. Estos datos se traducen a formato USB y son recibidos por la PC.

En el proyecto anterior a este se concentraron los esfuerzos en establecer comunicación desde la PC hasta el robot, para enviar comandos y datos de configuración al robot. Esta comunicación es unidireccional, es decir, el robot no es capaz de transmitir datos a la PC, sólo de recibirlos. En el proyecto descrito en el presente informe se optimizó la comunicación de datos desde la PC hasta el minirobot, y se implementó la comunicación desde el robot hasta la PC.

El diagrama de bloques del sistema de comunicación óptica unidireccional implementado en el proyecto anterior se muestra en la figura 4.1.3. El hardware del prototipo se muestra en la figura 4.1.4. En la imagen de la izquierda se tiene el emulador del prototipo del robot con un PIC18F4550. Este dispositivo recibe instrucciones de manera inalámbrica, efectúa operaciones aritméticas con la información, y transmite de vuelta el resultado de las operaciones. A la derecha se muestra el controlador del anillo de comunicaciones, que permite enviar instrucciones al robot desde una computadora. Este controlador también está implementado con un PIC18F4550.

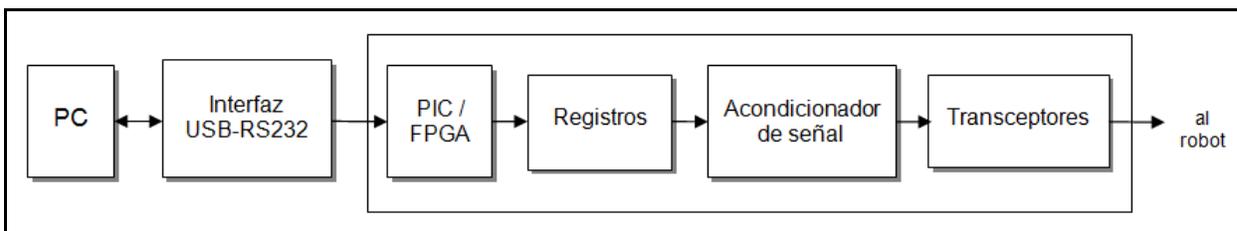
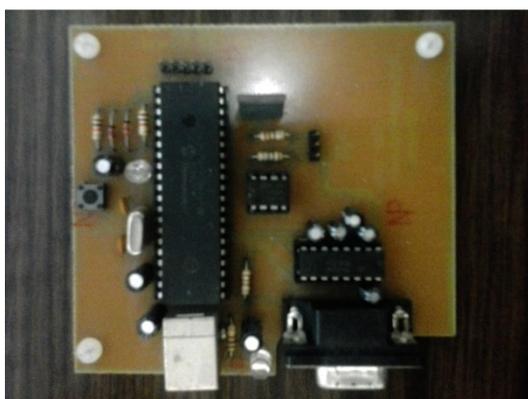
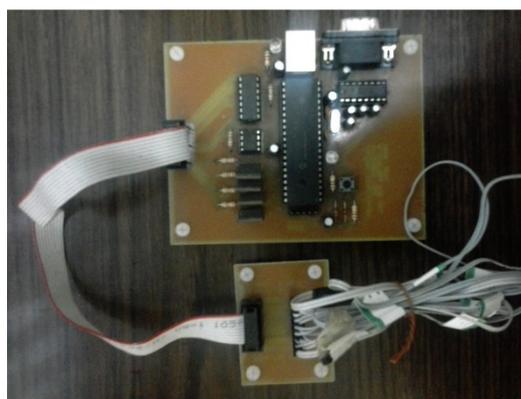


Figura 4.1.3. Diagrama de bloques para la transmisión de datos



(a) Emulador de minirobot



(b) Controlador del anillo

Figura 4.1.4. Hardware del primer prototipo de comunicación unidireccional

En la figura 4.1.4.a se muestra el hardware que emula el comportamiento del robot en la figura 4.1.4.b se muestra el controlador del anillo de transceptores.

Se seleccionó un protocolo de comunicación infrarrojo conocido como IrDA (Infrared Data Association) que establece estándares para la transmisión y recepción de datos. La trama de comunicaciones incluye un bit de inicio, ocho bits de datos y un bit de parada, de forma similar al protocolo RS232, pero a una velocidad de transmisión más

lenta. Además el protocolo incluye la validación de datos mediante un hash CRC, que indica si los datos fueron enviados y recibidos correctamente.

Los algoritmos para la transmisión mediante el protocolo IrDA y la validación de un hash CRC fueron desarrollados y el código fuente se había desarrollado para la plataforma MPLABX para un PIC18F4550.

Como primer paso para el sistema final de comunicación inalámbrica bidireccional se disminuyeron las dimensiones del sistema de comunicación, principalmente por medio del reemplazo del PIC18F4550 por un microcontrolador C8051F338 fabricado por Silicon Labs. El código fuente se reescribió para hacerlo compatible con la plataforma C8051F338 utilizando un kit de desarrollo C8051F336DK. Esta migración se completó con éxito, y todos los algoritmos del dispositivo anterior se pueden utilizar en el nuevo hardware. Con este nuevo hardware es posible utilizar actuadores piezoeléctricos para la locomoción del robot, al lograr una reducción del tamaño y el peso.

4.4.3 Caracterización experimental del emisor y receptor infrarrojos

Para la implementación de la transmisión óptica de datos, primero se determinó experimentalmente el patrón de radiación para comprobar la cobertura en un área de 30 cm de diámetro, correspondiendo con el diámetro máximo de la cámara del SEM.

En la Tabla 4.1.1 se muestra la primera prueba de patrón de radiación obtenida para el diodo emisor y el fotodiodo seleccionados. En estas mediciones se utilizó una resistencia de emisor de 20 Ω y una resistencia de receptor de 1 M Ω , que eran los valores utilizados en los experimentos previos en la bitácora del proyecto anterior. Estos valores también se utilizaron en el circuito final.

Tabla 4.1.1. Medición de la tensión obtenida en el diodo receptor (en voltios) al cambiar el ángulo y la distancia con respecto a un diodo transmisor fijo

| Ángulo | Distancia desde el fototransmisor (en centímetros) | | | | | | | | | | | | |
|--------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| -90° | 0,13 | 0,14 | 0,13 | 0,2 | 0,24 | 0,45 | 0,5 | 0,46 | 0,41 | 0,38 | 0,25 | 0,22 | 0,17 |
| -85° | 0,17 | 0,19 | 0,2 | 0,27 | 0,38 | 0,53 | 0,61 | 0,32 | 0,3 | 0,24 | 0,23 | 0,21 | 0,18 |
| -80° | 0,25 | 0,29 | 0,33 | 0,35 | 0,6 | 0,65 | 0,46 | 0,3 | 0,27 | 0,24 | 0,23 | 0,22 | 0,19 |
| -75° | 0,35 | 0,43 | 0,49 | 0,61 | 0,73 | 0,42 | 0,37 | 0,31 | 0,28 | 0,25 | 0,25 | 0,23 | 0,21 |
| -70° | 0,71 | 0,75 | 0,6 | 0,71 | 0,39 | 0,39 | 0,37 | 0,34 | 0,3 | 0,27 | 0,24 | 0,24 | 0,21 |
| -65° | 0,8 | 0,86 | 0,77 | 0,4 | 0,38 | 0,4 | 0,39 | 0,34 | 0,3 | 0,29 | 0,25 | 0,24 | 0,23 |
| -60° | 0,44 | 0,47 | 0,44 | 0,41 | 0,38 | 0,41 | 0,39 | 0,35 | 0,32 | 0,29 | 0,26 | 0,25 | 0,24 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| -55° | 0,43 | 0,46 | 0,42 | 0,42 | 0,4 | 0,41 | 0,38 | 0,36 | 0,32 | 0,31 | 0,27 | 0,27 | 0,25 |
| -50° | 0,49 | 0,52 | 0,46 | 0,43 | 0,4 | 0,4 | 0,39 | 0,36 | 0,33 | 0,31 | 0,28 | 0,28 | 0,26 |
| -45° | 0,51 | 0,51 | 0,46 | 0,44 | 0,41 | 0,4 | 0,38 | 0,36 | 0,34 | 0,32 | 0,31 | 0,28 | 0,26 |
| -40° | 0,53 | 0,5 | 0,48 | 0,44 | 0,4 | 0,4 | 0,37 | 0,36 | 0,34 | 0,35 | 0,27 | 0,3 | 0,26 |
| -35° | 0,53 | 0,53 | 0,49 | 0,45 | 0,41 | 0,37 | 0,35 | 0,37 | 0,34 | 0,29 | 0,32 | 0,3 | 0,28 |
| -30° | 0,53 | 0,53 | 0,48 | 0,43 | 0,4 | 0,37 | 0,37 | 0,38 | 0,33 | 0,3 | 0,7 | 0,32 | 0,6 |
| -25° | 0,53 | 0,55 | 0,48 | 0,42 | 0,46 | 0,45 | 0,4 | 0,4 | 0,37 | 1,1 | 1,1 | 0,32 | 0,64 |
| -20° | 1,1 | 1,08 | 0,5 | 0,47 | 1,3 | 1,11 | 0,5 | 1,3 | 1,28 | 1,14 | 1,9 | 0,35 | 2 |
| -15° | 3,9 | 2,7 | 0,85 | 1,3 | 3,3 | 3,1 | 1,6 | 3,35 | 2,2 | 0,5 | 2,45 | 0,52 | 2,25 |
| -10° | 5,1 | 5,09 | 4,04 | 4,28 | 3,8 | 4,2 | 3,3 | 3,53 | 2,79 | 1,95 | 2,22 | 1,29 | 1,8 |
| -5° | 4,6 | 5,15 | 4,62 | 5,09 | 4,5 | 4,32 | 3,8 | 3,57 | 3,4 | 2,14 | 2,15 | 2,5 | 1,9 |
| 0° | 5,05 | 5,17 | 5,08 | 5,11 | 4,82 | 4,4 | 3,95 | 3,55 | 3,53 | 2,72 | 2,2 | 2,56 | 2,82 |
| 5° | 1,9 | 3,4 | 4,95 | 3,4 | 3,4 | 3,35 | 2,85 | 1,95 | 2,31 | 1,81 | 2,27 | 2,5 | 2,4 |
| 10° | 0,57 | 1,02 | 2,9 | 1,86 | 1 | 1,5 | 1,3 | 1,31 | 0,87 | 1,5 | 1,51 | 1,8 | 1,8 |
| 15° | 0,49 | 0,37 | 1,13 | 0,43 | 0,42 | 0,36 | 0,42 | 0,51 | 0,38 | 0,4 | 1,1 | 0,72 | 1,4 |
| 20° | 0,46 | 0,36 | 0,38 | 0,35 | 0,33 | 0,29 | 0,25 | 0,26 | 0,29 | 0,22 | 0,8 | 0,25 | 0,7 |
| 25° | 0,47 | 0,4 | 0,35 | 0,33 | 0,31 | 0,27 | 0,24 | 0,25 | 0,24 | 0,2 | 0,19 | 0,3 | 0,21 |
| 30° | 0,46 | 0,37 | 0,35 | 0,33 | 0,31 | 0,27 | 0,23 | 0,24 | 0,23 | 0,19 | 0,16 | 0,24 | 0,16 |
| 35° | 0,45 | 0,37 | 0,36 | 0,32 | 0,31 | 0,26 | 0,23 | 0,23 | 0,25 | 0,19 | 0,16 | 0,18 | 0,15 |
| 40° | 0,44 | 0,35 | 0,34 | 0,32 | 0,31 | 0,25 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,19 | 0,16 | 0,18 | 0,14 |
| 45° | 0,41 | 0,33 | 0,34 | 0,32 | 0,31 | 0,25 | 0,22 | 0,2 | 0,19 | 0,18 | 0,16 | 0,19 | 0,14 |
| 50° | 0,49 | 0,33 | 0,33 | 0,29 | 0,32 | 0,24 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,18 | 0,16 | 0,24 | 0,13 |
| 55° | 0,54 | 0,34 | 0,32 | 0,3 | 0,32 | 0,24 | 0,21 | 0,2 | 0,18 | 0,18 | 0,15 | 0,23 | 0,13 |
| 60° | 0,32 | 0,43 | 0,32 | 0,29 | 0,31 | 0,24 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,18 | 0,16 | 0,2 | 0,12 |
| 65° | 0,21 | 0,56 | 0,39 | 0,29 | 0,31 | 0,24 | 0,21 | 0,04 | 0,19 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,12 |
| 70° | 0,21 | 0,35 | 0,4 | 0,39 | 0,41 | 0,25 | 0,2 | 0,23 | 0,18 | 0,17 | 0,18 | 0,16 | 0,11 |
| 75° | 0,21 | 0,3 | 0,31 | 0,43 | 0,39 | 0,27 | 0,25 | 0,2 | 0,18 | 0,14 | 0,16 | 0,15 | 0,11 |
| 80° | 0,14 | 0,19 | 0,22 | 0,28 | 0,29 | 0,27 | 0,27 | 0,2 | 0,19 | 0,15 | 0,16 | 0,13 | 0,11 |
| 85° | 0,14 | 0,14 | 0,17 | 0,27 | 0,23 | 0,2 | 0,3 | 0,21 | 0,2 | 0,2 | 0,15 | 0,04 | 0,09 |
| 90° | 0,14 | 0,14 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,28 | 0,21 | 0,22 | 0,14 | 0,04 | 0,08 |

Tomando algunos valores de distancia para no saturar la gráfica, se obtiene una imagen del patrón de radiación del transmisor, como se muestra en la Figura 4.1.5.

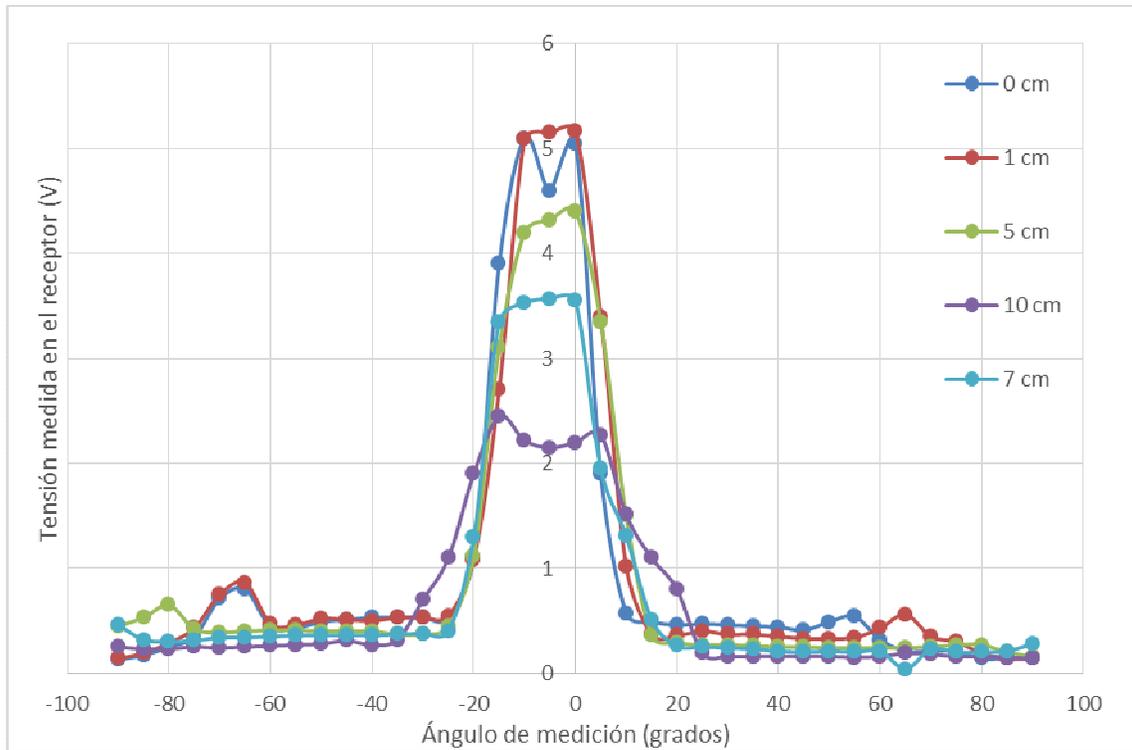


Figura 4.1.5. Resultados de la medición del patrón de radiación

De la figura 4.1.5 se deduce que el ángulo del patrón de radiación de cada diodo transmisor es de aproximadamente 40° . Esto implica que un solo fototransmisor no es capaz de emitir en todas las direcciones posibles, ni tampoco cubrir por completo la superficie sobre la cual se va a desplazar el robot. Sin embargo, un conjunto de fototransmisores con zonas de cobertura traslapadas sí es capaz de lograr este efecto. El diagrama vectorial de Inkscape mostrado en la Figura 1.1.6 muestra el diagrama para montaje y pruebas del anillo de transceptores. En la implementación final del sistema de comunicación el anillo de transceptores consta de 16 cortes, correspondientes a 8 diodos transmisores y 8 receptores, como se muestra en la figura 4.1.7.

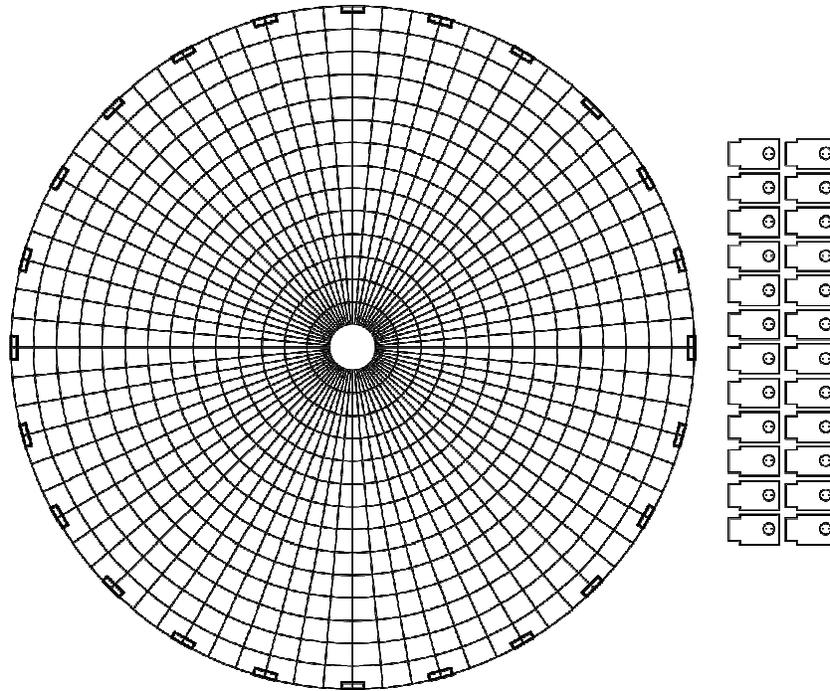


Figura 1.1.6 Diagrama de Inkscape del anillo con la distribución de cortes.

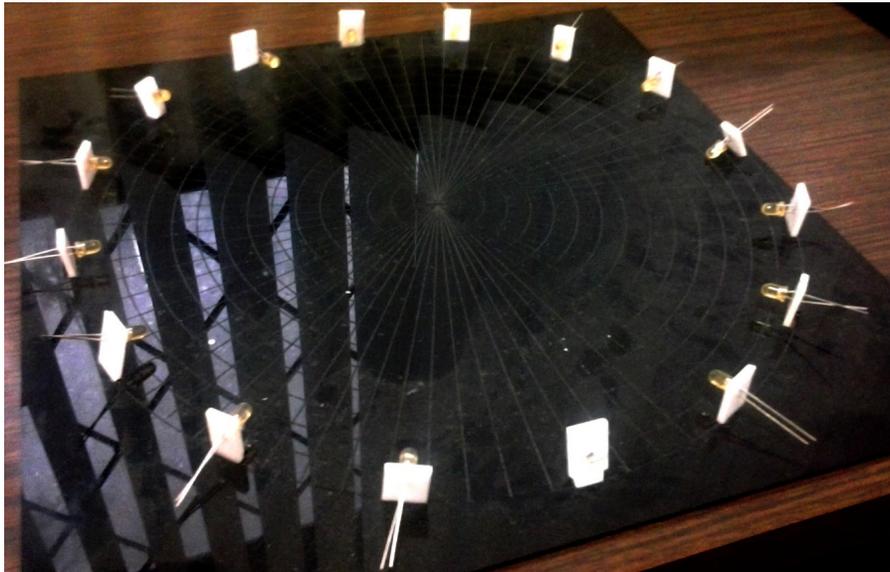
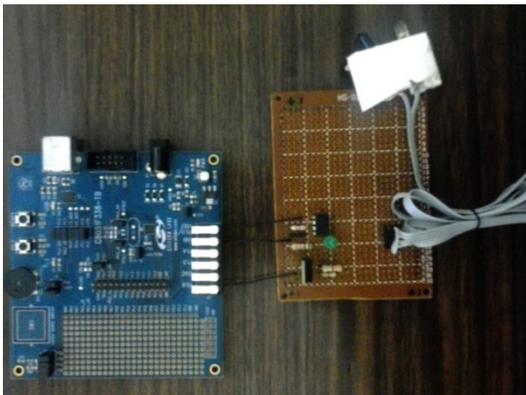


Figura 4.1.7. Placa acrílica para el anillo de transceptores.

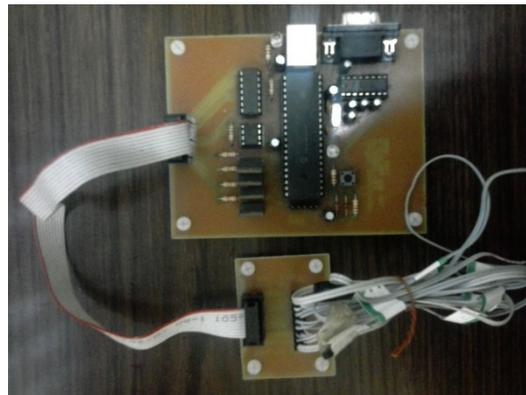
4.1.4 Imágenes del sistema migrado a la plataforma C8051F336DK

En esta sección se detalla el prototipo final obtenido al migrar el código fuente desde el microcontrolador PIC18F4550 hacia el microcontrolador C8051F338 utilizando el kit de desarrollo C8051F336DK. El controlador del anillo es exactamente el mismo; la diferencia está en el circuito que emula el comportamiento del minirobot. Inicialmente el kit de desarrollo se utilizó como si fuera la versión final del robot, con la diferencia de que éste tiene dimensiones todavía bastante grandes. Sin embargo las rutinas de software del microcontrolador dentro son las mismas que deben ser programadas en la versión final en miniatura.

La fotografía del kit de desarrollo se muestra en la Figura 4.1.8a, la cual debe ser comparada con la Figura 4.1.4.a que muestra el hardware anterior. En la parte izquierda de la Figura 4.1.8 se muestra el módulo C8051 que representa el equivalente del Spiderbot, conectado a un circuito de acondicionamiento de señal para los diodos infrarrojos. Este circuito de acondicionamiento fue reemplazado más adelante en el circuito impreso final del Spiderbot en miniatura. En la parte de la derecha se muestra el mismo controlador del anillo, debido a que esta parte no presenta ningún requisito de miniaturización por tratarse de un controlador externo al robot y puede colocarse fuera del ambiente final de operación del robot, es decir, puede colocarse fuera del microscopio.



(a) Emulador del robot con C8051F336DK.



(b) Controlador del anillo con PIC18F4550.

Figura 4.1.8. Prototipo del robot utilizando el kit de desarrollo C8051F336DK.

Las pruebas completas de comunicación se realizaron con el sistema que se muestra en la

Figura 4.1.9. El procedimiento completo para conectar y probar este sistema incluye la instalación del software en una computadora con sistema operativo Windows, la configuración de todos los dispositivos, la forma de programar el C8051 en el kit de desarrollo, pruebas de conectividad inalámbrica y la prueba de aplicación de una calculadora.

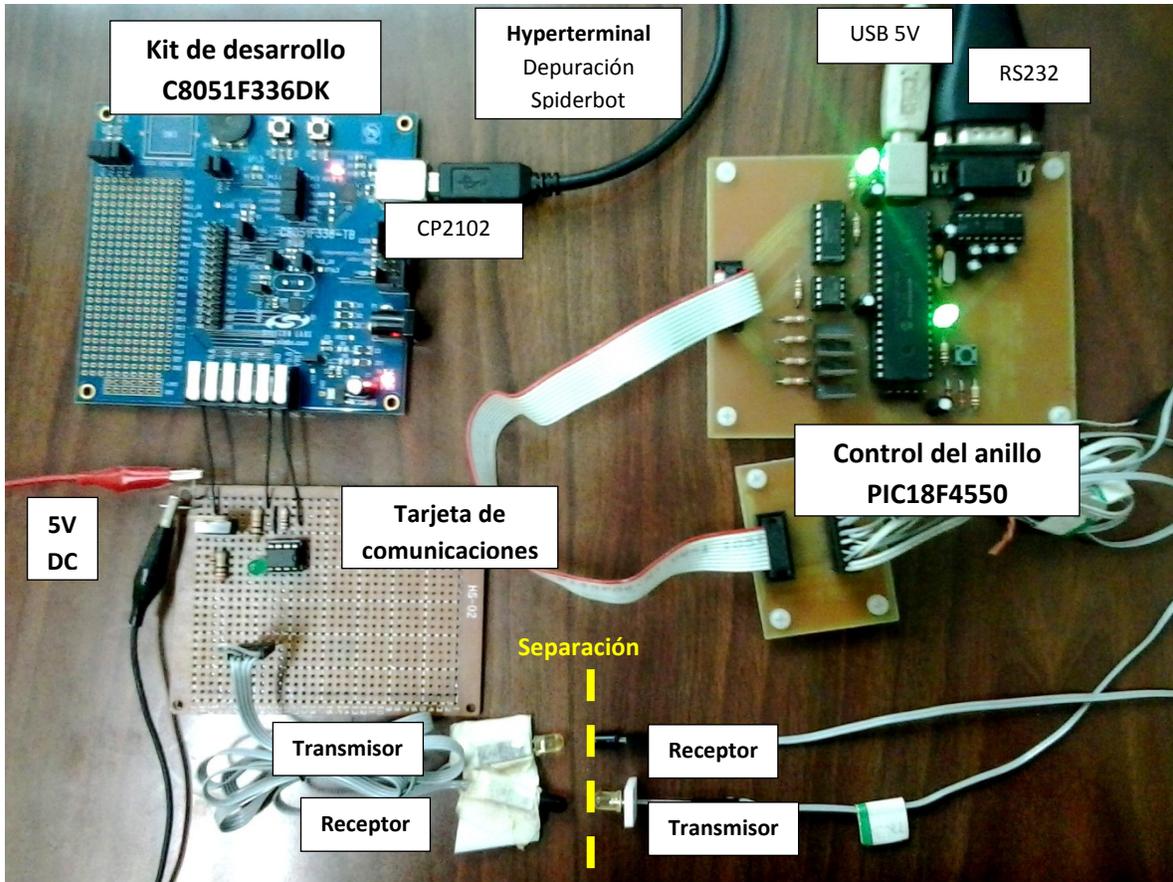


Figura 4.1.9. Conexiones utilizadas en la prueba de comunicación

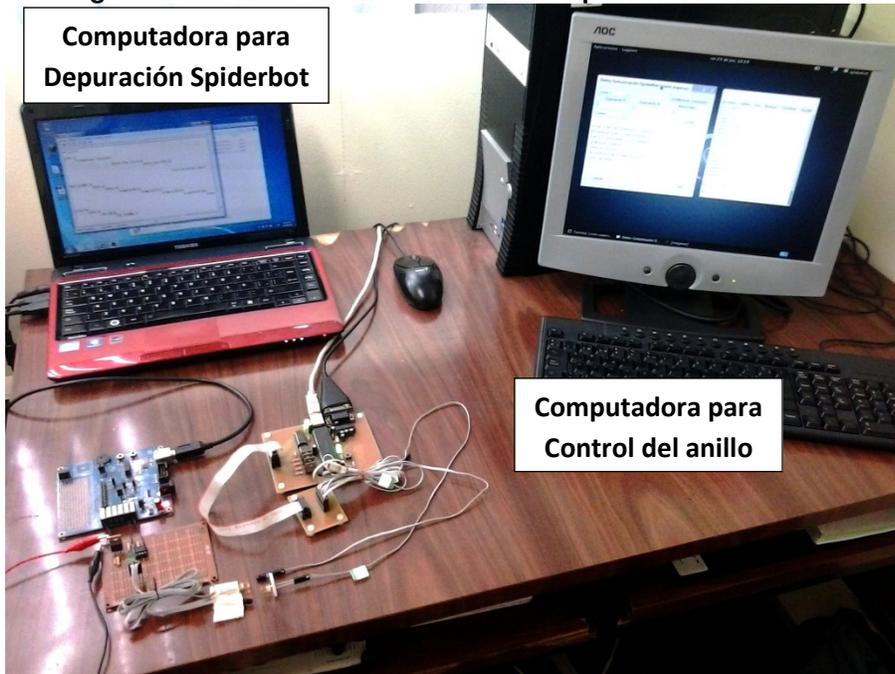


Figura 2.1.10. Conexiones mostrando las computadoras de depuración de código y control del anillo de transceptores

4.1.5 Pruebas de comunicación con aplicación QT

Para comprobar el funcionamiento de la conexión inalámbrica al emulador del robot se hizo una prueba utilizando el controlador del anillo y el kit de desarrollo C8051F336DK. El montaje completo del sistema se observa en la Figura 2.1.0. Se tienen dos computadoras: una controla el anillo y es la que envía los comandos al emulador del robot; la otra se utiliza para ver información de depuración en el emulador de robot, y se puede omitir en el sistema final.

La computadora que controla el anillo está ubicada en la parte derecha de la Figura 4.1.10; utiliza la versión de Linux Debian 7 y tiene instalado *qtcreator* junto con *qt* en sus versiones de 64 bits para correr la aplicación. Anteriormente esta aplicación estaba compilada en 32 bits, por lo que fue necesario hacer una nueva compilación durante el desarrollo de este proyecto.

En la computadora del anillo se introducen los comandos que se van a enviar al robot. Una vez que se oprime el botón “Establecer conexión”, el controlador busca al robot y espera una respuesta. Si la respuesta es exitosa, el programa mostrará en la ventana que la conexión se llevó a cabo de manera correcta. En caso contrario, el programa indicará que la zona seleccionada es inactiva.

En la Figura 4.1.11 se muestra el resultado de una conexión no exitosa, debido a que los diodos emisores y receptores no están alineados entre sí, colocados de esta manera para ilustrar un ejemplo de la detección de errores de comunicación. Sin embargo, esta situación no se presenta en el prototipo final debido a que el traslape de patrones de radiación permite lograr cobertura total sin importar la posición de robot, siempre y cuando este se encuentre dentro del perímetro del anillo de transceptores.

Seguidamente se alinean los diodos para que exista comunicación entre ellos, se selecciona la zona 3 (la zona que tiene diodos conectados), y se hace una prueba completa, donde primero se establece conexión y luego se envían los operandos 4 y 5 para realizar una suma. En la Figura 4.1.12 se muestra la información que aparece ahora en la aplicación. Se aprecia que al establecer la conexión el programa indica “Conexión exitosa”. Esta prueba particular ilustrada en las Figuras 4.1.11 y 4.1.12 se realiza por medio de la transmisión de operandos y la recepción del resultado de parte del emulador.

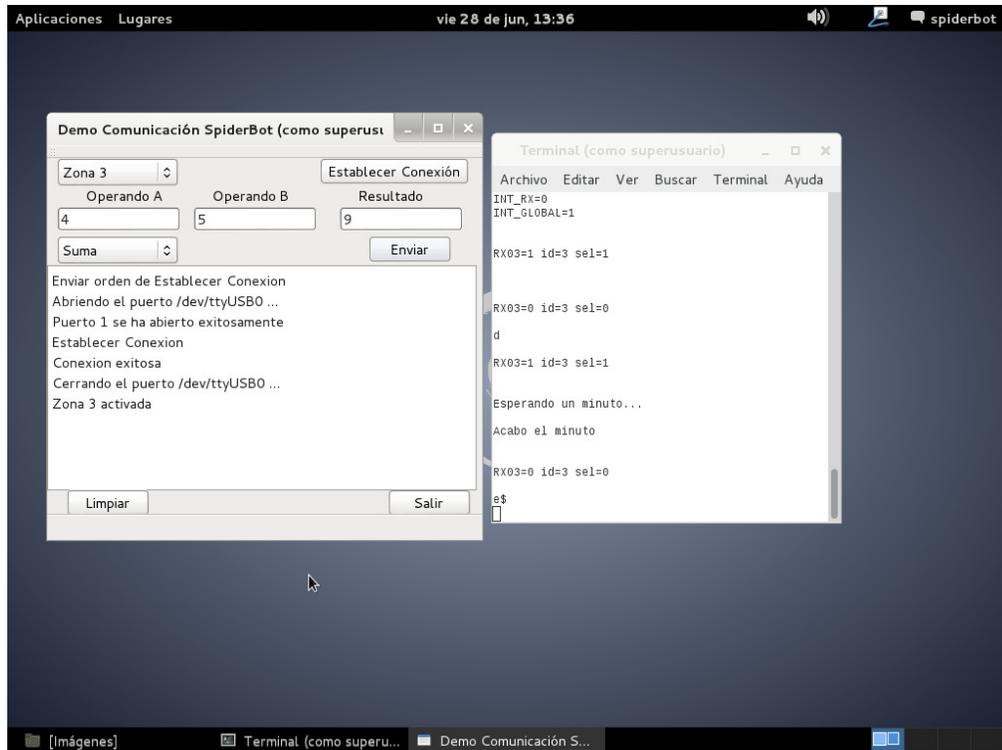


Figura 4.1.113. Resultados de una conexión no exitosa

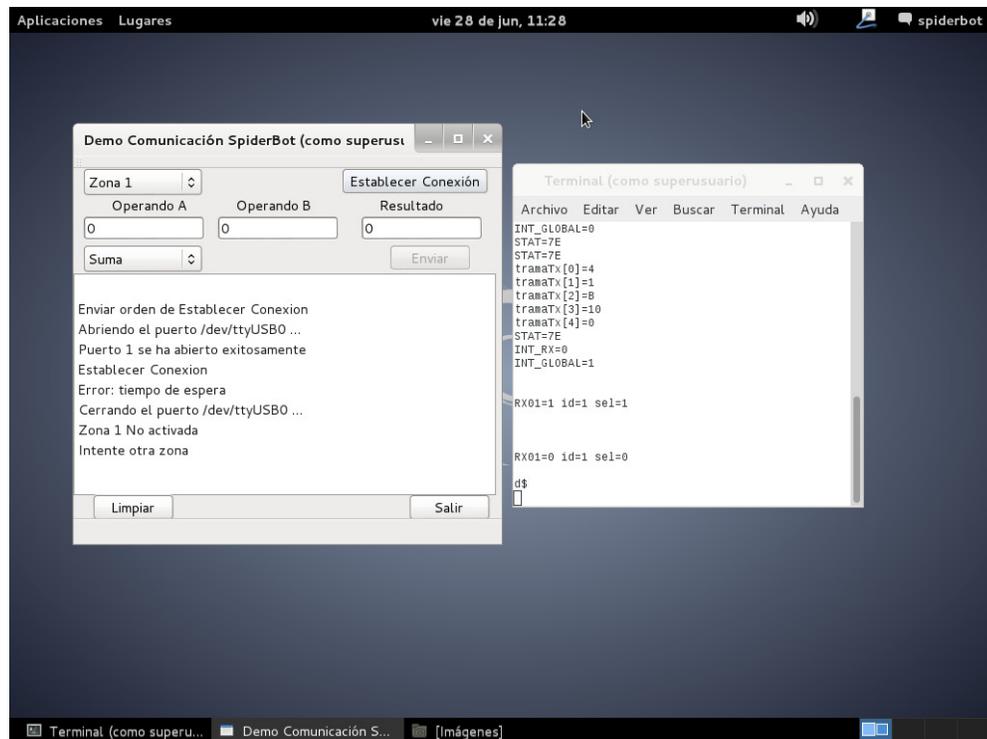


Figura 4.1.124. Resultados de una conexión exitosa utilizando la zona 3.

De manera adicional, en la computadora conectada directamente al robot se inició la aplicación Hyperterminal para observar los mensajes detalladamente y comprobar que el sistema efectivamente está enviando y recibiendo datos. La información que se muestra en la terminal para esta prueba de conexión completa se muestra a continuación.

```
Inicializacion completada
init_test
Iniciando el receptor infrarojo del spiderBot v3.0 en 8051
stat_cnt = 0
isr_b()
serie_ir.dato=7E
if(stat_cnt<2){
  stat_cnt=1
}
stat_cnt = 1
isr_b()
serie_ir.dato=7E
if(stat_cnt<2){
  stat_cnt=2
}
stat_cnt = 3
isr_b()
serie_ir.dato=4
(stat_cnt==3)
stat_cnt=3
rx_longitud=4
tramaRx[0]=4
tramaRx[0]=4
stat_cnt = 4
isr_b()
serie_ir.dato=1
if(stat_cnt>3){
  stat_cnt=4
  rx_cnt=1
}
rx_cnt=1
CTRL=1
ACKN=0
tramaRx[1]=1
      tramaRx[1]=1
stat_cnt = 5
isr_b()
serie_ir.dato=B
if(stat_cnt>3){
  stat_cnt=5
  rx_cnt=2
}
rx_cnt=2
CTRL=1
ACKN=B
```

Inicialización

Recepción de comando para activación

```

tramaRx[2]=B
    tramaRx[2]=B
stat_cnt = 6
isr_b()
serie_ir.dato=10
if(stat_cnt>3){
stat_cnt=6
rx_cnt=3
}
rx_cnt=3
CTRL=1
ACKN=B
tramaRx[3]=10
    tramaRx[3]=10
stat_cnt = 7
isr_b()
serie_ir.dato=0
if(stat_cnt>3){
stat_cnt=7
rx_cnt=4
}
rx_cnt=4
CTRL=1
ACKN=B
tramaRx[4]=0
    tramaRx[4]=0
if(stat_cnt==rx_longitud+4){
stat_cnt = 8
isr_b()
serie_ir.dato=7E
if(stat_cnt==rx_longitud+4){
Rx_Flag=1
rx_cnt=5

CTRL=1
    Establecer Conexion
        Check Sum Exitoso
            Check_Sum.CHS=10
                wait_ms(delay_char)

INT_GLOBAL=0
    STAT=7E
        STAT=7E
            tramaTx[0]=4
                tramaTx[1]=1
                    tramaTx[2]=B
                        tramaTx[3]=10

Tx[4]=0
    STAT=7E
        INT_RX=0
            INT_GLOBAL=1
                stat_cnt = 0

isr_b()
serie_ir.dato=7E
if(stat_cnt<2){

```

Recepción de
comando para
activación

Respuesta a la
computadora
para activación
trama

```

stat_cnt=1
    }
stat_cnt = 1
isr_b()
serie_ir.dato=7E
if(stat_cnt<2){
stat_cnt=2
    }
stat_cnt = 3
isr_b()
serie_ir.dato=9
(stat_cnt==3)
stat_cnt=3
rx_longitud=9
tramaRx[0]=9
tramaRx[0]=9
stat_cnt = 4
isr_b()
serie_ir.dato=2
if(stat_cnt>3){
stat_cnt=4
rx_cnt=1
}
stat_cnt = 0
isr_b()
serie_ir.dato=7E
if(stat_cnt<2){
stat_cnt=1
    }
stat_cnt = 1
isr_b()
serie_ir.dato=7E
if(stat_cnt<2){
stat_cnt=2
    }
stat_cnt = 3
isr_b()
serie_ir.dato=9
(stat_cnt==3)
stat_cnt=3
rx_longitud=9
tramaRx[0]=9
tramaRx[0]=9
stat_cnt = 4
isr_b()
serie_ir.dato=2
if(stat_cnt>3){
stat_cnt=4
rx_cnt=1
}
stat_cnt = 0
isr_b()
serie_ir.dato=7E
if(stat_cnt<2){
stat_cnt=1

```

Recepción de
comandos para
prueba de la
calculadora

```

    }
    stat_cnt = 1
    isr_b()
    serie_ir.dato=7E
    if(stat_cnt<2){
    stat_cnt=2
    }
    stat_cnt = 3
    isr_b()
    serie_ir.dato=6
    (stat_cnt==3)
    stat_cnt=3
    rx_longitud=6
    tramaRx[0]=6
    tramaRx[0]=6
    stat_cnt = 4
    isr_b()
    serie_ir.dato=2
    if(stat_cnt>3){
    stat_cnt=4
    rx_cnt=1
    }
    stat_cnt = 0
    isr_b()
    serie_ir.dato=7E
    if(stat_cnt<2){
    stat_cnt=1
    }
    stat_cnt = 1
    isr_b()
    serie_ir.dato=7E
    if(stat_cnt<2){
    stat_cnt=2
    }
    stat_cnt = 3
    isr_b()
    serie_ir.dato=5
    (stat_cnt==3)
    stat_cnt=3
    rx_longitud=5
    tramaRx[0]=5
    tramaRx[0]=5
    stat_cnt = 4
    isr_b()
    serie_ir.dato=3
    if(stat_cnt>3){
    stat_cnt=4
    rx_cnt=1
    }

```

Recepción de
comandos para
prueba de la
calculadora

Esta información es muy específica debido a que incluye los valores de los registros del robot, los valores que lee del diodo receptor, los valores que escribe en el diodo transmisor, y alguna información adicional como por ejemplo los nombres de las

rutinas a las que ingresa el programa en tiempo de ejecución. En el cuadro anterior se dividió esta información en secciones, para que sea más fácil de comprender de acuerdo con la operación que está realizando el robot en determinado momento.

Con esto se comprobó que la comunicación inalámbrica con el robot por medio del protocolo infrarrojo se puede llevar a cabo de manera efectiva, que el robot recibe e interpreta los comandos que se le envían y es capaz de responder mediante el mismo protocolo inalámbrico.

4.2 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA DE ENERGÍA

Investigadores: Aníbal Coto Cortés

Estudiantes: Juan Carlos Rivera Elizondo, Stanley Hernández

4.2.1 SISTEMA DE LOCALIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL ROBOT

Inicialmente se habían considerado dos posibles fuentes de energía para el minirobot: utilizar electrones secundarios del SEM (microscopio de barrido electrónico), lo cual aplicaría sólo en el caso de ambientes de microscopía electrónica, o bien la utilización de una celda fotovoltaica sobre la cual se enfocaría un rayo láser que seguiría al robot alimentándolo sin importar su trayectoria, siempre dentro del área de cobertura.

Al examinar con mayor detalle la idea de los electrones secundarios del SEM, se llegó a la conclusión de que las corrientes disponibles en el SEM tienen una magnitud demasiado baja para alimentar al robot [8], volviendo inviable la posibilidad de utilizar los electrones secundarios como fuente de energía. Debido a esto, así como a la versatilidad de la celda fotovoltaica para alimentar el minirobot en diferentes ambientes de operación, se decidió concentrar los esfuerzos en la alimentación por celda fotovoltaica, que es capaz de capturar más energía y cuya incorporación en el minirobot es mucho más sencilla y permite la compatibilidad con una mayor cantidad de aplicaciones.

La comunicación inalámbrica de energía consiste en proveer al robot de un sistema de alimentación en el cual se utilice un láser externo que debe estar apuntando a una fotocelda que está en la parte superior del robot, de modo que haya una transferencia de energía óptica entre el transmisor y el receptor, este último realizando la conversión a energía eléctrica para el funcionamiento de las partes electrónicas.

Primero se desarrolló el sistema de localización y seguimiento del robot con el fin de poder dirigir el rayo láser sobre la fotocelda. El sistema de localización utiliza un sistema de visión por computadora para conocer la posición del robot; esta información es enviada al sistema de seguimiento, que se encarga de apuntar el láser al robot. Adicionalmente se utiliza un sistema paralelo para determinar la posición del rayo láser para estimar el error de la posición del rayo respecto a la posición del robot,

y de esta manera cerrar el lazo de control para corregir y reducir el error de manera iterativa.

La figura 4.2.1 muestra un esquema general del sistema de seguimiento de localización y seguimiento del robot.

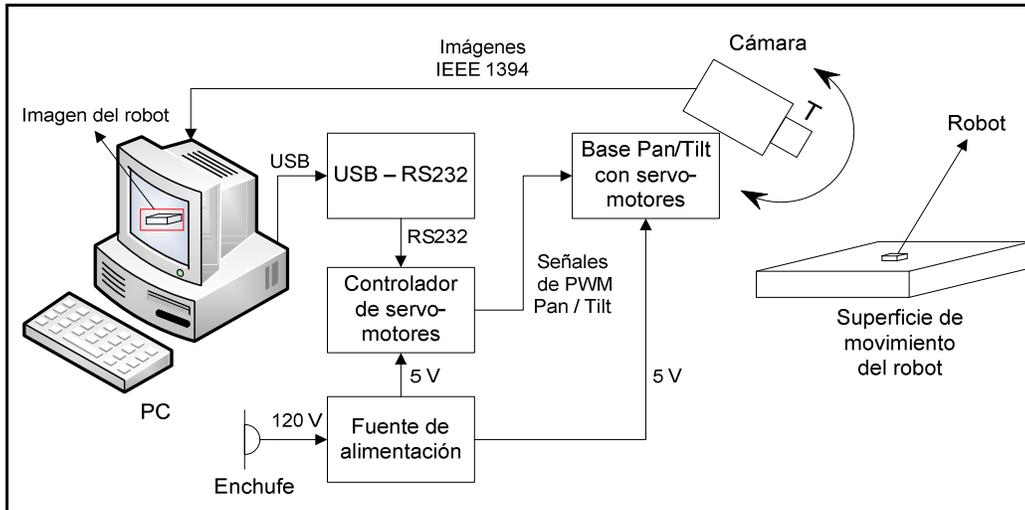


Figura 4.2.5. Esquema físico general del sistema desarrollado para el seguimiento del robot

4.2.1.1 Sistema de posicionamiento láser

A continuación se describe el sistema de posicionamiento láser. Este sistema recibe coordenadas cartesianas (x,y) del sistema de localización y seguimiento. A partir de estas coordenadas utiliza dos servomotores para dirigir el rayo láser hacia el objetivo, en este caso el robot, y además recibe información de la ubicación del rayo láser, mediante lo cual estima el error para corregirlo. La figura 4.2.2 describe el diagrama de bloques descrito.

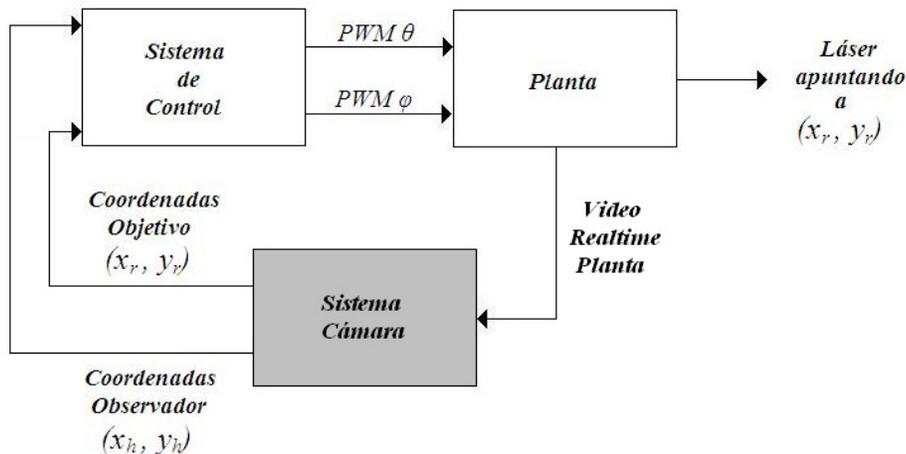


Figura 4.2.6. Diagrama de bloques del sistema de posicionamiento laser de alimentación del robot

El diagrama de bloques está conformado por el sistema de control, la planta y el sistema cámara. La planta recibe las señales PWM que le envía el sistema de control para que el láser apunte a la posición del objetivo (x_r, y_r) . El sistema de control genera dichas señales en función de las coordenadas del centro de la fotocelda (x_r, y_r) y las coordenadas del punto en el que incide el rayo láser (x_h, y_h) . El sistema cámara calcula estas coordenadas a partir de un video en tiempo real que toma directamente de la observación de la oblea de la planta. Las entradas de la planta son las señales $PWM\theta$ y $PWM\phi$ las cuales controlan el ángulo de inclinación del rayo láser. La salida de la planta es el rayo láser apuntando al punto (x_r, y_r) donde se ubica la fotocelda del robot una vez que (x_h, y_h) logró alcanzar el punto (x_r, y_r) .

La figura 4.2.3 muestra un diagrama del prototipo elaborado para representar la planta física. En esta imagen se muestra cada una de las partes de la cámara excepto el robot con la fotocelda. El interior de la cámara del microscopio se representa con un cubo de 30cm de arista.

La figura 4.2.4 muestra un diagrama del prototipo de la articulación implementado. Se puede observar que esta articulación está compuesta por una base, dos servomotores, un brazo y el láser.

La base sirve de soporte a la articulación para sujetarse a la pared interior de la cámara del microscopio. El *servoj* es el que mueve el rayo láser a lo largo de la coordenada j. El *servoq* mueve el rayo láser a lo largo de la coordenada q.

El brazo tiene la función de sujetar el apuntador láser y centrarlo con respecto al eje central de la articulación. El eje central de la articulación es el punto donde se interseca el eje de giro del *servoj* con el eje de giro del *servoq*. El punto de salida del rayo láser debe estar centrado lo mejor posible con el eje central para que la articulación pueda ser representada por el modelo desarrollado. La alineación de la salida del rayo láser con respecto al eje central es muy importante para que se ajuste la articulación al modelo.

La figura 4.2.5 muestra el circuito electrónico que tiene la articulación. Este circuito provee la tensión de alimentación que requieren los servomotores (V_0), y la tensión de alimentación que requiere el apuntador láser (V_z). La figura 4.2.5 muestra también cómo se introduce la tensión de alimentación a los servomotores y cómo se ingresa la señal de control $PWMq$ y $PWMj$. Estas señales de control deben mantenerse en 0V

cuando los servomotores están alimentados y no están siendo controlados, de lo contrario ellos van a desplazarse hasta alcanzar su tope de 180° forzándose en dicha posición y corriendo el peligro de quemarse si se mantienen mucho tiempo en ese estado forzado.

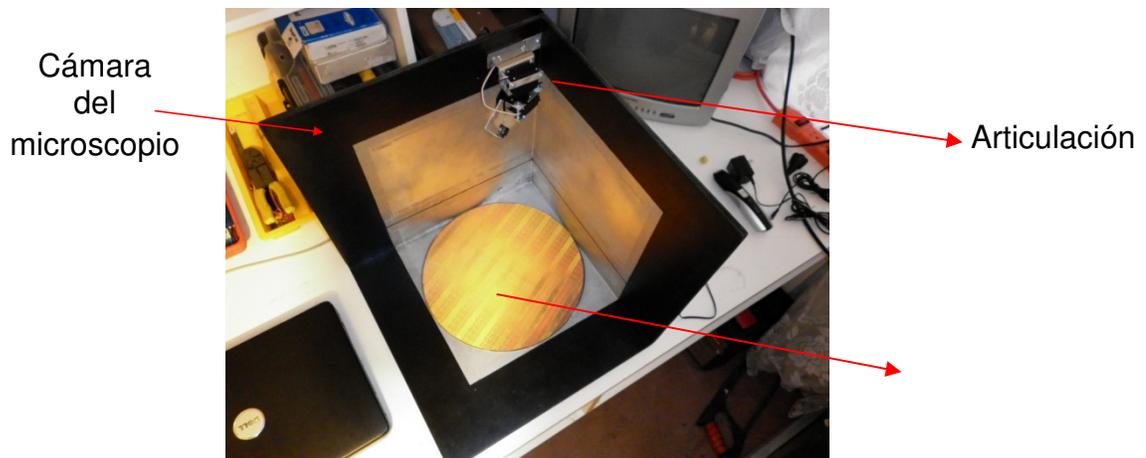
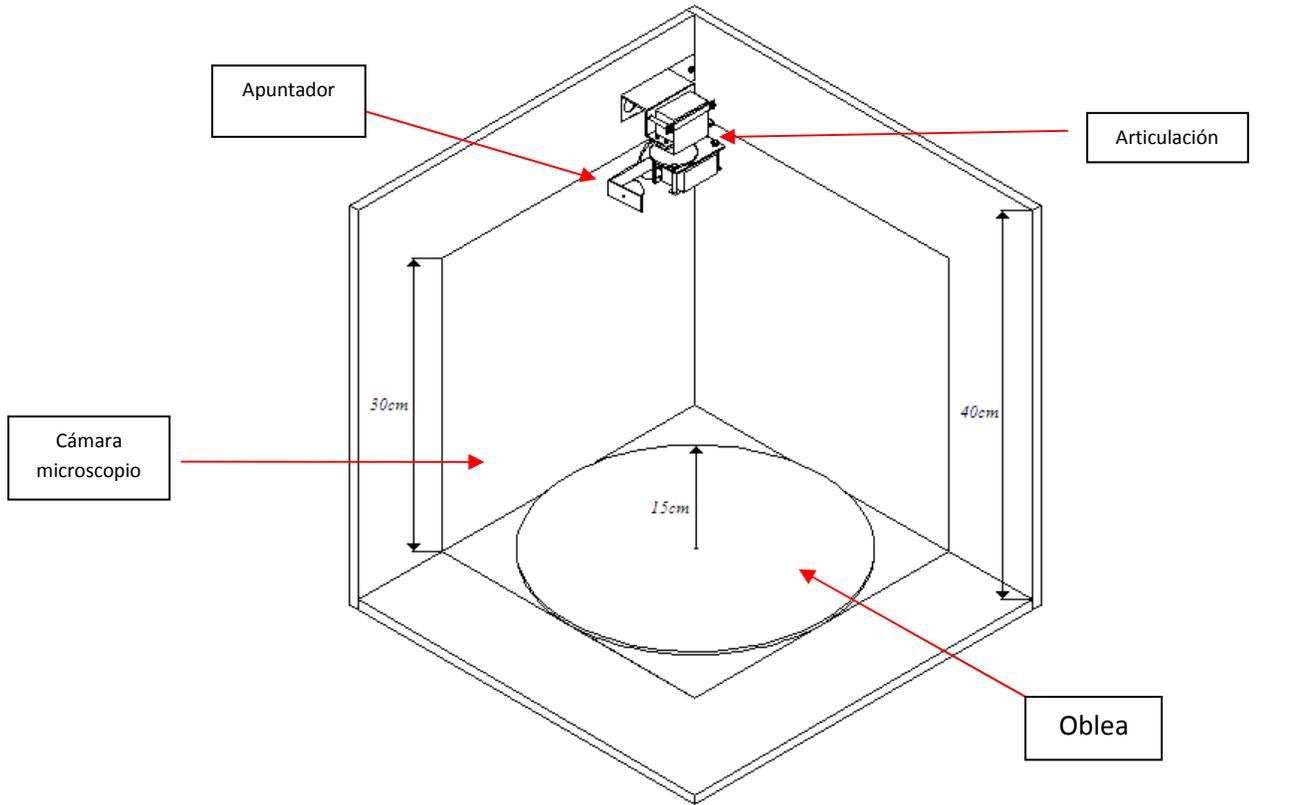


Figura 4.2.7. Diagrama de la Planta y sus respectivas partes señaladas

Para la generación de las tensiones V_o y V_z se utiliza un adaptador no regulado de 12V/1A. El regulador KA7805 es un regulador de tensión de 5V CD (V_o) estable para cualquier carga que se encuentre entre 0A y 1A.

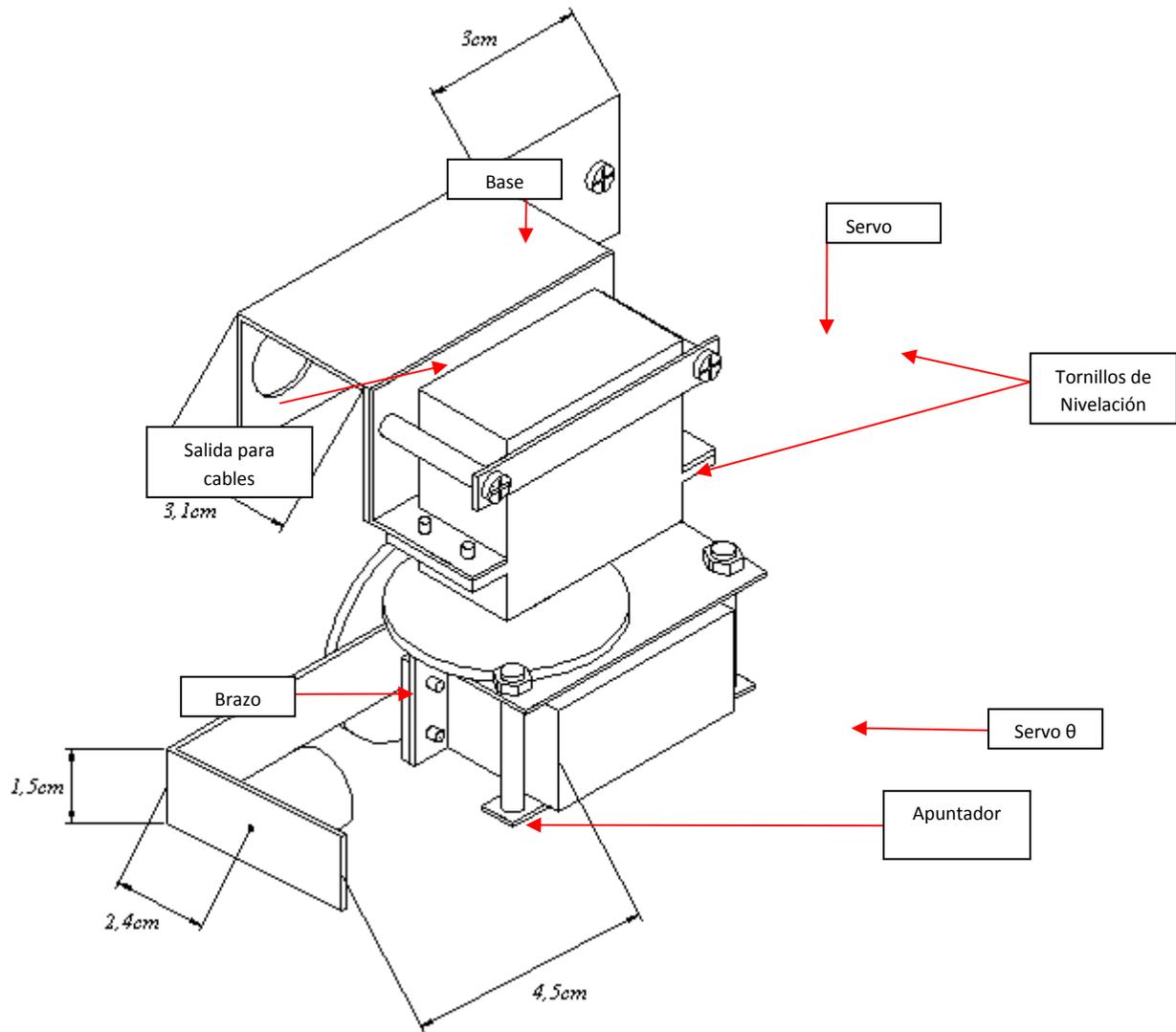


Figura 4.2.8. Diagrama de la Planta y sus respectivas partes señaladas

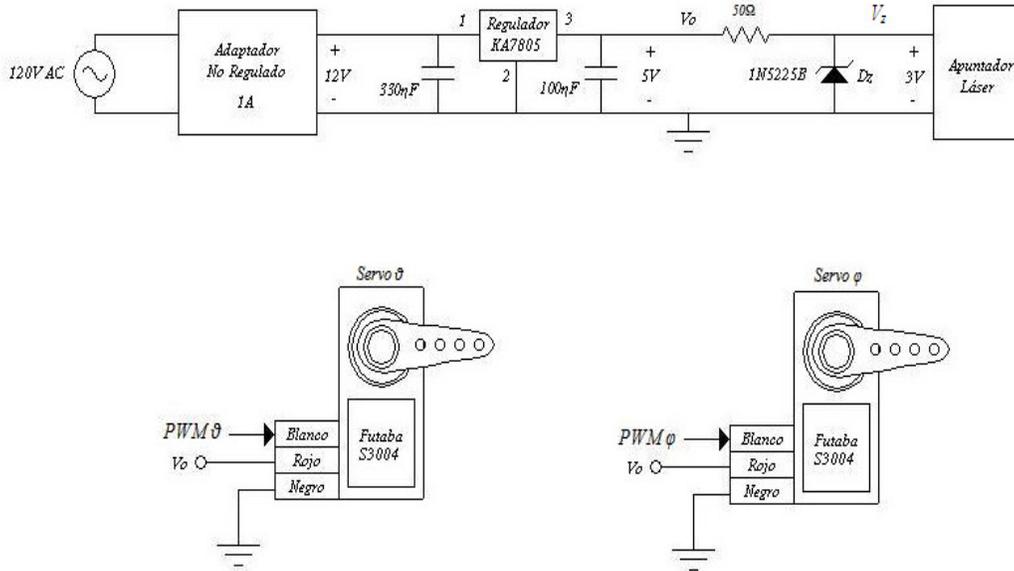


Figura 4.2.9. Circuito electrónico del sistema de posicionamiento láser

4.2.1.2 Modelo matemático utilizado

4.2.1.2.1 Relación entre los ángulos del láser y el objetivo

La Figura 4.2.6 muestra el diagrama utilizado para deducir la relación que existe entre los ángulos de inclinación del rayo láser y el punto (x,y) en el que incide el rayo sobre la superficie de la oblea. Los ángulos de inclinación del rayo láser son q y j . Estos ángulos se miden respecto al eje central de la articulación. El eje central es el punto donde se interseca el eje de giro del servo j con el eje de giro del servo q . Dicho punto está ubicado en las coordenadas $(x,y,z)=(C_x,C_y,h)$ dentro de la cámara del microscopio. Este eje central es muy importante porque todo el modelo se monta a partir de él.

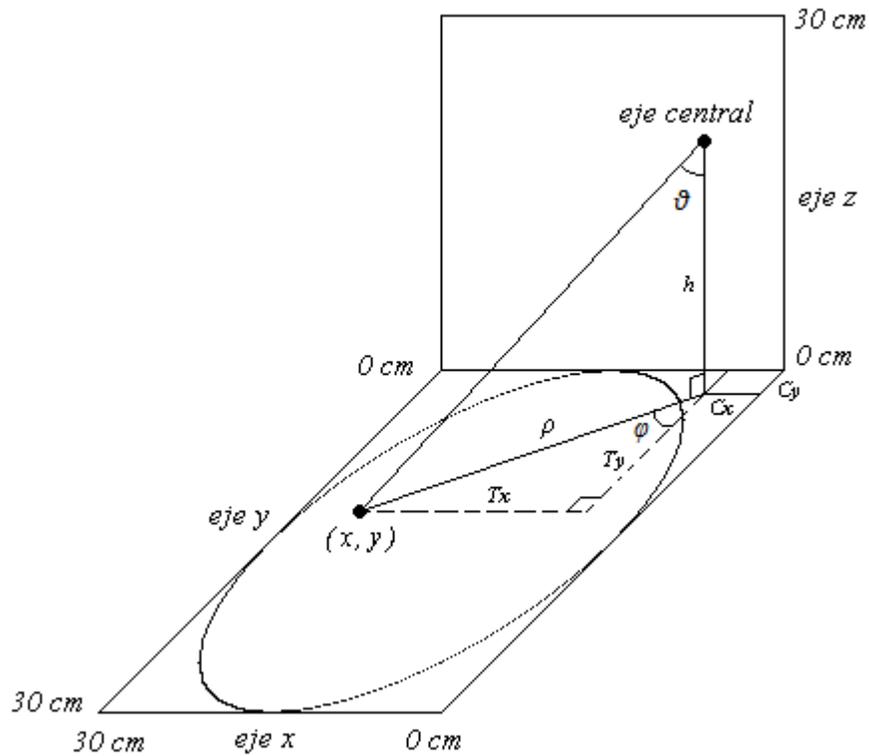


Figura 4.2.10. Diagrama que representa la relación entre los ángulos de inclinación del láser (θ , φ) y el punto (x, y) al que apunta

Ahora se procede a buscar la relación que existen entre los ángulos q y j y el punto (x, y) . Sabiendo que:

$$Tx = x - Cx$$

$$Ty = y - Cy$$

Se concluye que:

$$x = h \cdot \tan\theta \cdot \text{sen}\varphi + Cx \quad (\text{Ec. 4.2.1})$$

$$y = h \cdot \tan\theta \cdot \text{cos}\varphi + Cy \quad (\text{Ec. 4.2.2})$$

Las ecuaciones 4.2.1 y 4.2.2 permiten conocer las coordenadas (x, y) del punto de incidencia del láser sobre la oblea dado un ángulo q y j conocidos.

Además se concluye que:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x-Cx)^2 + (y-Cy)^2}}{h} \right) \quad (\text{Ec. 4.2.3})$$

$$\varphi = \begin{cases} \cos^{-1} \left(\frac{y-Cy}{\sqrt{(x-Cx)^2 + (y-Cy)^2}} \right) & \text{si } x \geq Cx \\ -\cos^{-1} \left(\frac{y-Cy}{\sqrt{(x-Cx)^2 + (y-Cy)^2}} \right) & \text{si } x < Cx \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.2.4})$$

Las ecuaciones 4.2.3 y 4.2.4 permiten calcular el ángulo q y j que debe tener el rayo láser para que incida en el punto (x,y) sobre la oblea. Estas dos ecuaciones son usadas más adelante en el diseño del sistema de control.

4.2.1.2.2 Relación entre los ángulos del láser y los ángulos de los servomotores

En la figura 4.2.7 se muestra el diagrama utilizado para deducir la relación entre el ángulo φ del láser y el ángulo φ_s del servo φ .

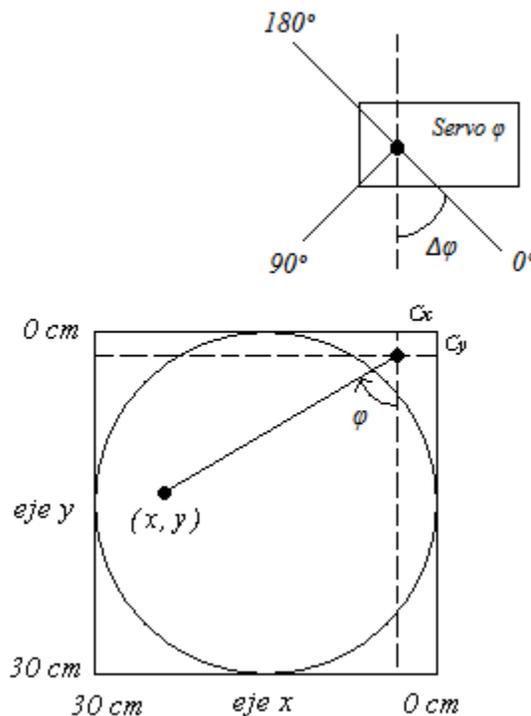


Figura 4.2.11. Diagrama que representa la relación entre el ángulo φ del láser y el ángulo φ_s del servomotor

Se puede notar en la figura que cuando $\varphi = 0^\circ$ el servomotor ya ha avanzado $\Delta\varphi$ grados, por tanto para alcanzar el punto (x, y) el φ_s debe ser:

$$\varphi_s = \Delta\varphi + \varphi \quad (\text{Ec. 4.2.5})$$

La ecuación 4.2.5 es utilizada posteriormente en el sistema de control. Despejando φ de la ecuación anterior se obtiene que:

$$\varphi = \varphi_s - \Delta\varphi \quad (\text{Ec. 4.2.6})$$

En la figura 4.2.8 se muestra el diagrama utilizado para deducir la relación entre el ángulo θ del láser y el ángulo θ_s del *servo* θ .

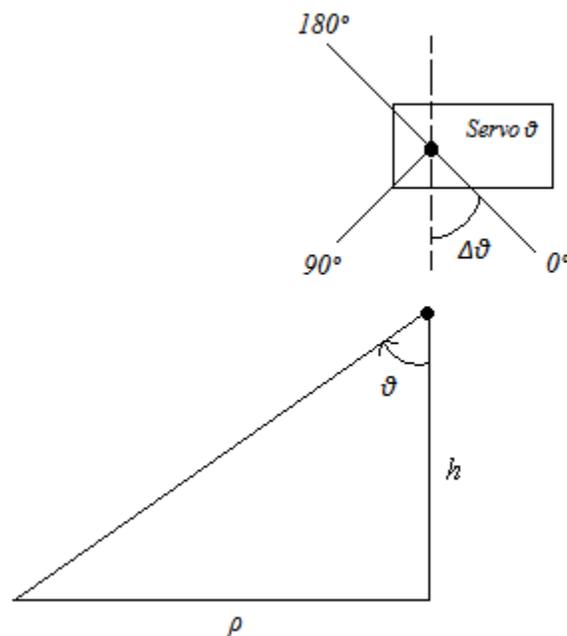


Figura 4.2.12. Diagrama que representa la relación entre el ángulo θ del láser y el ángulo θ_s del servomotor

Se puede notar en la figura que cuando $\theta = 0^\circ$ el servomotor ya ha avanzado $\Delta\theta$ grados, por tanto para alcanzar el punto (x, y) el θ_s debe ser:

$$\theta_s = \Delta\theta + \theta \quad (\text{Ec. 4.2.7})$$

Despejando θ de la ecuación 4.2.7 se obtiene que:

$$\theta = \theta_s - \Delta\theta \quad (\text{Ec. 4.2.8})$$

4.2.1.2.3 Relación entre el ángulo del servo y su entrada PWM

La figura 4.2.9 es una gráfica que muestra la relación que existe entre el ángulo del servomotor y el tiempo que su entrada PWM se mantiene en nivel alto (T_{Hi}).

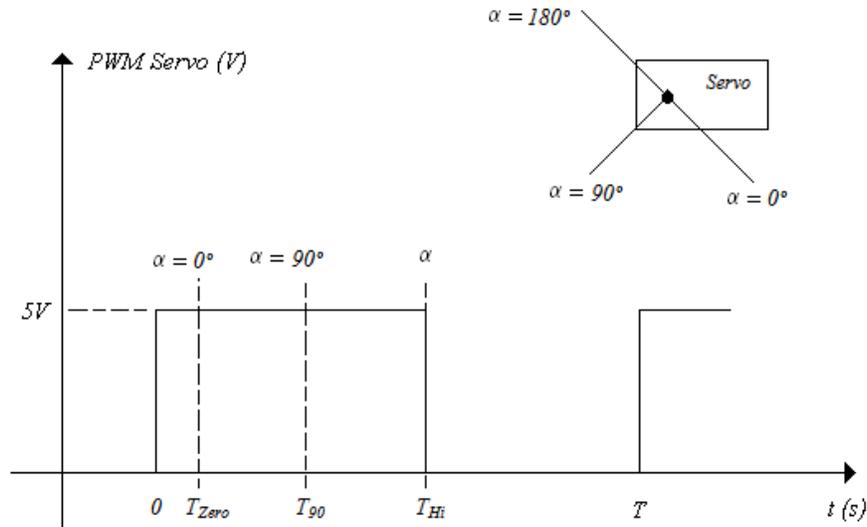


Figura 4.2.13. Gráfica que representa la relación entre el ángulo α del servomotor y su entrada PWM

La señal PWM es una onda rectangular de 5V de amplitud. El ángulo α del servomotor es directamente proporcional al tiempo T_{Hi} . Una propiedad importante de esta señal PWM es que el ángulo $\alpha = 0^\circ$ no se alcanza cuando $T_{Hi} = 0ms$ sino cuando $T_{Hi} = T_{Zero} ms$. Cualquier pulso por debajo de este valor produce un ángulo de 0° en el servomotor. Los 90° se alcanzan cuando $T_{Hi} = T_{90} ms$.

La proporcionalidad que existe entre α y T_{Hi} se representa en la figura 4.2.10. Esta gráfica es la que se utiliza para deducir las fórmulas que relacionan ambas variables.

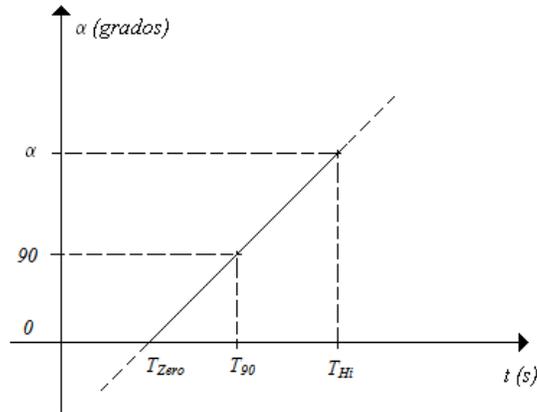


Figura 4.2.14. Gráfica que representa la relación entre el ángulo α del servomotor y el tiempo que su entrada PWM se mantiene en nivel alto (T_{Hi})

Sabiendo que:

$$\alpha = m \cdot T_{Hi} + b$$

$$m = \frac{90^\circ - 0^\circ}{T_{90} - T_{Zero}}$$

$$b = \frac{T_{Zero} \cdot 90^\circ}{T_{90} - T_{Zero}}$$

Se concluye que:

$$\alpha = \frac{90^\circ}{T_{90} - T_{Zero}} (T_{Hi} - T_{Zero}) \quad (\text{Ec. 4.2.9})$$

$$T_{Hi} = \frac{T_{90} - T_{Zero}}{90^\circ} \cdot \alpha + T_{Zero} \quad (\text{Ec. 4.2.10})$$

La ecuación 4.2.10 es la que se utiliza en el sistema de control para calcular el T_{Hi} que debe tener la señal PWM para alcanzar un ángulo α requerido en el servomotor, α se sustituye por θ y φ de forma respectiva.

4.2.1.2.4 Apertura del rayo láser

El diagrama utilizado para deducir el efecto que tiene el ángulo θ en la apertura del rayo láser cuando incide en la oblea se muestra en la figura 4.2.11.

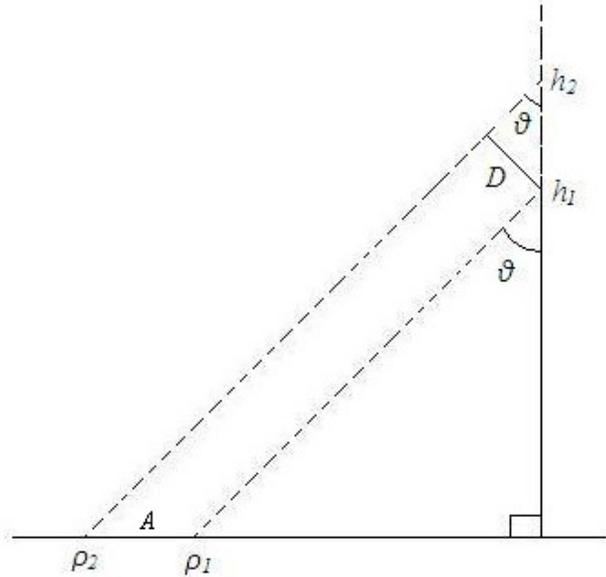


Figura 4.2.15. Gráfica que representa la relación entre la apertura del láser (A) y el ángulo de inclinación θ

Se puede observar en la figura 4.2.11 que el diámetro D del rayo láser se agranda en la misma dirección de la coordenada ρ cuando el ángulo θ aumenta. Esto es importante de modelar ya que esta apertura A debe ser limitada para que el láser no se salga del área efectiva de la fotocelda.

Sabiendo que:

$$\rho_1 = h_1 \tan \theta$$

$$\rho_2 = h_2 \tan \theta$$

$$h_2 = h_1 + \Delta h$$

$$\Delta h = \frac{D}{\sin \theta}$$

$$\rho_2 = h_1 \tan \theta + \frac{D}{\cos \theta}$$

$$A = \rho_2 - \rho_1$$

Se concluye que:

$$A = D \cdot \sec \theta \quad (\text{Ec. 4.2.11})$$

Este alargamiento de la apertura se produce solamente en dirección de la coordenada ρ . En dirección de la coordenada φ la apertura A sigue siendo igual a D , pero se debe tomar como apertura el eje mayor de la elipse resultante.

Para comparar la apertura del láser A con el área efectiva de la fotocelda es conveniente considerar esta área como un círculo cuyo diámetro (d) es igual al lado del cuadrado que constituye el área efectiva de la fotocelda (l). Esto corresponde al círculo inscrito en dicha área, la figura 4.2.12 muestra esta representación.

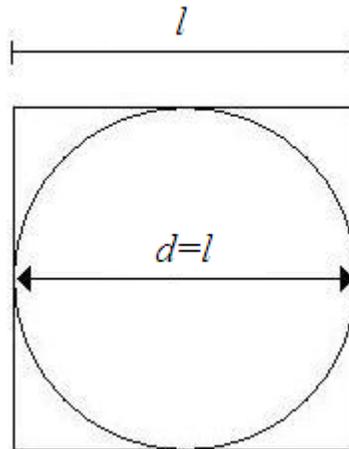


Figura 4.2.16. Representación de la fotocelda como el círculo inscrito en su área efectiva

Cuando la apertura A es menor que el diámetro l de la celda existe una desviación máxima que se le puede permitir al rayo láser. La figura 4.2.13 muestra el análisis realizado para calcular dicha desviación máxima.

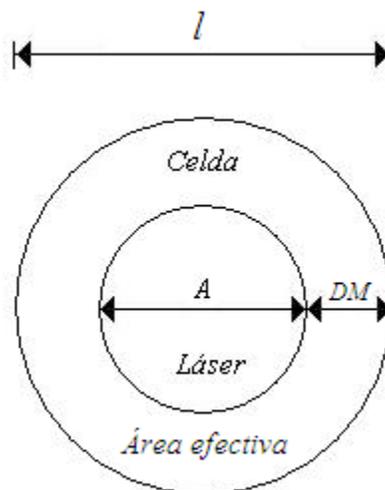


Figura 4.2.17. Representación de la Desviación Máxima que se le puede permitir al láser

De la figura 4.2.13 se deduce que la desviación máxima (DM) es:

$$DM = \frac{l-A}{2} \quad (\text{Ec. 4.2.12})$$

Es importante que exista este rango de desviación máxima para que el láser no se salga del área efectiva de la fotocelda cuando el robot se pone en movimiento. Esto porque se debe tomar en cuenta que el robot primero tiene que cambiar su posición para que el sistema cámara pueda determinar su nueva posición y enviar la información al sistema de control para que haga que el láser apunte a dicha posición. Por tanto si no existe un rango desviación máxima el láser va a mantener una porción de su rayo fuera del área efectiva durante el tiempo que el sistema tarde en cambiar su posición.

4.2.1.2.5 Relación entre el ángulo mínimo del servo y el paso mínimo

La figura 4.2.14 se utilizó de ayuda para deducir la relación que existe entre el ángulo mínimo del servomotor y el paso mínimo del rayo láser al incidir sobre el *wafer*.

Por ángulo mínimo del servomotor se entiende el ángulo más pequeño en que el servomotor puede incrementar o decrementar su ángulo.

Por paso mínimo del rayo láser se entiende como la distancia más pequeña en que el láser puede cambiar su posición al moverse sobre una coordenada determinada.

A continuación se va a analizar el paso mínimo del láser y el ángulo mínimo del *servo* φ .

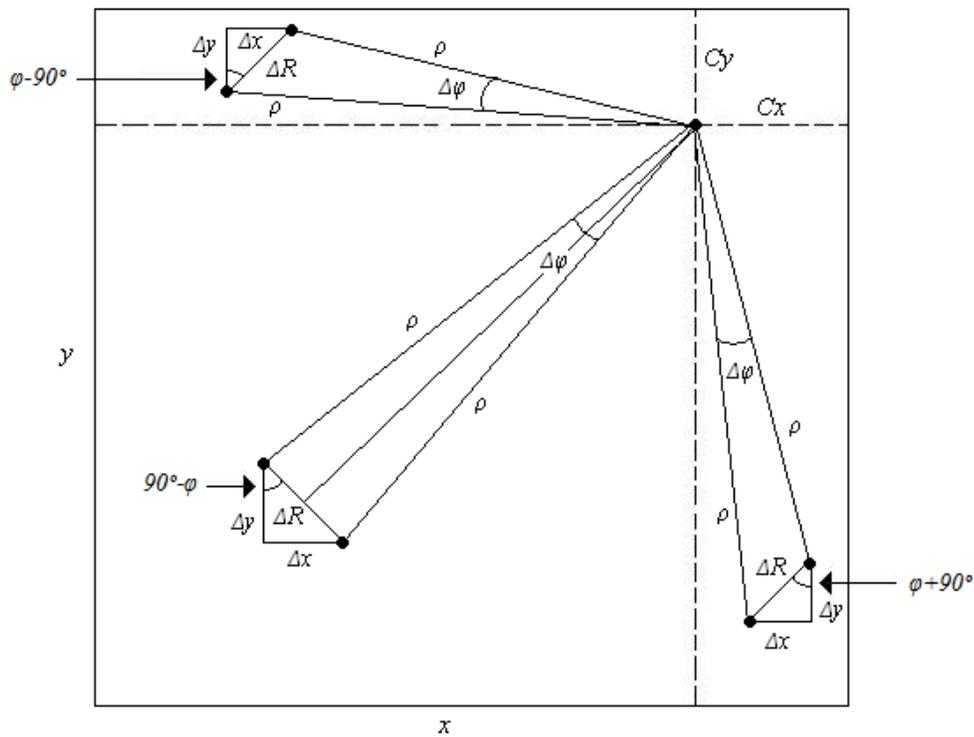


Figura 4.2.18. Gráfica que representa la relación entre el ángulo mínimo $\Delta\varphi$ y el paso mínimo ΔR que puede dar el servo φ

A partir de la figura 4.2.14 se deduce que:

$$\Delta R = 2\rho \cdot \text{sen}\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (\text{Ec. 4.2.13})$$

$$\Delta x = \begin{cases} |\Delta R \cdot \text{sen}(\varphi - 90^\circ)| & \text{si } \varphi > 90^\circ \\ |\Delta R \cdot \text{sen}(90^\circ - \varphi)| & \text{si } 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \\ |\Delta R \cdot \text{sen}(\varphi + 90^\circ)| & \text{si } \varphi < 0^\circ \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.2.14})$$

$$\Delta y = \begin{cases} |\Delta R \cdot \text{cos}(\varphi - 90^\circ)| & \text{si } \varphi > 90^\circ \\ |\Delta R \cdot \text{cos}(90^\circ - \varphi)| & \text{si } 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \\ |\Delta R \cdot \text{cos}(\varphi + 90^\circ)| & \text{si } \varphi < 0^\circ \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.2.15})$$

A continuación se analiza la relación entre el paso mínimo del láser y el ángulo mínimo del servo θ .

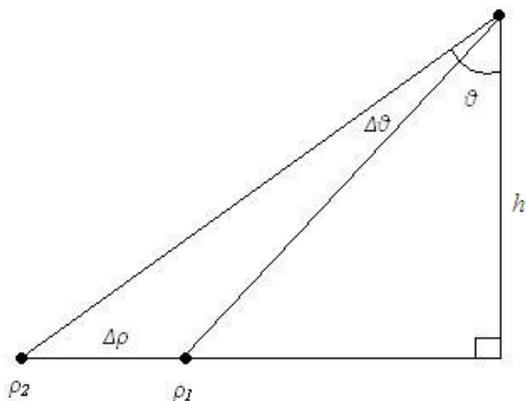


Figura 4.2.19. Gráfica que representa la relación entre el ángulo mínimo $\Delta\theta$ y el paso mínimo $\Delta\rho$ que puede dar el servo θ

En la figura 4.2.15 se puede observar que:

$$\rho_1 = h \cdot \tan\theta$$

$$\rho_2 = h \cdot \tan(\theta + \Delta\theta)$$

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$$

Por tanto se concluye que:

$$\Delta\rho = h[\tan(\theta + \Delta\theta) - \tan\theta] \quad (\text{Ec. 4.2.16})$$

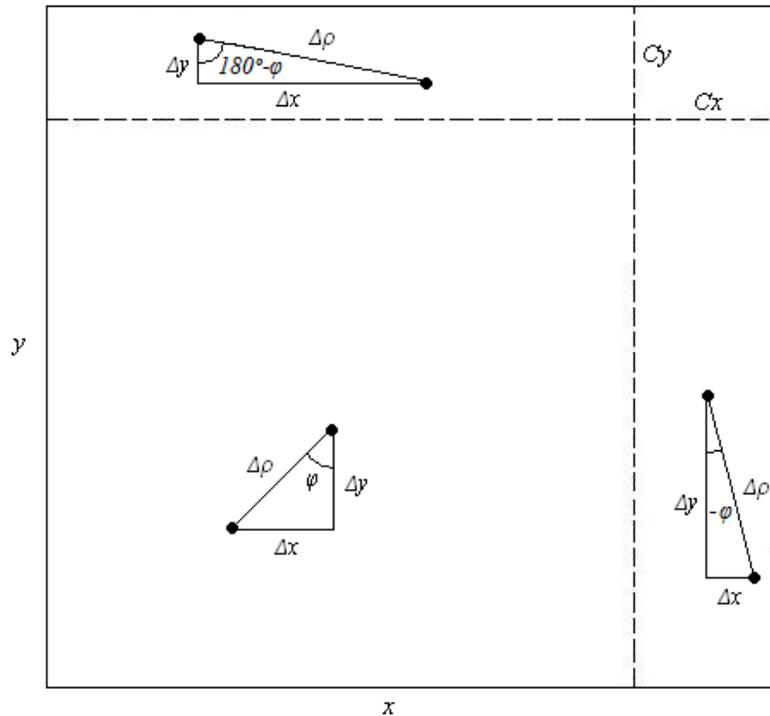


Figura 4.2.20. Gráfica que representa la relación entre el paso mínimo $\Delta\rho$ y sus componentes Δx y Δy

De la figura 4.2.16 se deduce que:

$$\Delta x = \begin{cases} |\Delta\rho \cdot \text{sen}(180^\circ - \varphi)| & \text{si } \varphi > 90^\circ \\ |\Delta\rho \cdot \text{sen}\varphi| & \text{si } \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.2.17})$$

$$\Delta y = \begin{cases} |\Delta\rho \cdot \text{cos}(180^\circ - \varphi)| & \text{si } \varphi > 90^\circ \\ |\Delta\rho \cdot \text{cos}\varphi| & \text{si } \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.2.18})$$

son utilizadas en una simulación para analizar el paso mínimo del láser que se obtiene a partir del ángulo mínimo que posee un servomotor determinado, y para calcular el ángulo mínimo que debe tener un servomotor para obtener un paso mínimo determinado.

4.2.1.2.6 Sistema de Control

La figura 4.2.17 muestra el bloque funcional que representa el sistema de control. Se puede observar que las entradas del sistema de control son las coordenadas del objetivo (x_r, y_r) y las coordenadas del observador (x_h, y_h) . Entiéndase por coordenadas del observador las coordenadas del punto de incidencia del rayo láser sobre la superficie de la oblea. Las salidas del sistema de control son la señal $PWM \theta$ que controla el *servo* θ y la señal $PWM \phi$ que controla al *servo* ϕ . Estas salidas se generan en función de sus entradas.

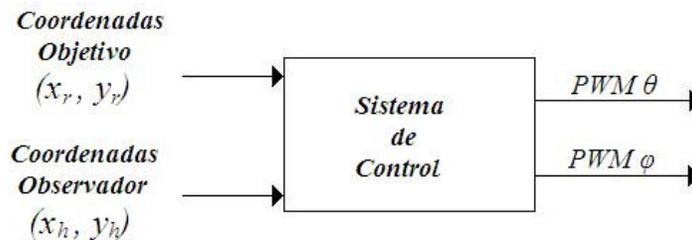


Figura 4.2.21. Bloque funcional que representa el sistema de control

La figura 4.2.18 muestra la estructura del sistema de control; éste está compuesto por un módulo llamado PC y un módulo llamado Interfaz.

PC se encarga de recibir las coordenadas del objetivo y las coordenadas del observador, procesarlas y enviar a la Interfaz vía USB los valores necesarios para generar las señales $PWM \theta$ y $PWM \phi$.

Interfaz se encarga de recibir los valores que PC le envía vía USB, procesarlos y generar a partir de ellos las señales $PWM \theta$ y $PWM \phi$ que controlan los servomotores.

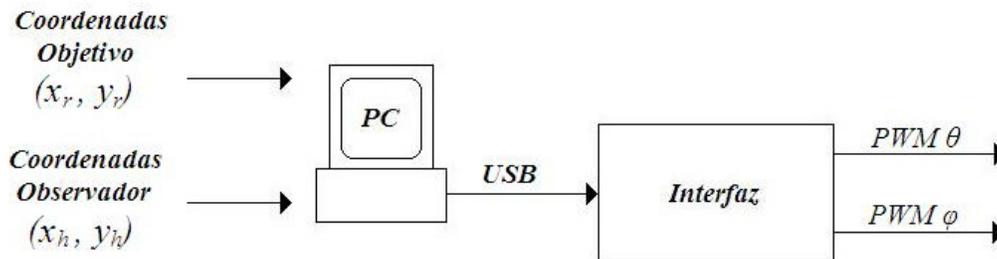


Figura 4.2.22. Diagrama de tercer nivel que representa la estructura del sistema de control

La figura 4.2.19 muestra el proceso que se ejecuta en la PC para calcular los valores que se necesitan para generar las señales PWM que controlan los servomotores.

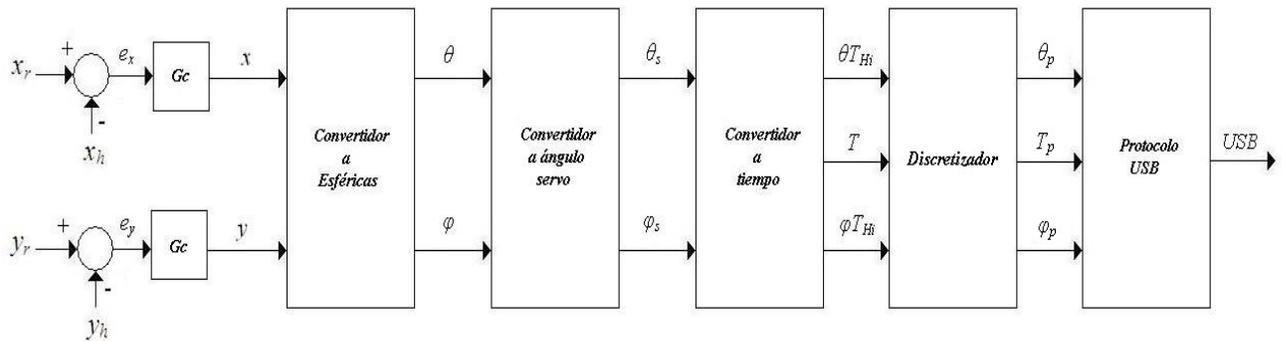


Figura 4.2.23. Diagrama que representa el proceso que se ejecuta en la PC

Una vez recibidas las coordenadas (x_r, y_r) y (x_h, y_h) se calcula el error que tiene la posición del láser (e_x, e_y) con respecto a las coordenadas del objetivo, este error se introduce en la función de transferencia del controlador (G_c). Esta función de transferencia se encarga de calcular el nuevo valor (x, y) al que debe apuntar el láser. El módulo Convertidor a Esféricas toma estas coordenadas y calcula los ángulos θ y φ que debe tener el rayo láser para incidir en dicho punto. El Convertidor a ángulo servo traduce esos dos ángulos en ángulos para los servomotores (θ_s, φ_s) . Estos dos ángulos se convierten en tiempo y se envía θT_{Hi} , φT_{Hi} y T al módulo Discretizador para que los pase a valores discretos $(\theta_p, \varphi_p$ y $T_p)$, y luego se los entregue al módulo Protocolo USB que los encapsula en una trama y los envía a la interfaz vía puerto USB.

De esta manera se aplican las relaciones anteriores para calcular los ángulos de posición del láser a partir de las coordenadas cartesianas de posición del robot. Se utilizan señales PWM para llevar los motores a la posición requerida.

4.2.1.2.7 Síntesis de la función de transferencia del controlador (GC)

Al caracterizar el comportamiento de la planta física en lazo abierto se observó que su respuesta en el tiempo a una entrada escalón se caracteriza por:

- Ser estable
- Asemjarse a la respuesta de un sistema de segundo orden
- No tener sobreimpulso
- Poseer un error en estado estable máximo de $\pm 20\%$
- Poseer un tiempo de asentamiento proporcional a la amplitud del escalón

Se concluyó que la planta física es estable porque al suministrarle como entrada una coordenada (x, y) , la planta colocaba el rayo láser en un punto cercano a dicha coordenada y se mantenía en esa posición hasta que se le indicara otra diferente.

Se observó que la planta física ubicaba el láser en un punto fijo sin sobrepasarlo, por esta razón se concluyó que la respuesta no tenía sobreimpulso o si lo tenía este era muy pequeño.

El máximo error en estado estable se observó cuando se cambiaba el rayo láser del punto $P_1(0cm, 0cm)$ al punto $P_2(15cm, 30cm)$ o del punto $P_1(0cm, 0cm)$ al punto $P_3(30cm, 15cm)$. En el primer caso la coordenada x pasaba de $0cm$ a $17,5cm$. En el segundo caso la coordenada y pasaba de $0cm$ a $13cm$. Por esta razón se decidió sobreestimar el error en estado estable y considerarlo de un $\pm 20\%$.

La velocidad de un servomotor es constante, por esta razón cuanto más larga es la distancia entre el punto inicial y el punto final, tanto mayor es el tiempo de asentamiento (t_s). El tiempo de asentamiento medido entre los puntos P_1 y P_2 o entre P_1 y P_3 fue de 69ms. Como la velocidad de los servomotores Futuba S3004 utilizados en la planta física es de $0.23s/60^\circ$, el tiempo de asentamiento de la planta ante un escalón de $170\mu m$ es de $76.67\mu s$.

La respuesta al escalón unitario de un sistema de segundo orden que se caracteriza por no poseer sobreimpulso se puede representar por la ecuación 4.2.19:

$$p(t) = A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \cdot u(t) \quad (\text{Ec. 4.2.19})$$

Donde:

$p(t)$: Es la posición a la que apunta el láser en la coordenada x o y

A : Es el valor final de la respuesta en estado estable ($e_{ss} = A$)

t : Es el tiempo

τ : Es la constante de tiempo que determina el tiempo de asentamiento ($t_s = 5\tau$)

La gráfica de la respuesta $p(t)$ con los valores obtenidos a partir de la planta física se muestra en la figura 4.2.20.

| | |
|----------|----------|
| Tao [ms] | 1,38E-02 |
| A [cm] | 15 |

| t [ms] | A-u(t) [cm] | p1(t) [cm] (ess=-20%) | p2(t) [cm] (ess=+20%) |
|--------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| -6 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| -5 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| -4 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| -3 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| -2 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| -1 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 15 | 0,84 | 1,26 |
| 2 | 15 | 1,62 | 2,43 |
| 3 | 15 | 2,34 | 3,51 |
| 4 | 15 | 3,02 | 4,52 |
| 5 | 15 | 3,64 | 5,47 |
| 6 | 15 | 4,23 | 6,34 |
| 7 | 15 | 4,77 | 7,15 |
| 8 | 15 | 5,27 | 7,91 |
| 9 | 15 | 5,74 | 8,62 |
| 10 | 15 | 6,18 | 9,27 |
| 11 | 15 | 6,59 | 9,88 |
| 12 | 15 | 6,96 | 10,45 |
| 13 | 15 | 7,32 | 10,97 |
| 14 | 15 | 7,64 | 11,47 |

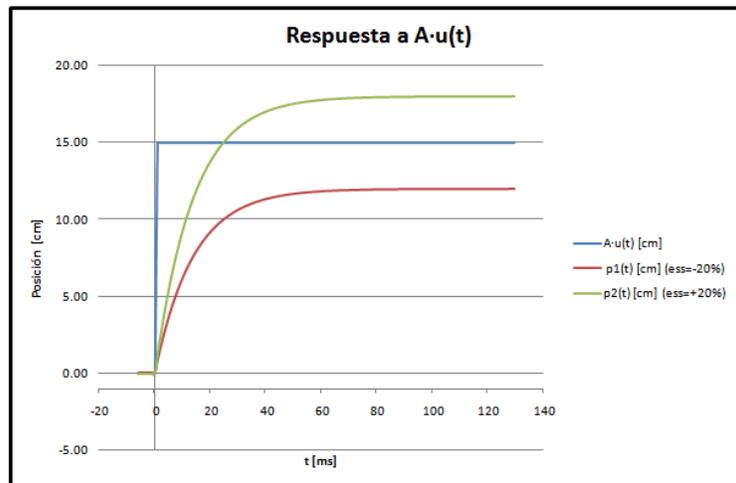


Figura 4.2.20. Respuesta de la planta física al escalón Au(t)

Esto demuestra que el único problema que tiene la planta física es el error en estado estable (e_{ss}). La estabilidad, el sobreimpulso (δ) y el tiempo de asentamiento (t_s) están bien porque no sobrepasan los valores límites fijados. Esto hace necesario agregar un controlador en lazo cerrado que elimine el error en estado estable, y además mantenga el sobreimpulso y el tiempo de asentamiento por debajo de los valores límite.

Mediante un método estándar de la teoría de control automático se procedió al diseño del controlador de lazo cerrado y se obtiene que la función de transferencia del controlador que se necesita para cumplir con los requerimientos de sobreimpulso, error en estado estable y tiempo de asentamiento necesarios tiene la forma de:

$$G_c(s) = K \cdot \frac{s+z_0}{s} \quad (\text{Ec. 4.2.20})$$

Donde:

$$K = 3,5$$

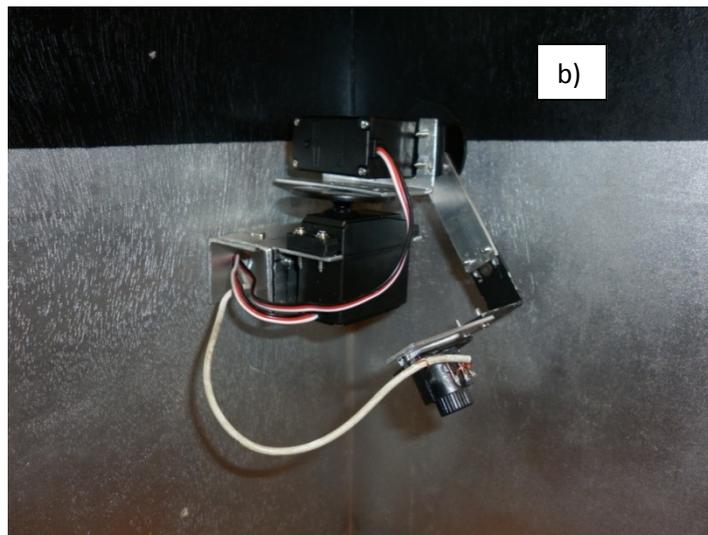
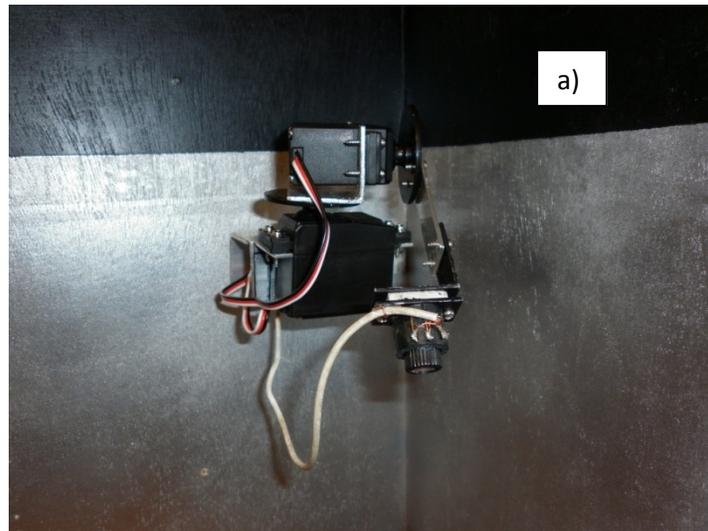
$$z_0 = -40 \times 10^3$$

Por lo tanto,

$$G_c(s) = 3,5 \cdot \frac{s + 40 \times 10^3}{s}$$

En este caso esta ecuación se discretizó para luego obtener la ecuación de diferencias para poder programarla en un microcontrolador.

Con respecto a la articulación del sistema de seguimiento, se muestra en la figura 4.2.21 las diferentes versiones de la articulación con las cuales se experimentó.



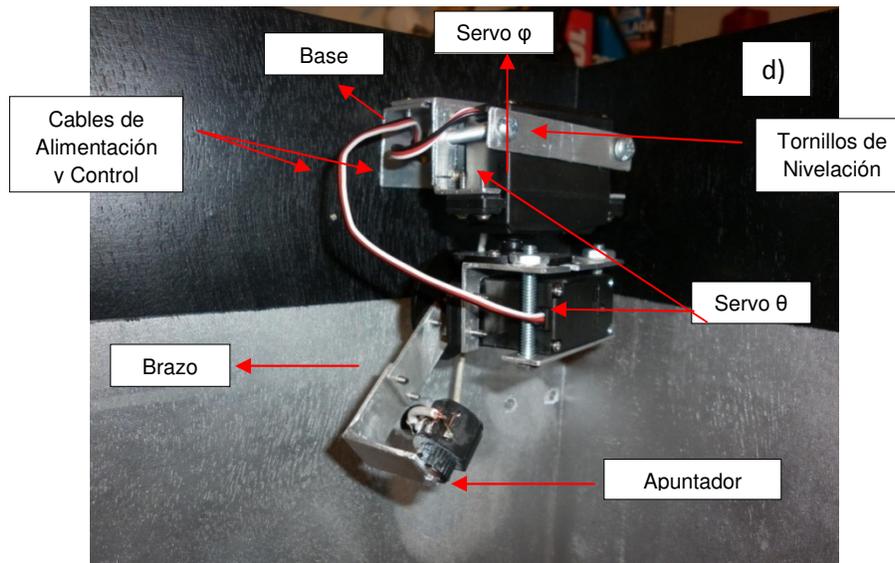
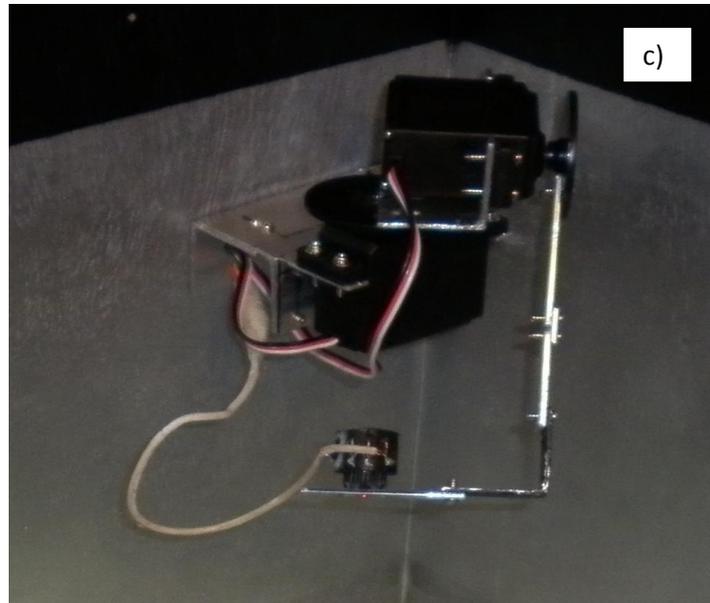


Figura 4.2.21. Articulaciones implementadas para el sistema de seguimiento del robot. a) Primera versión de la articulación, b) segunda versión, c) tercera versión, d) detalle de la articulación definitiva

4.2.2 TRANSFERENCIA DE ENERGÍA DEL LÁSER A LA FOTOCELDA

Se utilizó un láser comercial para generar la energía óptica. Se eligió el modelo M9-830-0150 de ThorLabs, que tiene una longitud de onda de 825nm y brinda una salida máxima de 150mW de potencia óptica.

En la figura 4.2.22 se aprecia el espectro de salida del diodo láser.

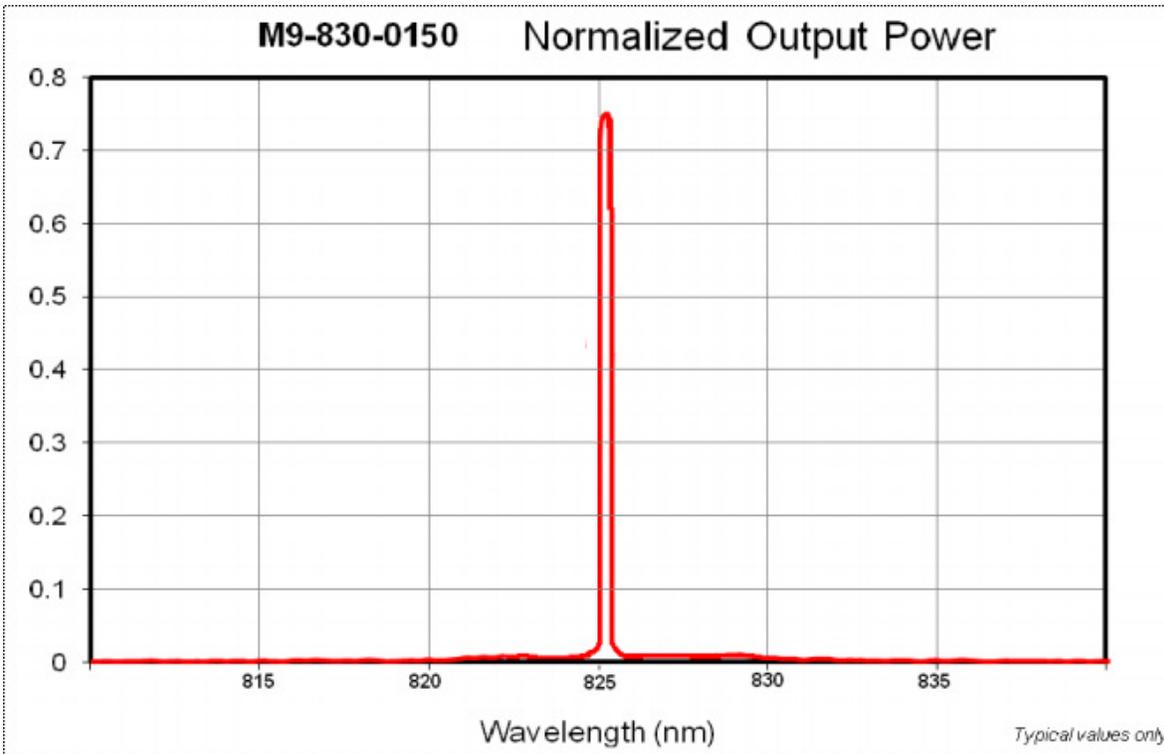


Figura 4.2.22. Potencia de salida normalizada del diodo láser usado para transmitir la energía

Se aprecia cómo el láser tiene una salida espectral alrededor de 825nm, por lo tanto la celda debe tener una respuesta en esta misma longitud de onda. El láser no tiene mayores restricciones en tamaño y peso, ya que va en la estructura externa al sistema del robot.

Sin embargo, la fotocelda sí tiene restricciones de tamaño y peso, ya que debe ser soportada por el robot. Debido a esto se hizo un pedido especial al Instituto Fraunhofer de Energía Solar en Alemania, y se adquirió una celda con las siguientes características: tensión de salida de 4V, celda de Arseniuro de Galio, área cuadrada de 1.6mm de lado y potencia de salida de hasta 400mW.

En la figura 4.2.23 se aprecia la eficiencia de salida de la celda respecto a la longitud de onda de la luz incidente.

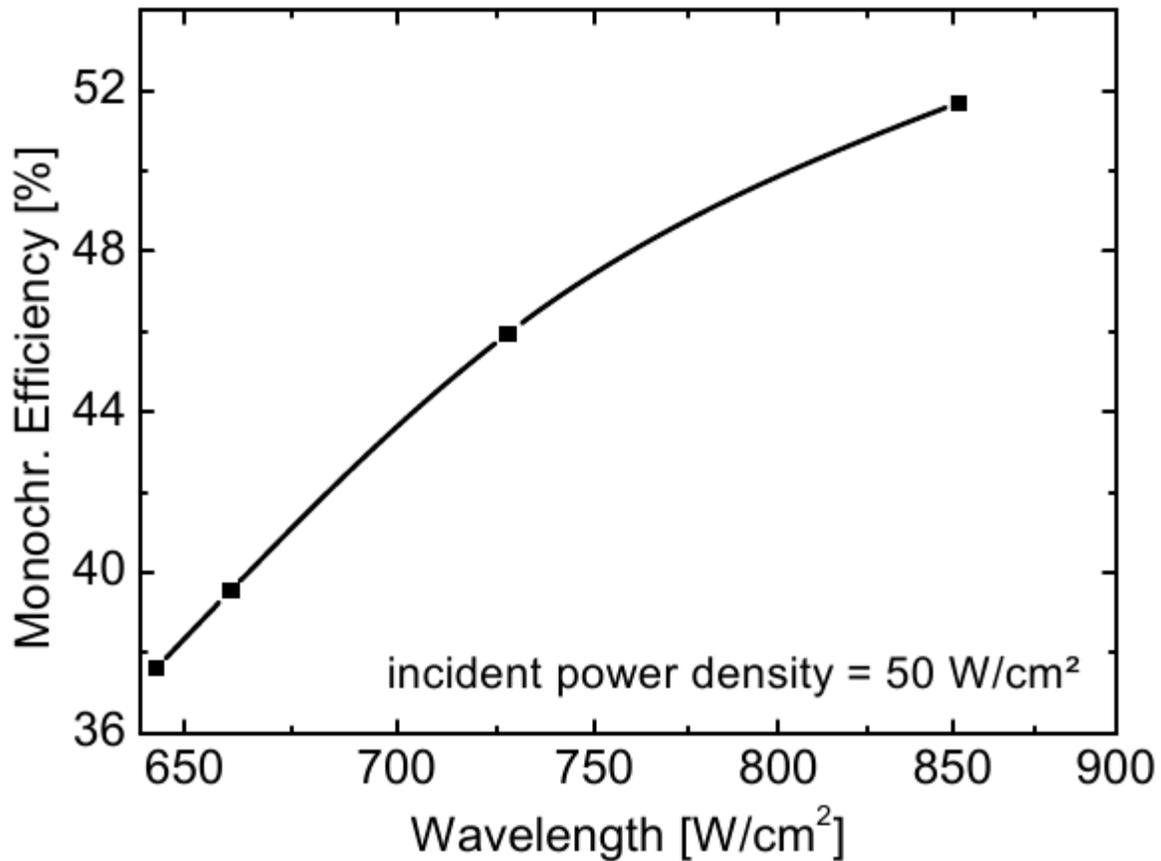


Figura 4.2.23. Eficiencia de conversión de la celda vs longitud de onda incidente

Tal y como se aprecia en la figura 4.2.23, la celda tiene una eficiencia cercana a la máxima alrededor de los 825nm, que es la longitud de onda de operación. Es una eficiencia aproximadamente del 50%.

De esta manera, si el láser está emitiendo 150mW (potencia máxima), se puede extraer de la potencia óptica del láser unos 75mW.

La figura 4.2.24 presenta una imagen de la fotocelda utilizada.

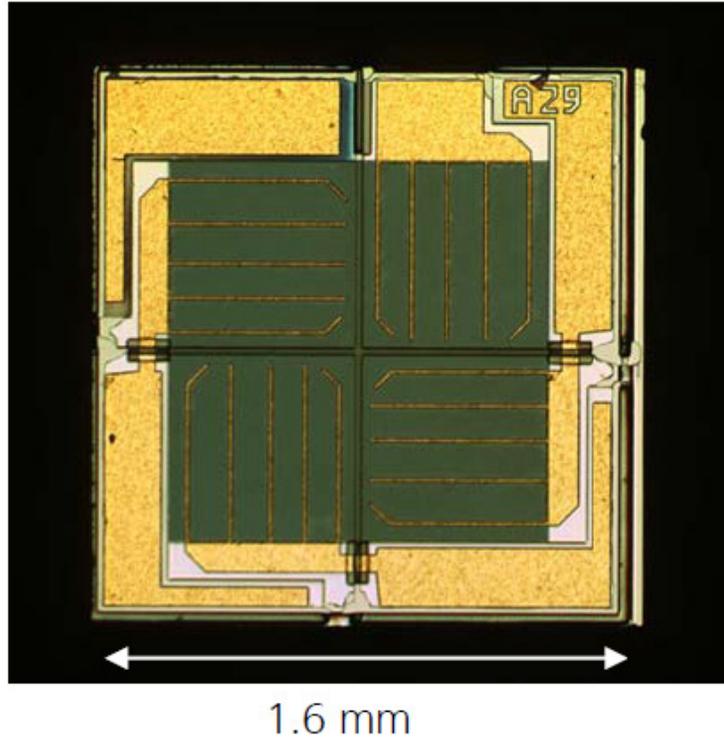


Figura 4.2.24. Vista superior de la fotocelda receptora utilizada

La figura 4.2.25 presenta una gráfica de la potencia de salida en función de la potencia de entrada, que muestra que con la potencia del láser se puede obtener mucho más de 50mW de potencia, potencia suficiente para la operación del robot.

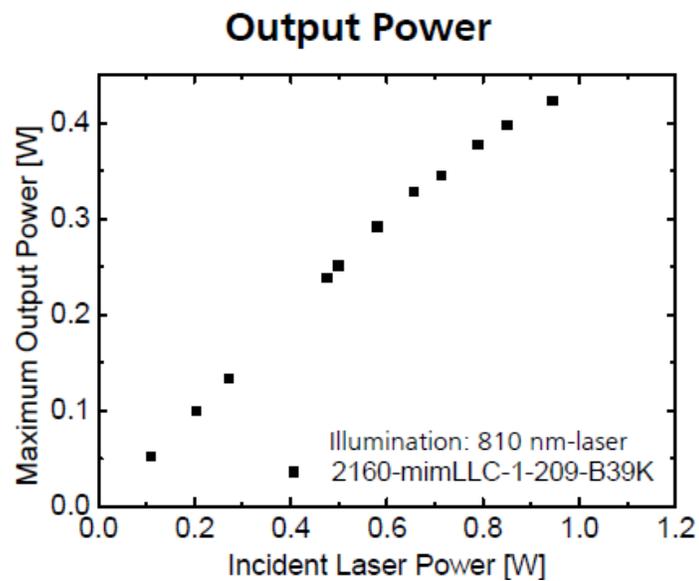


Figura 4.2.25. Potencia eléctrica de salida vs potencia óptica incidente

4.3 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

Investigadores: Marta Vílchez

Estudiantes: William Quirós Solano, Juan Andrés Alfaro Barrantes, Allan Granados Jiménez

Para el desplazamiento del minirobot se requiere un mecanismo de locomoción con al menos dos grados de libertad con un consumo de potencia menor o igual al obtenido en el diseño previamente existente, el cual estaba basado en actuación térmica.

4.3.1 Desarrollo del sistema de locomoción

El sistema de locomoción o caminata se desarrolló en etapas, a saber:

a) Descripción del módulo de caminata

Para esta sección se contaba como punto de partida los resultados del proyecto “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos : fase de sistemas microelectromecánicos”. Esto incluye la concepción del sistema de locomoción en bloques funcionales básicos que representan una estrategia de desarrollo del sistema, el diseño de las etapas para la construcción de una prueba de concepto, así como una estrategia de desarrollo del modelado por simulación numérica.

b) Construcción de una prueba de concepto

Los materiales adquiridos para el ensamble de una prueba de concepto vienen acompañados con hojas de datos que son poco precisas para los fines de esta investigación, motivo por el cual se realizó una caracterización experimental de los materiales, se seleccionó la prueba más adecuada para realizar las caracterizaciones y se construyó un resonador bimorfo para su posterior caracterización. Posteriormente se construyó un prototipo como prueba de concepto.

c) Modelado del sistema de locomoción

El modelado se realizó mediante simulación numérica con base en el método de Elementos Finitos desarrollado en el software COMSOL Multiphysics. El sistema de locomoción modelado cumple con los requerimientos originales del proyecto.

Una simulación numérica es una forma de visualizar el comportamiento de una estructura, es decir, permite visualizar el modelo adoptado para el sistema de locomoción. Con el modelado se obtiene la deflexión estática del resonador y la deflexión en resonancia, para evaluar la mejora en el paso del minirobot. Para esto fue necesario determinar las frecuencias resonantes y el tipo de flexión que se induce en el resonador, ya que no todas las flexiones son apropiadas para la caminata.

d) Optimización del resonador

Para mejorar el desempeño del sistema de locomoción se estudió el efecto del metal del que están constituidos los electrodos que conectan los piezoeléctricos. Se probó con aluminio (Al), cobre (Cu), plata (Ag) y oro (Au), estableciéndose que el mejor resultado se obtiene al considerar electrodos de Al.

Además se consideró analizar el número adecuado de capas piezoeléctricas, ya que muchas capas incrementan la inercia del movimiento y más capas no necesariamente llevan a una mayor fortaleza en el desplazamiento. La optimización permitió rediseñar la forma de la punta del resonador, para darle estabilidad al considerar los efectos de la fricción contra el piso en el desplazamiento dinámico.

e) Rediseño del sistema de locomoción al variar las condiciones de operación

Durante el desarrollo del proyecto, y debido a las dificultades en obtener los materiales necesarios para fabricar el minirobot, se hizo claro que no se alcanzarían en esta etapa las metas en cuanto a peso y dimensiones de los demás componentes del mismo. Esto llevó a un replanteamiento de las condiciones bajo las cuales se podía implementar un prototipo funcional del Spiderbot. Además la falta de equipo para ensamblar extremidades así como de proveedores de los materiales necesarios a escala de investigación, obligaron a buscar en el mercado piezoeléctricos de tamaño adecuado para el desarrollo de este prototipo.

Durante el primer semestre 2012 la casa alemana Physik Instrumente puso a la venta el piezoeléctrico cerámico con estructura de bimorfo PL112, que es el que más se aproxima a las condiciones de operación y dimensiones necesarias para un prototipo funcional del sistema de locomoción.

De nuevo fue necesario caracterizar el material y diseñar una estrategia de ensamble para las extremidades. Este paso no es sencillo porque con las extremidades anteriores, se ensamblan las extremidades primero y se colocan los otros elementos del minirobot de manera posterior; con las extremidades de cerámica esto no sería posible. Se llegó a la conclusión de que en este caso se instalarían los otros componentes sobre una capa de Kapton grueso de los que se utilizan en circuitos integrados y las extremidades serían adheridas como último paso del ensamble, lo que representa un cambio total en la estrategia de construcción del dispositivo.

Varios ensayos fueron necesarios hasta encontrar la forma adecuada de lograr el desplazamiento de la punta con rapidez del orden de centímetros por segundo, que representa una mejora considerable en los requerimientos de desplazamiento. Otro parámetro que se supera con creces es el del peso a acarrear con el dispositivo totalmente ensamblado. Todas las fotos que aparecen en este apartado fueron generadas en nuestros laboratorios. La figura 4.3.1 muestra el sistema de locomoción rediseñado.

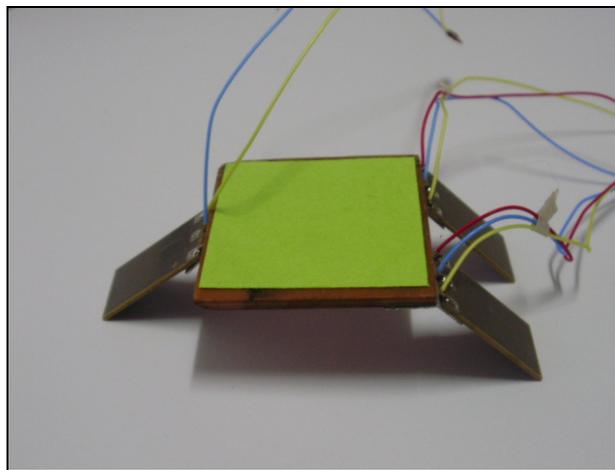


Figura 4.3.1. Sistema de locomoción para la escala de centímetros, del prototipo del minirobot

Este sistema se controla con frecuencias de resonancia que varían en el rango de 545.0 a 551.3 Hz. Debido al montaje es necesario caracterizar las frecuencias de resonancia para cada pata individualmente. El sistema consume alrededor de 3 mW al accionar solo una pata (movimiento hacia adelante) y 5,6 mW al accionar dos patas de manera simultánea (movimiento en reversa).

4.3.2 Descripción del módulo de caminata

De los resultados del proyecto de investigación “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos: fase de sistemas microelectromecánicos” quedó claro que algunas de las consideraciones importantes necesarias para el diseño son la potencia consumida, el desplazamiento del sistema y la velocidad de desplazamiento, además de consideraciones de peso y estructura de la plataforma que debe soportar para contener los demás componentes del minirobot.

Estas consideraciones llevan a la escogencia del modelo de fricción asimétrica como base para el módulo de caminata del minirobot Spiderbot. Este sistema fue desarrollado en la Universidad de Uppsala en el 2007, por E. Edqvist [9,10] para el proyecto I-SWARM (intelligent small-world autonomous robots for micro-manipulation) de la Comunidad Europea, la figura 4.3.2 muestra el dispositivo desarrollado por Edqvist.

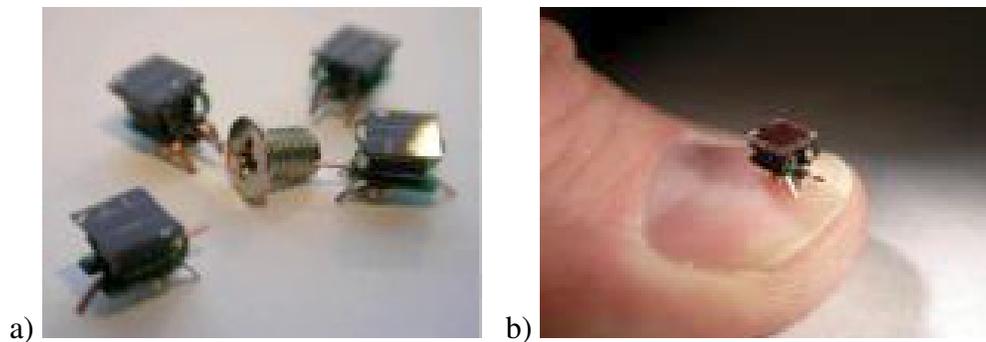


Figura 4.3.2. Imágenes de los Microrobot diseñados por Edqvist, donde se muestra el tamaño en comparación con dos objetos cotidianos. Las fotos aparecen en [9] y son reproducidas en el artículo con permiso de E. Edqvist.

La concepción del sistema de locomoción se diseña con tres bloques básicos, los cuales a su vez tienen asociados distintas características como se muestra en figura 4.3.3.

Para el desarrollo del sistema fue necesario considerar tres niveles, el primer nivel es el diseño del sistema de locomoción, en el cual se contempla el desempeño deseado, las características físicas necesarias para seleccionar los materiales, y el cumplimiento de los siguientes requerimientos: tensión de alimentación de 3 V o menor, capacidad de desplazarse a una velocidad de $50\mu\text{m/s}$ o superior con un tamaño de paso de $30\mu\text{m}$ o menor, soportar un peso de 40mg o superior.

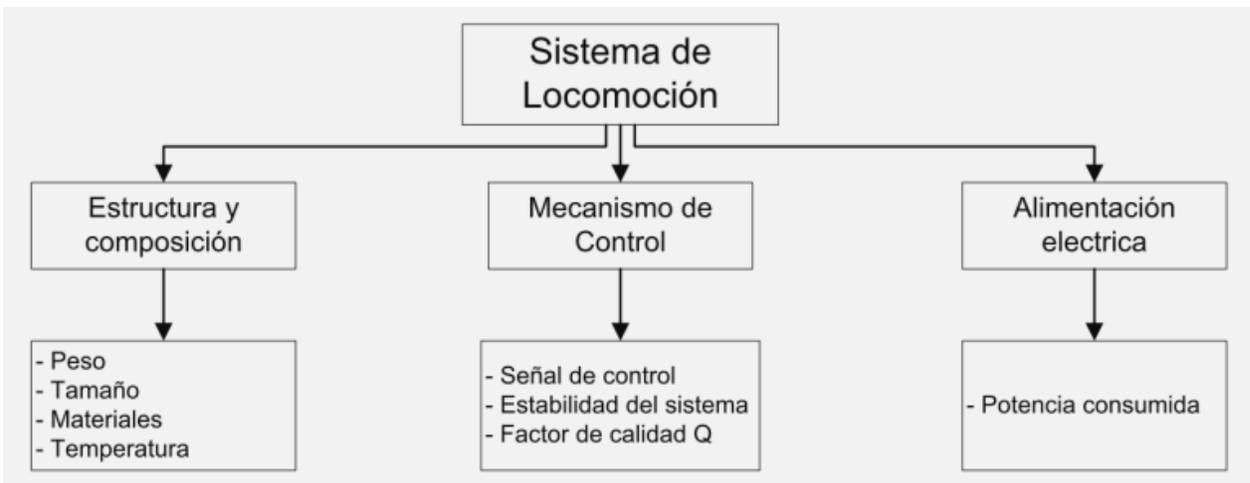


Figura 4.3.3. Diagrama de bloques de los elementos de diseño del minirobot

El segundo nivel es el modelado, en el cual se simulan los componentes electrónicos, mecánicos y estructurales, así como los materiales. Para esto se utiliza el software de simulación COMSOL Multiphysics mediante el método de elementos finitos.

El tercer nivel es la optimización en el cual se verifican las frecuencias resonantes y el factor de calidad Q; este último se utiliza para verificar el ancho de banda de cada frecuencia resonante. El factor de calidad debe tener un valor entre 20 y 40 para ser aceptable.

El sistema de locomoción propuesto se basa en un motor sin partes móviles, lo que asegura un menor desgaste por el uso y a su vez permite un menor consumo de potencia al trabajar bajo el régimen de resonancia. En los sistemas de locomoción para robots de escala micrométrica basados en fricción asimétrica se utilizan materiales piezoeléctricos.

Piezolectricidad significa “electricidad generada a presión” se encuentra naturalmente en muchos materiales monocristalinos, tales como el cuarzo y el topacio [11], sin embargo, estos materiales no son adecuados como actuadores para aplicaciones de control por vibración. En su lugar, materiales cerámicos policristalinos artificiales, como zirconato de titanato de plomo (PZT), puede ser procesado para mostrar propiedades piezoeléctricas significativas. Las cerámicas PZT son relativamente fáciles de producir, y muestran un fuerte acople entre los dominios mecánicos y eléctrico; también es posible encontrar piezoeléctricos poliméricos, como por ejemplo el poli(fluoruro de vinilideno) o PVDF. Al aplicar una diferencia de potencial sobre un material piezoeléctrico se presenta una tensión mecánica, provocando una deflexión del mismo, de esta forma es posible desarrollar un sistema de locomoción al crear una pequeña plataforma a la cual se le adhieren

“extremidades” formadas por varias capas de este material piezoeléctrico superpuestas; al aplicar una diferencia de tensión eléctrica de manera controlada se logra el movimiento de la punta de la extremidad.

Las extremidades se diseñan como cantilevers. Son componentes MEMS que pueden operar ya sea individualmente (sin el acompañamiento de otros componentes estructurales) o puede ser incorporado en configuraciones más complejas. Esencialmente, son diseñados para deformarse ya sea en flexión o torsión de acuerdo al eje sensitivo. La figura 4.3.4 muestra el flujo de fabricación general seguido en la construcción de estas extremidades.

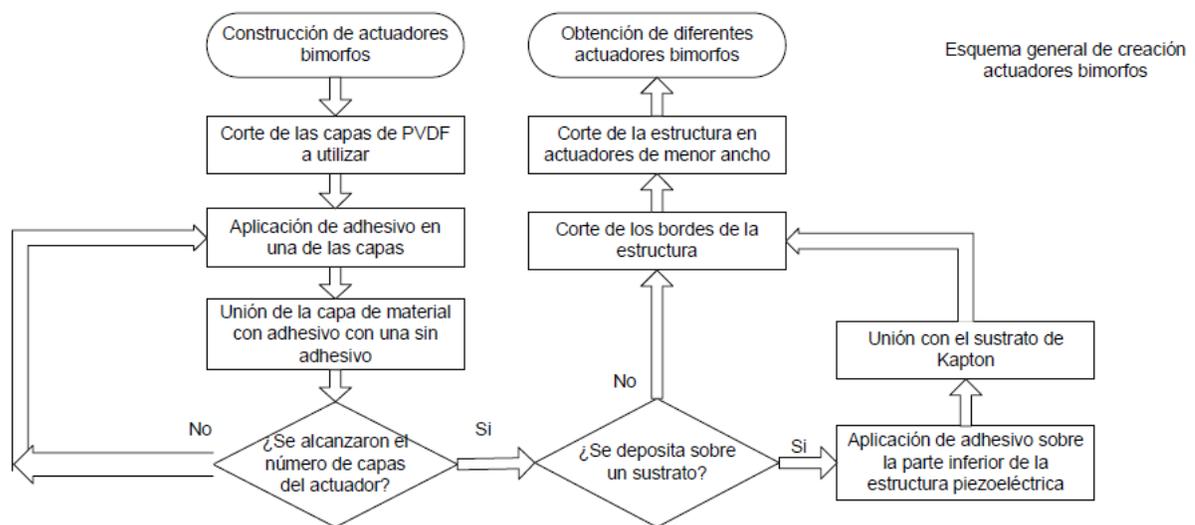


Figura 4.3.4. Flujo de construcción general de actuadores (resonadores) bimorfos.

El poli(fluoruro de vinilideno) o PVDF, es un polímero semicristalino comercialmente disponible como polvo, pellet o láminas semitransparentes (con rangos desde 8 a 110 μ m de espesor). PVDF tiene una temperatura de fusión de aproximadamente 170 $^{\circ}$ C en la cual se logra una viscosidad apropiada para procesos de fundición sin la ayuda de estabilizadores o aditivos al proceso [9]. El polímero también puede ser procesado en una solución debido a su solubilidad en solventes polares comunes (por ejemplo NMP y DMAc) [12].

Toda estructura posee una frecuencia de resonancia natural. Al sincronizar un estímulo externo con esta frecuencia natural, el movimiento de la estructura se ve amplificado varias veces. En los piezoeléctricos este estímulo es provisto por una señal eléctrica. En el video adjunto a la versión digital de este informe puede observarse el desplazamiento de la estructura fuera y dentro de la resonancia.

4.3.3 Prueba de concepto del Sistema de Locomoción

4.3.3.1 Caracterización de los materiales y construcción de un prototipo de resonador

Con base en los trabajos de Edqvist [9] y Snis [13] se procedió a construir un prototipo del sistema de resonancia con el que se construyeron las extremidades del minirobot.

Para la construcción de este prototipo de resonador se utilizaron diversos materiales. El material piezoeléctrico PVDF se adquiere en láminas, el proveedor es Measurement Specialties Inc., con número de parte 1-1003702-7. Este consiste en una lámina de polímero PVDF de dimensiones (20,3 x 28,0) cm y de 28 μm de espesor, la cual está metalizada con deposiciones de cobre y níquel de (19,0 x 26,7) mm sobre ambas caras. Las deposiciones metálicas son de 70 nm para cobre y de 100 nm para níquel. No se consiguió un suplidor de PVDF en pellets o en polvo para hacer los laminados con otras técnicas. El principal inconveniente para obtener el material en la forma adecuada es que los PVDF son utilizados para el desarrollo de sensores de presión y disparadores de armas por contacto, por lo que después del 11 Setiembre de 2001, son materiales de difícil exportación fuera de los Estados Unidos.

Como soporte se utiliza Kapton, un polímero muy utilizado en la industria electrónica como aislante eléctrico y térmico. El tipo utilizado en este caso es una hoja delgada (film) número de parte 800-461-4161, que tiene un espesor de 5 mils (125 μm) , fabricado por CS Hyde Company. Para unir los laminados se utilizó el adhesivo Reposicionable Easy-Tack 7020 de Krylon.

Las hojas de datos que acompañan al PVDF presentan las características del material en rangos amplios, en ocasiones del 50% del valor mínimo, por lo que el primer paso requerido es la caracterización del material para obtener valores confiables; para ello se siguen los siguientes pasos:

- Determinar el coeficiente de esfuerzo del material piezoeléctrico d_{31} , la permitividad y el módulo de elasticidad.

Por medio del circuito de medición de impedancia mostrado en la figura 4.3.5a) se determinó la respuesta eléctrica de una muestra de PVDF ante una excitación. Fue necesario aproximar su comportamiento con circuitos eléctricos simples con la modificación mostrada en la figura 4.3.5b), con lo que se encontraron los parámetros d_{31} , ϵ y Y_{E11} .

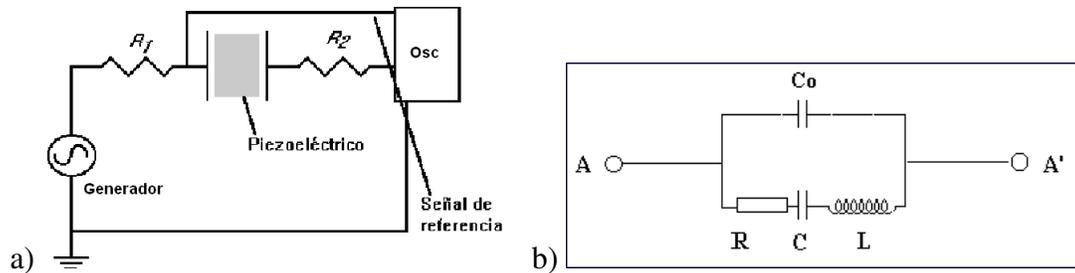


Figura 4.3.5: a) Sistema de medición de la impedancia del material piezoeléctrico, b) circuito equivalente para un piezoeléctrico cerca de la resonancia [14]

Se determinaron las constantes piezoeléctricas del material que se muestran en la Tabla 4.3.1.

Tabla 4.3.1. Constantes piezoeléctricas obtenidas de la impedancia del material Kapton laminado [14]

| Constante | Valor teórico | Valor experimental | Incertidumbre |
|------------|--|--|---|
| k_{31} | 0,12 | 0,1238 | 0.0008 |
| s_{11}^E | $2,5\text{-}5 \times 10^{-10} \text{ N/m}^2$ | $3,5 \times 10^{-10} \text{ N/m}^2$ | $0,1 \times 10^{-10} \text{ N/m}^2$ |
| Y_{11}^E | $2\text{-}4 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ | $2,9 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ | $0,1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ |
| d_{31} | $23 \times 10^{-12} \text{ (C/m}^2\text{)/(N/m}^2\text{)}$ | $23,8 \times 10^{-12} \text{ (C/m}^2\text{)/(N/m}^2\text{)}$ | $1 \text{ } 23 \times 10^{-12} \text{ (C/m}^2\text{)/(N/m}^2\text{)}$ |
| g_{31} | $216 \times 10^{-3} \text{ (m/m)/(V/m}^2\text{)}$ | $222 \times 10^{-3} \text{ (m/m)/(V/m}^2\text{)}$ | $16 \times 10^{-3} \text{ (m/m)/(V/m}^2\text{)}$ |

- Determinar el campo coercitivo y la polarización remanente a partir de la curva de histéresis ferroeléctrica del material piezoeléctrico.

Utilizando el circuito Sawyer-Tower mostrado en la Figura 4.3.6. Se encontró la curva de histéresis ferroeléctrica para una muestra de PVDF. Excitando eléctricamente al material se determinó su campo coercitivo y su polarización remanente. Además se determinó si existía saturación a diferentes valores de tensión eléctrica que no superaron los 22V pico-pico. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.2.

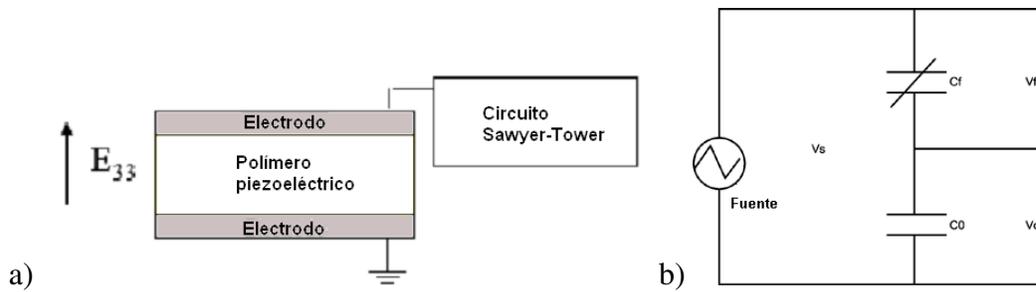


Figura 4.3.6: a) Esquema de medición de cargas desplazadas e integración de corriente eléctrica b) Circuito Sayer-Tower para la medición de histéresis ferroeléctrica[14].

Tabla 4.3.2. Valores de polarización remanente y campo coercitivo para diferentes tensiones de excitación

| Tensión | Polarización Remanente pC | Campo Coercitivo kV/m |
|------------|------------------------------|-----------------------|
| V = 3,04 V | (233,1 ± 30) | (7,286 ± 1) |
| V = 21,2 V | (10,0 ± 0,5) | (89,286 ± 10) |

- Determinar las frecuencias resonantes para las cuales los actuadores piezoeléctricos presentan una deflexión considerable en su posicionamiento y un factor de calidad en el rango de 20 a 40.

Para los diferentes actuadores se determinaron las frecuencias para el primer y segundo modo de resonancia y el rango de frecuencias para la cual la magnitud de su deflexión es considerable. Se encontraron los valores de factor de calidad para los dos primeros modos resonantes.

4.3.3.2 Desarrollar un prototipo de tres miembros de un sistema de locomoción utilizando el material piezoeléctrico.

La figura 4.3.7 muestra el esquema de construcción y de conexión eléctrica de un resonador bimorfo multicapa con piezoeléctrico PVDF.

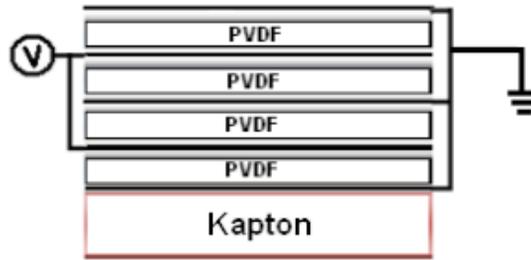


Figura 4.3.7: Esquema de excitación eléctrica del bimorfo multicapa vista desde su sección transversal.

Se construyó un prototipo de locomoción de tres miembros utilizando como substrato el material Kapton. Sobre las extremidades del sistema se colocaron actuadores piezoeléctricos creados a partir de PVDF, como se muestra en la figura 4.3.8.

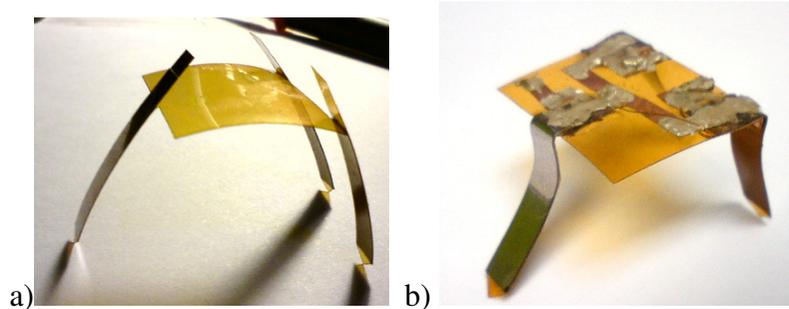


Figura 4.3.8.: a) Proceso de fijación del bimorfo a la estructura, b) estructura del módulo de caminata terminado [14]

En los archivos adicionales en la versión digital de este informe se pueden observar los diagramas de flujo de las diferentes maneras de ensamblar este prototipo, así como videos de los actuadores individuales en funcionamiento y la prueba de este prototipo en el laboratorio.

4.3.4 Modelado del sistema de locomoción

En esta actividad se utilizó simulación numérica con el Método de Elementos Finitos (FEM) para determinar la deflexión que experimenta el resonador bimorfo, estudiar la deflexión estática, las frecuencias resonantes del bimorfo, el modo de flexión y la amplitud esperada cuando el bimorfo se encuentra en operación.

4.3.4.1 Estudio de la flexión estática

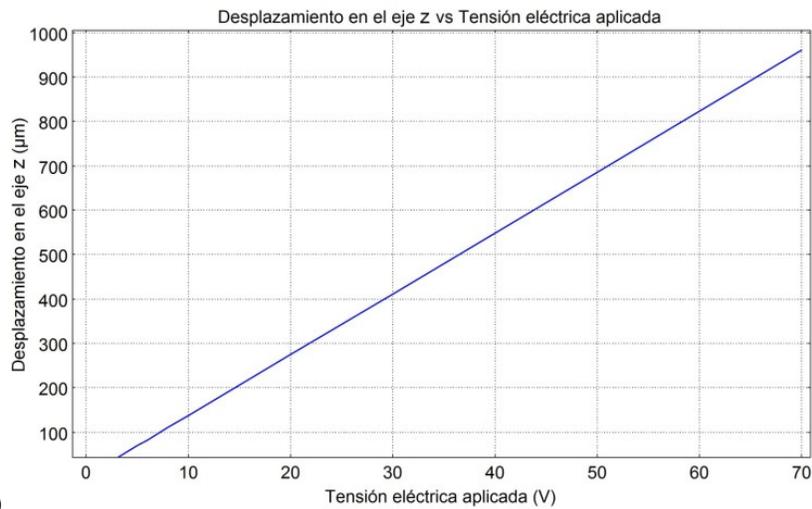
Como primer paso en el desarrollo del sistema de locomoción basado en fricción asimétrica, se procedió con la simulación de un actuador bimorfo simple, tomando este modelo simple como marco de referencia, concebido de dos capas de material

piezoeléctrico PVDF. Se inició el proceso de simulación haciendo un análisis en DC utilizando las tensiones de alimentación desde 2 V hasta 70 V, para determinar la deflexión estática del actuador. En la Figura 4.3.9 se observa la polaridad de la tensión eléctrica aplicada, además se puede observar la distribución de las capas.

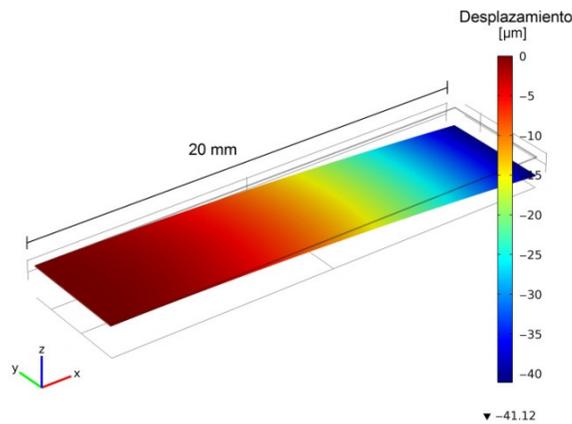


Figura 4.3.9: Polaridad establecida en el bimorfo simple

En la figura 4.3.10a) se observa el comportamiento lineal del material piezoeléctrico del actuador al aplicarle tensión eléctrica DC. Al aplicarle una mayor tensión eléctrica se obtiene una mayor deflexión. En este caso el desplazamiento obtenido a 3V DC es de 41,12 μm . Se muestra la deformación en figura 4.3.10b).



a)



b)

Figura 4.3.10: a) Gráfica de tensión eléctrica vs deflexión para el actuador bimorfo. b) Desplazamiento en el eje z obtenido al aplicar 3 V DC al actuador bimorfo simple.

Al actuador bimorfo simple se le colocó un sustrato de 20mm x 5mm x 50 μ m de Kapton® HN esto con el fin de darle un mayor soporte y rigidez al cantiléver. La figura 4.3.11 ilustra la polaridad en la que fue aplicada la tensión eléctrica, y la distribución de las capas.

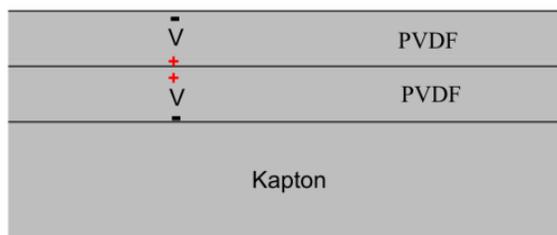


Figura 4.3.11: Polaridad establecida en el bimorfo simple con sustrato de Kapton

En la Tabla 4.3.3 se muestran los valores teóricos esperados para los cantiléver, así como los valores obtenidos en la simulación al estar sometidos a una tensión de 3 V DC. Para el caso de los actuadores que poseen sustrato de Kapton no fue posible calcular los valores teóricos ya que el fabricante no proporciona información sobre el cálculo del desplazamiento con capas de materiales que no sean PVDF.

Tabla 4.3.3. Valores Teóricos y Obtenidos en la Simulación para las Configuraciones del Actuador Piezoeléctrico

| Configuración | Desplazamiento Teórico (μ m) | Desplazamiento obtenido de la simulación (μ m) |
|---|-----------------------------------|---|
| Bimorfo simple | 38,67 | 41,12 |
| Bimorfo simple con sustrato de Kapton | — | 5,49 |
| Actuador multicapa | 9,66 | 10,31 |
| Actuador multicapa con sustrato de Kapton | — | 3,54 |

4.3.4.2 Determinación de las frecuencias resonantes y deflexión en resonancia

Debido a que se desea un desplazamiento mayor al logrado al solo aplicar tensión en corriente directa (CD), se procede a realizar el análisis en corriente alterna (CA), pero

aprovechando las características que experimentan los materiales al estar en su frecuencia natural o resonancia. Mediante la simulación utilizando el método de elementos finitos se procede a buscar estas frecuencias para las mismas configuraciones utilizadas en el análisis CD, para así luego poder comparar las diferencias al trabajar en CD y al trabajar utilizando las frecuencias de resonancia en CA.

Para cada una de las configuraciones se realizó primero un barrido en frecuencia desde 1 hasta 1000 Hz con el fin de ubicar aproximadamente el rango en que se encuentran las frecuencias resonantes. Luego utilizando el análisis de "eigenfrequency" de COMSOL es posible obtener el valor de frecuencia exacto en el cual la configuración está en resonancia. Para el desarrollo de este proyecto solo son de interés las dos primeras frecuencias naturales ya que son las que presentan desplazamientos mayores a 1 mm. Una vez ubicado el valor exacto de cada frecuencia de resonancia se hizo de nuevo un barrido más estrecho de frecuencia a cada uno de estos valores con el fin de calcular el factor de calidad Q. Todo el análisis se hizo utilizando la misma polaridad asignada en las configuraciones antes mostradas, con una tensión eléctrica de 3 V pico.

El barrido en frecuencia para el actuador bimorfo simple se ilustra en la figura 4.3.12; este barrido se hizo cada 1 Hz para evitar incongruencias de escala con los equipos que se utilizarán en el desarrollo real del prototipo, ya que estos no poseen una precisión mayor a 0,5 Hz, por lo que el valor exacto de cada una de sus frecuencias en resonancia y el desplazamiento logrado en esa frecuencias no se muestra en dicho gráfico. En la figura 4.3.12 solo se muestra una primera aproximación de donde se encuentran las frecuencias de resonancia.

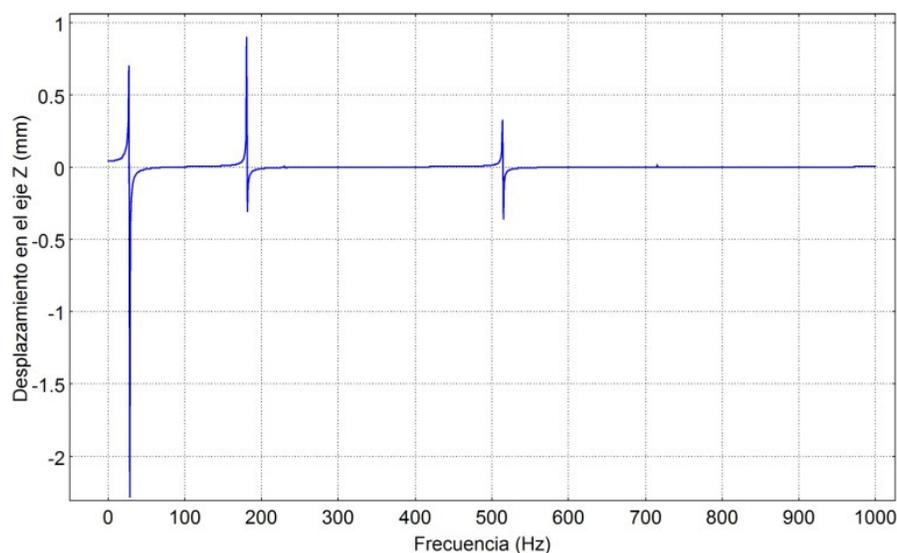


Figura 4.3.12. Desplazamiento en el eje Z vs frecuencia para el actuador bimorfo simple, primera aproximación

Por otro lado se puede observar que para cada frecuencia de resonancia existe una frecuencia de resonancia en la dirección opuesta, debido al efecto natural de un circuito resonante.

Usando el análisis de frecuencias propias de COMSOL se obtuvieron los valores exactos de resonancia así como su desplazamiento correspondiente. Para el actuador bimorfo simple se obtuvo el valor de la primera frecuencia de resonancia a los 28,769731 Hz con un desplazamiento de $\pm 5,270$ mm en la dirección z y con un factor de calidad de 22,308, por otro lado, alcanza su segunda frecuencia de resonancia a los 181,249294 Hz con un desplazamiento de $\pm 873,5$ μm en la dirección z, y un factor de calidad de 178,430, la figura 4.3.13 permite observar la forma de la deflexión de esta configuración trabajando en cada una de estas frecuencias de resonancia estudiadas.

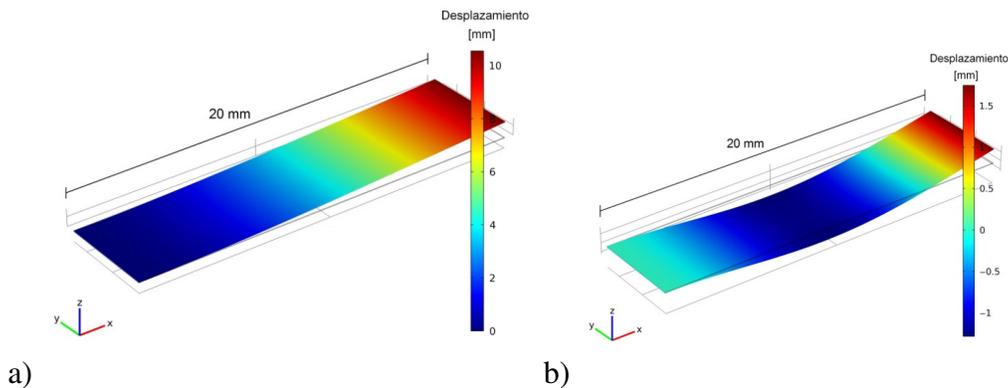


Figura 4.3.13: Comportamiento del actuador bimorfo simple al utilizar una tensión de 3 V pico con una frecuencia de a) 28,769731 Hz y b) 181,249294 Hz.

Al obtener valores relativamente altos de desplazamiento en comparación con su análisis en DC es necesario revisar si el material llega a su límite elástico. Para el PVDF el rango máximo de elasticidad es de 45 a 55 MPa. Mediante el análisis de estrés de von Mises se puede verificar que la estructura no esté sobre los valores antes mencionados. El análisis de von Mises para las dos primeras frecuencias resonantes permite determinar si la estructura se acerca o no a su punto de ruptura, este estudio se ilustra en la figura 4.3.14, se determinó que las estructuras se encuentran lejos de la zona de ruptura del material.

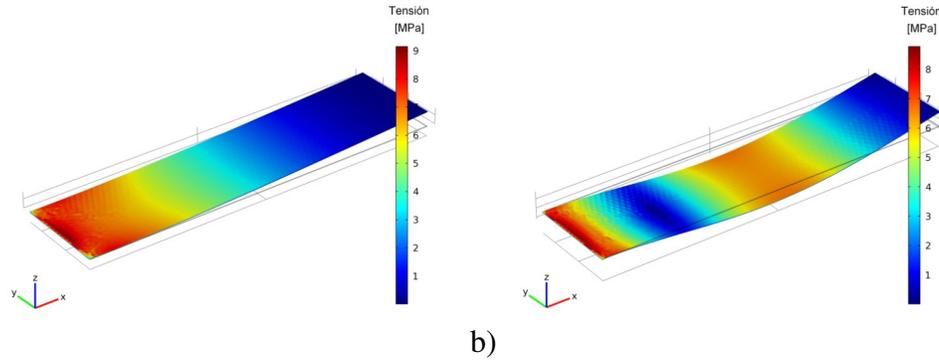


Figura 4.3.14: Resultado del análisis de estrés de von Mises para el bimorfo simple al utilizar una tensión de 3 V pico con una frecuencia de a) 28,769731 Hz y b) 181,249294 Hz.

Para la primera frecuencia de resonancia se obtiene un estrés máximo de 9,145 MPa y para el caso de la segunda frecuencia de resonancia se obtiene un valor máximo de 8,777 MPa, por lo que el material sí es capaz resistir estos desplazamientos, ya que estos valores obtenidos son inferiores a los que da el fabricante como valores máximos para el PVDF.

Se procedió con este análisis para las otras tres configuraciones. En la Tabla 4.3.4 se muestra un resumen de los valores obtenidos del análisis en frecuencia para los tres casos.

Tabla 4.3.4 Valores obtenidos del análisis en frecuencia para el actuador piezoeléctrico

| | Bimorfo simple | Bimorfo simple con sustrato de Kapton | Actuador multicapa | Actuador multicapa con sustrato de Kapton |
|--|-----------------------|--|---------------------------|--|
| Primera frecuencia de resonancia | | | | |
| Valor obtenido de la simulación (Hz) | 28,770 | 55,640 | 57,183 | 81,356 |
| Factor Q | 22,308 | 55,003 | 51,818 | 81,002 |
| Desplazamiento obtenido de la simulación (mm) | 10,540 | 11,480 | 10,050 | 10,550 |
| Valor máximo de Von mises alcanzado (MPa) | 9,145 | 18,310 | 17,850 | 25,840 |
| Segunda frecuencia de resonancia | | | | |

| | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Valor obtenido de la simulación (Hz) | 181,249 | 348,960 | 358,154 | 509,273 |
| Factor Q | 178,430 | 268,461 | 298,333 | 462,727 |
| Desplazamiento obtenido de la simulación (mm) | 1,747 | 1,896 | 1,664 | 1,746 |
| Valor máximo de Von mises alcanzado (MPa) | 8,777 | 17,370 | 16,830 | 24,500 |

Dado que los cantilévrs están operando en resonancia no se vieron afectados al incluir el sustrato de Kapton en términos de desplazamiento. Esto se debe a que el módulo de Young del Kapton es lo suficientemente elevado para poder seguir la deformación que sufre el material piezoeléctrico PVDF.

Los factores de calidad logrados en cada una de las configuraciones no se encuentran entre el rango de 20 a 40 por lo que no son aceptables. Las frecuencias de resonancia presentan un ancho de banda muy reducido, en muchos casos cercano o igual a la unidad.

4.3.4.3 Determinación del peso que soporta la estructura.

Al diseñar el sistema de locomoción no solo se debe considerar el desplazamiento logrado sino también el peso. Hasta el momento solo se habían simulado las extremidades por separado. Por eso, hacer una simulación del peso que debe soportar la estructura es relevante para evaluar la integridad de la junta entre la pata y la plataforma, el cual es el punto más vulnerable del sistema de locomoción.

La figura 4.3.15a) muestra el sistema de locomoción completo, formado por 3 cantilévrs que funcionan como extremidades, cada una compuesta por 4 capas de PVDF sobre un sustrato de Kapton. Cada una mide 20 mm de largo, 5 mm de ancho y tiene un espesor de 142,552 μm . Estas extremidades están adheridas a una plataforma formada por 3 capas de Kapton, con una dimensión de 24 mm de largo, 25 mm de ancho y 150 μm de grosor. Fue necesario utilizar 3 capas de Kapton para darle una estructura más robusta, ya que al hacer pruebas de peso en la simulación con solo una capa de Kapton el sistema no era capaz de mantenerse en pie. Sin embargo el modelo real solo utilizará una capa de Kapton y sobre esta estarán los sistemas de control y sensado, por lo que no es necesario utilizar las 3 capas de Kapton para no agregar peso extra al sistema. Las patas están adheridas a la plataforma únicamente por la capa de Kapton. En el caso del prototipo real todo el soporte hecho con Kapton

está unido sin cortes, tanto el soporte de las patas como la plataforma son una sola pieza. En la figura 4.3.15 b) se observa la unión de las patas con la plataforma.

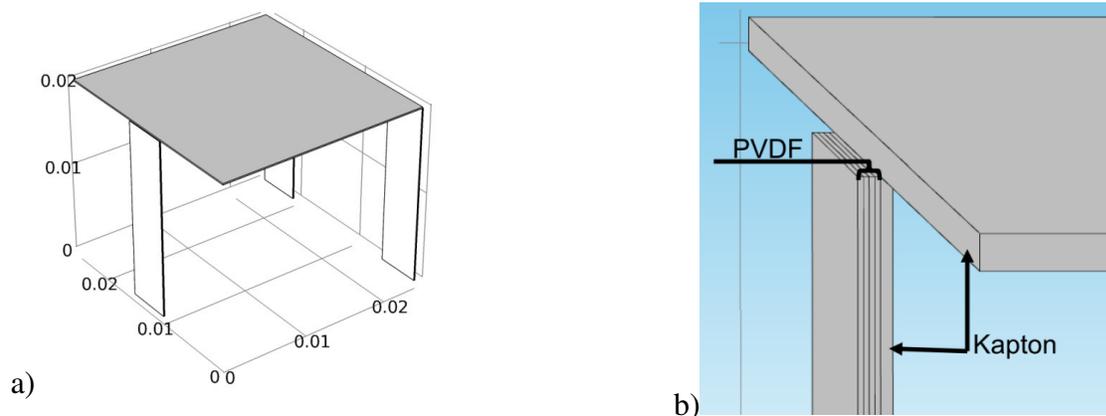


Figura 4.3.15: a) Diagrama de la geometría del sistema de locomoción para el minibot, escala en metros. b) Unión de la plataforma con una de las patas del prototipo.

La prueba del peso se realizó sin presencia de tensión eléctrica. Utilizando el módulo Solid Mechanics se logró hacer el análisis en dominio del tiempo; este análisis se hizo en un rango de tiempo de 0 a 1 s con un incremento de 0.2 s. Hay diferentes formas para simular el peso que debe ser capaz de soportar la estructura. Se puede ejercer una fuerza puntual, una fuerza en el borde, o una fuerza distribuida sobre la frontera que es el caso más realista. Se utilizó la fuerza distribuida porque el objetivo de la plataforma es dar soporte y trasladar todos los demás componentes. Al prototipo de la Figura 4.3.15 se le aplicó un peso distribuido de $399,34 \times 10^{-3}$ N sobre la plataforma a la cual están adheridas las patas, ya que el sistema tenía como requerimiento que debía soportar 40 mg de masa. En este caso se está utilizando 41 mg debido a que se utilizaron tres capas de Kapton en vez de una. La aceleración de 9.74 m/s^2 corresponde a la registrada en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, según la información proporcionada por el señor Vernon Rojas, encargado de los Laboratorios de Física.

En la Figura 4.3.16 se presenta la deformación que experimenta el prototipo al aplicarle la fuerza. Se observa en la Figura 4.3.16a) que el mayor desplazamiento es de 3,6 mm en el eje z, el cual es relevante pero tolerable,. El segundo desplazamiento más importante se da en el eje x, en la extremidad que está sola ubicada al frente, como muestra la Figura 4.3.16b). Esta presenta un desplazamiento de 1,746 mm en la dirección negativa del eje x, la cual podría darle inestabilidad al sistema. Las dos extremidades posteriores del sistema de locomoción presentan un desplazamiento de 1mm o menos en la dirección negativa del eje x.

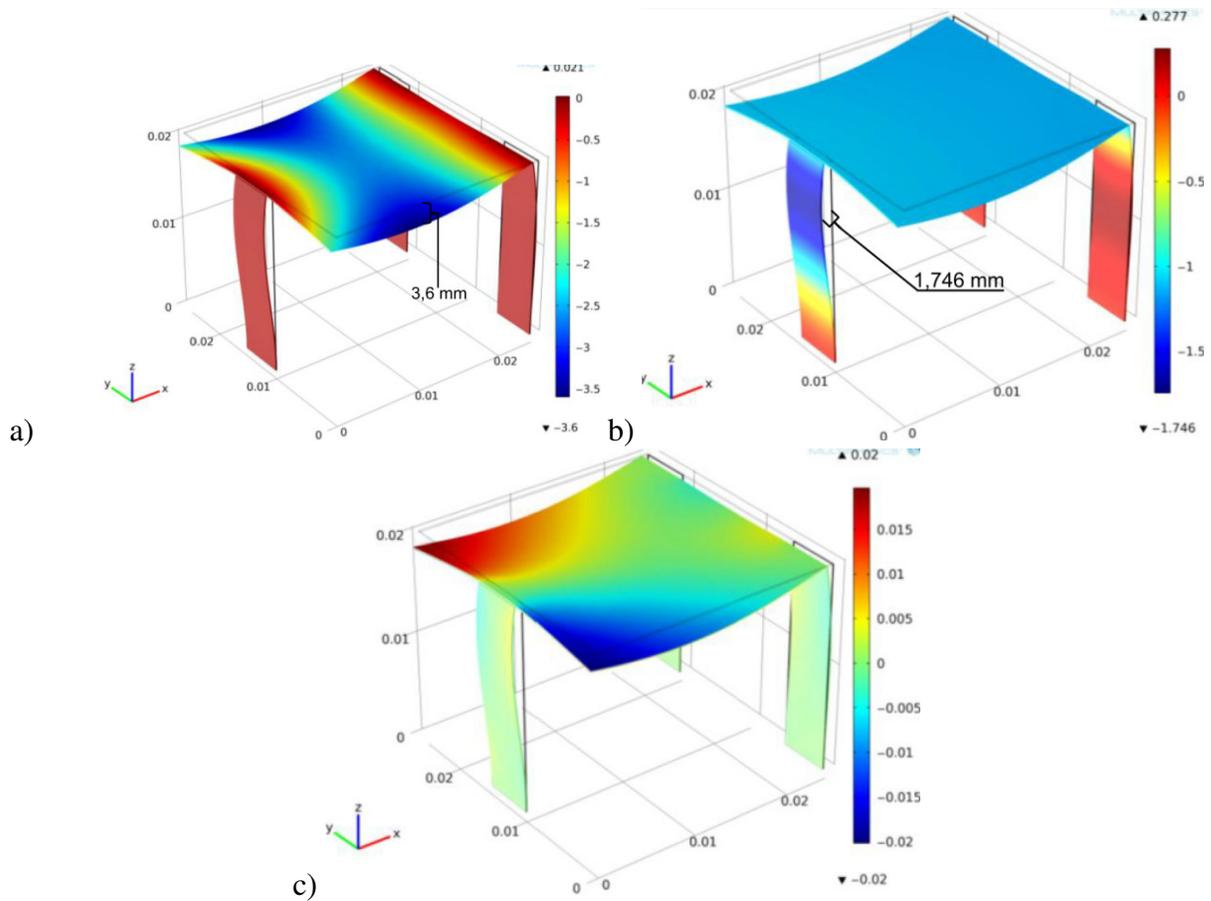


Figura 4.3.16: Deformación del prototipo (mm) al aplicarle una fuerza de $400,98 \times 10^{-3}$ N sobre la plataforma principal, en los ejes: a) eje z, b) eje x, c) eje y.

En la figura 4.3.17 puede observarse el resultado al hacer el análisis de estrés von Mises, el cual muestra que en general la estructura soporta la carga. El estrés es menor a 40 MPa. Sólo en las uniones de la plataforma con las patas se alcanzan valores de 117,4 MPa, que aún son aceptables ya que se encuentran por debajo de los 231 MPa que soporta el Kapton. Es decir, la estructura tiene la capacidad de soportar la masa de 41 mg. Además, las deformaciones y tensiones alcanzados no exceden los valores máximos por lo que la estructura se mantiene en pie.

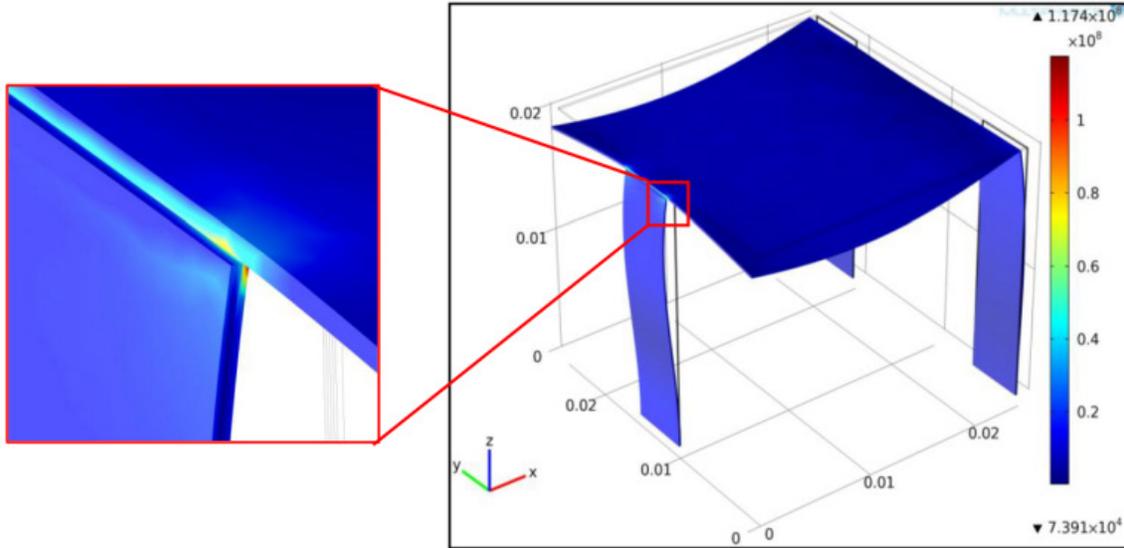


Figura 4.3.17: Solución obtenida al aplicarle un análisis de estrés von Mises, la escala está en Pa

4.3.5 Optimización del resonador

Como segundo paso en el diseño del módulo de caminata del robot también se siguió una secuencia de pasos para poder determinar el óptimo desempeño.

4.3.5.1 Simulación de una estructura bimorfa de tamaño real

Se implementó una estructura bimorfa de tamaño real que incluye las capas metálicas, 450 μm de largo y 100 μm de ancho que contiene una capa de Kapton como soporte estructural (50 μm de grosor), 2 capas de PVDF como material activo (10 μm de grosor) y 2 electrodos metálicos (0.1 μm de grosor) por cada capa de PVDF. Como se muestra en la figura 4.3.18. Es necesario mencionar que hasta donde tenemos conocimiento este es el primer diseño de simulación que incluye el grosor (aproximado) de las capas metálicas de los electrodos.

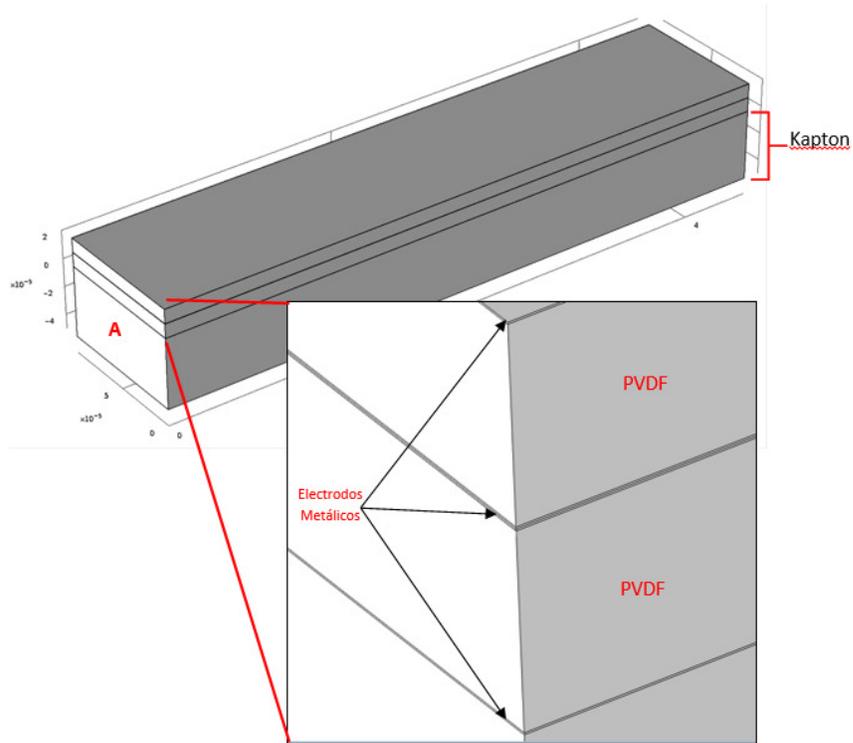


Figura 4.3.18: Geometría del modelo de tamaño real que incluye las capas metálicas

Se determinó el comportamiento del cantiléver en modo dinámico sujetando uno de los extremos (el extremo marcado con A en la Figura 4.3.18). Se utilizó en este análisis aluminio como material para los electrodos, aplicando una tensión eléctrica de 3V DC entre la parte superior e inferior de cada una de las capas de PVDF. La Tabla 4.3.5 muestra los resultados obtenidos al hacer el análisis en frecuencia propia o eigenfrecuencia.

Tabla 4.3.5. Frecuencias de resonancia obtenidas al aplicar el análisis de frecuencia

| Frecuencia de resonancia | Valor obtenido en la simulación (Hz) |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Primera | 83732 |
| Segunda | 113655 |
| Tercera | 422994 |

Según se observa en la Figura 4.3.19, la frecuencia seleccionada para el sistema de locomoción es la obtenida en el apartado a), debido a que presenta un comportamiento estable con respecto al eje z, que es lo deseado en el sistema de locomoción. Los demás modos de deflexión no son apropiados para una caminata estable del minirobot.

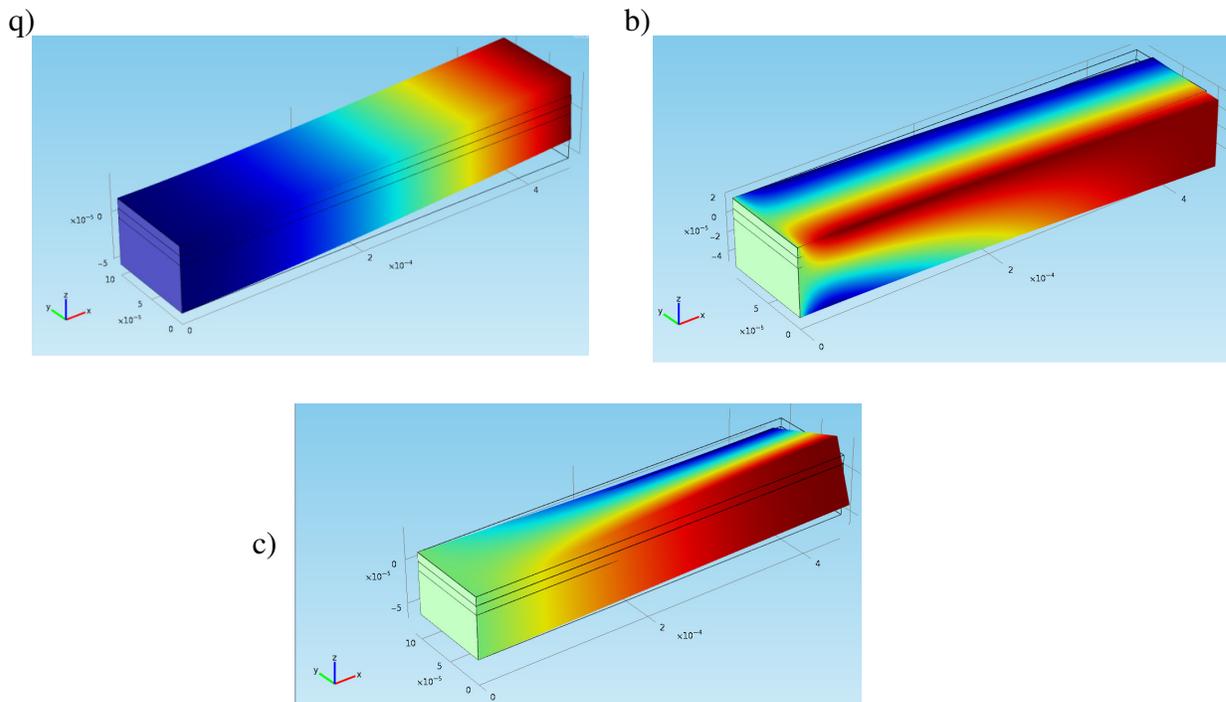


Figura 4.3.19: Comportamiento del cantiléver al estar en : a) primera, b) segunda, y c) tercera frecuencia de resonancia

Utilizando una onda cuadrada con 3 V de amplitud, ajustada al valor de la primera frecuencia de resonancia, se hizo un análisis en el tiempo en un rango de 0 a 1ms para determinar el desplazamiento del extremo libre en modo dinámico de la estructura bimorfa. En la figura 4.3.20 se puede observar el gráfico desplazamiento vs tiempo obtenido de la simulación, también se puede observar que el desplazamiento máximo no alcanza los 0.01 μm . Por otra parte se observa que a lo largo de la aplicación de la señal cuadrada, se da pequeños saltos (picos) que no son deseados ya que se busca un comportamiento lo más homogéneo y estable posible.

El resultado del análisis de von Mises y de la tensión sobre la estructura en modo dinámico se muestra en la Figura 4.3.21. Se puede observar que la estructura bimorfa está continuamente sometida a presión. Si esta condición permanece se podría generar calor a lo largo de la estructura y con ello el sistema colapsaría.

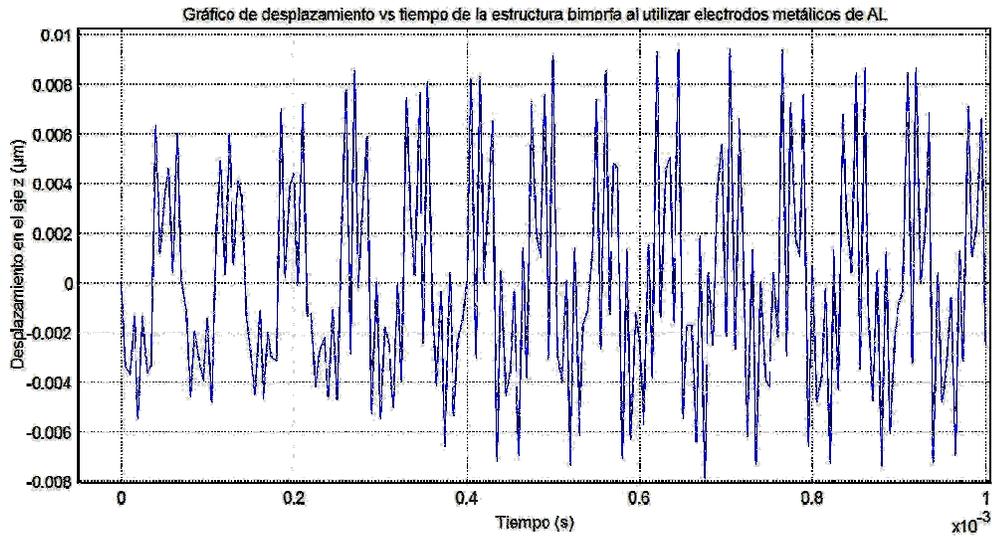


Figura 4.3.20: Gráfico de desplazamiento en el eje z obtenido al hacer la simulación.

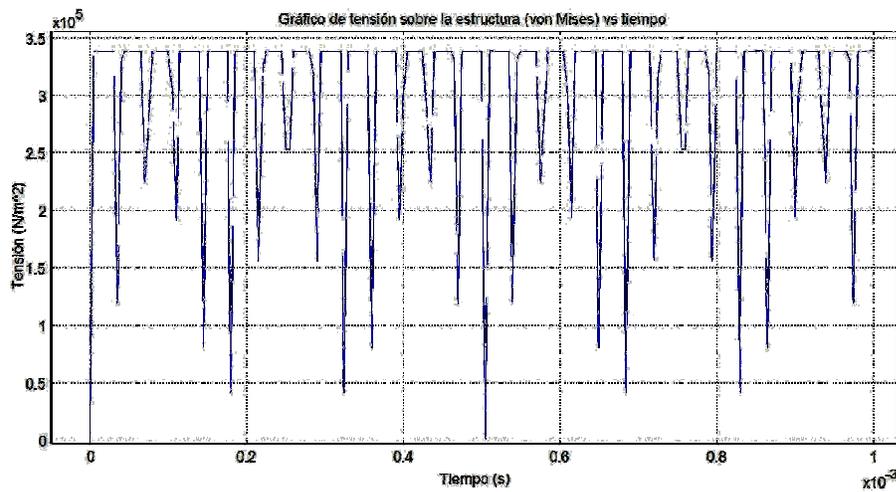


Figura 4.3.21: Variación del esfuerzo de von Mises obtenido al hacer variar el tiempo de desplazamiento en la simulación.

Se realizaron los mismos estudios de la frecuencia de resonancia, desplazamiento y tensión de la estructura bimorfa, pero utilizando diferentes electrodos metálicos. En la Tabla 4.3.6 se muestra una comparación al utilizar electrodos metálicos de Cu, Ag, y Au, incluyendo también el Al, puede observarse que el aluminio presenta mayor desplazamiento y menor tensión en la estructura. Esta comparación fue muy útil ya que se comprobó que para obtener un mayor desplazamiento es necesario recurrir a otras configuraciones más allá que solo cambiar los electrodos metálicos, los cuales se pensó a un inicio tenía una gran incidencia en el desempeño del movimiento.

Tabla 4.3.6. Comparación del comportamiento dinámico de la estructura para diferentes electrodos metálicos mediante la simulación

| Electrodo Metálico utilizado | Primera frecuencia de resonancia (Hz) | Desplazamiento máximo alcanzado en el eje z (μm) | Tensión máxima alcanzada por la estructura (N/m^2) |
|-------------------------------------|--|---|---|
| Aluminio (Al) | 87093,45084 | 0,0094 | 338600 |
| Cobre (Cu) | 86051,12969 | 0,0049 | 458320 |
| Plata (Ag) | 83732,72262 | 0,0069 | 373800 |
| Oro (Au) | 81739,43185 | 0,0054 | 347730 |

4.3.5.2 Estudio del desplazamiento dinámico de la estructura al considerar diferentes electrodos metálicos (Al, Cu, Ag, Au)

Se procedió entonces a estudiar el comportamiento de la estructura al utilizar 4, 6, 8, 10 y 12 capas de material activo PVDF, utilizando aluminio para los electrodos metálicos. Se hicieron los mismos estudios de frecuencia resonante, desplazamiento y tensión de la estructura para cada una de las configuraciones con distintas capas de PVDF. En la Tabla 4.3.7 se muestra el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 4.3.7. Comparación del comportamiento dinámico de la estructura al utilizar diferentes capas de material activo PVDF

| Número de capas activas utilizadas | Primera frecuencia de resonancia (Hz) | Desplazamiento máximo alcanzado en el eje z (μm) | Tensión máxima alcanzada por la estructura (N/m^2) |
|---|--|---|---|
| 4 | 105490,9 | 0,0052 | 332550 |
| 6 | 122337,0 | 0,0036 | 332800 |
| 8 | 124423,9 | 0,0029 | 333000 |
| 10 | 125953,2 | 0,0045 | 333200 |
| 12 | 127141,3 | 0,0024 | 484000 |

En la Tabla 4.3.7 se puede observar que al incrementar el número de capas activas de PVDF aumentan la frecuencia de resonancia y la tensión máxima de la estructura, y por otro lado disminuye el desplazamiento máximo alcanzado. Al obtener estos resultados fue necesario rediseñar el modelo e investigar más a fondo el comportamiento del sistema.

4.3.5.3. Determinación del efecto de una fuerza (following load) en la estructura

Como parte del proceso de rediseño se hizo una prueba más de desempeño, al agregarle el peso que debe ser capaz de soportar la estructura para acercarlo al modelo simulado aún más al modelo real. Se dividió el peso en tres, ya que son tres las patas que conforman el sistema de locomoción completo y se está haciendo los estudios para una sola de las extremidades para simplificar el modelo de simulación.

Dado que las dimensiones físicas de la estructura no han cambiado se mantiene su frecuencia de resonancia. En las figuras 4.3.22 y 4.3.23 se puede observar el desplazamiento y tensión que experimenta la estructura al someterse al peso equivalente con una masa de 13,334 mg.

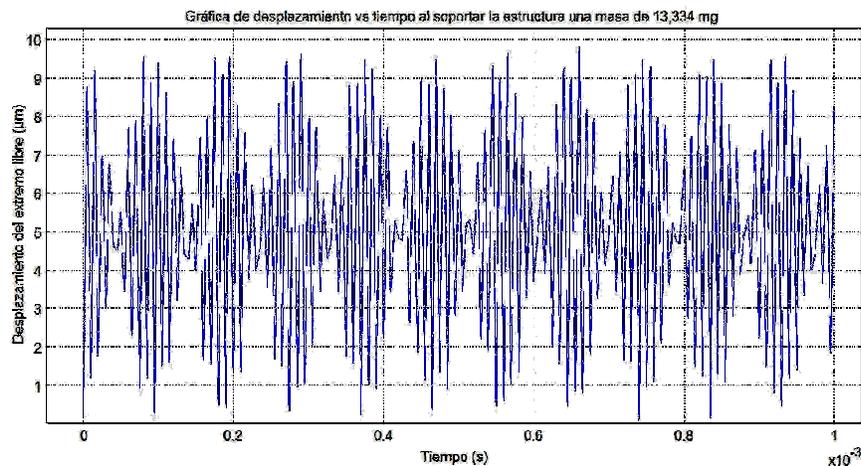


Figura 4.3.22: Desplazamiento del cantiléver bimorfo de 4 capas, al aplicarle una señal cuadrada con amplitud de 3 V pico en frecuencia de resonancia y bajo la acción de una masa de 13,33 mg.

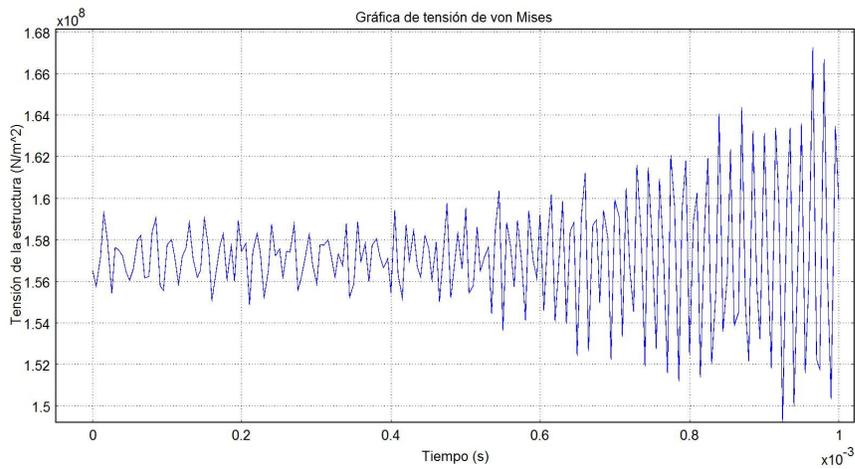


Figura 4.3.23: Comportamiento del bimorfo de 4 capas, al aplicarle una señal cuadrada con amplitud de 3 V en frecuencia de resonancia y bajo una carga de 13, 33 mg

En la estas dos últimas figuras se puede observar que al cargarle un peso al sistema se logra un mayor desplazamiento, pero se aumentó la tensión de la estructura. Por otro lado el desplazamiento aún no es homogéneo, el sistema se desplaza en pequeños saltos ascendentes y descendentes por lo que aún no es estable.

4.3.5.4 Efecto de la curvatura de la estructura como pata del Microrobot.

Se procedió a diseñar un modelo en el cual se contemplara la curvatura en la unión de la estructura con la plataforma del microrobot, esta estructura puede observarse en la Figura 4.3.24, donde el modelo utilizado posee 4 capas de material activo PVDF. La curvatura mostrada dió mayor grado de movimiento a la extremidad.

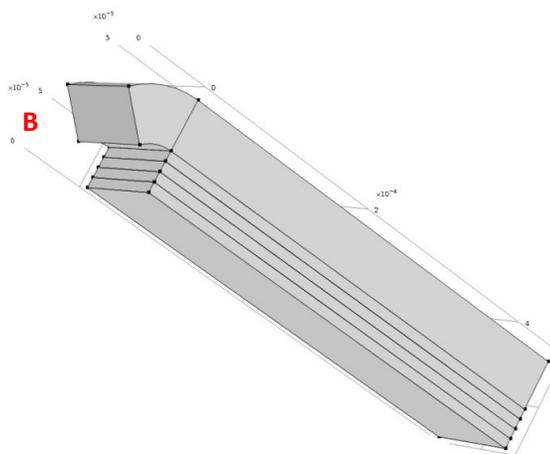


Figura 4.3.24: Modelo utilizado que contempla la curvatura en la unión de la plataforma

Se realizó una segunda mejora, la cual incluye una modificación a la punta, se le dio forma de flecha cortada, se realizó un corte de 45° en la capas de PVDF y metálicas para mejorar el desplazamiento de la punta de la extremidad en condiciones realistas de fricción; estas modificaciones pueden observarse en la figura 4.3.25. Esta fricción se introduce como una fuerza del tipo Following Load que actúa directamente sobre esta punta y representa la inercia al movimiento de desplazamiento entre superficies.

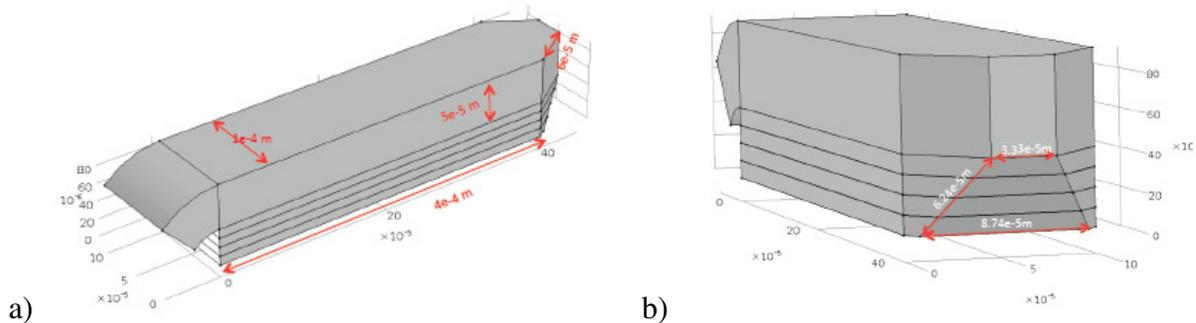
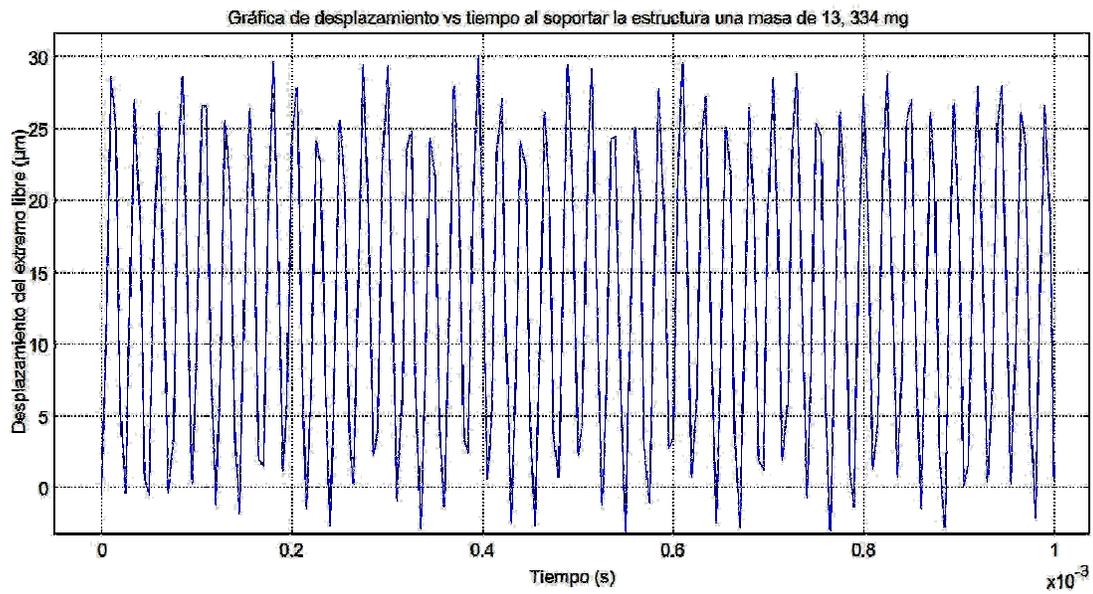


Figura 4.3.25: Modelo mejorado que contempla el perfilado de la punta de la pata para mejorar su desempeño en condiciones de fricción, se observan las dimensiones reales en vista a) de perfil, b) frontal.

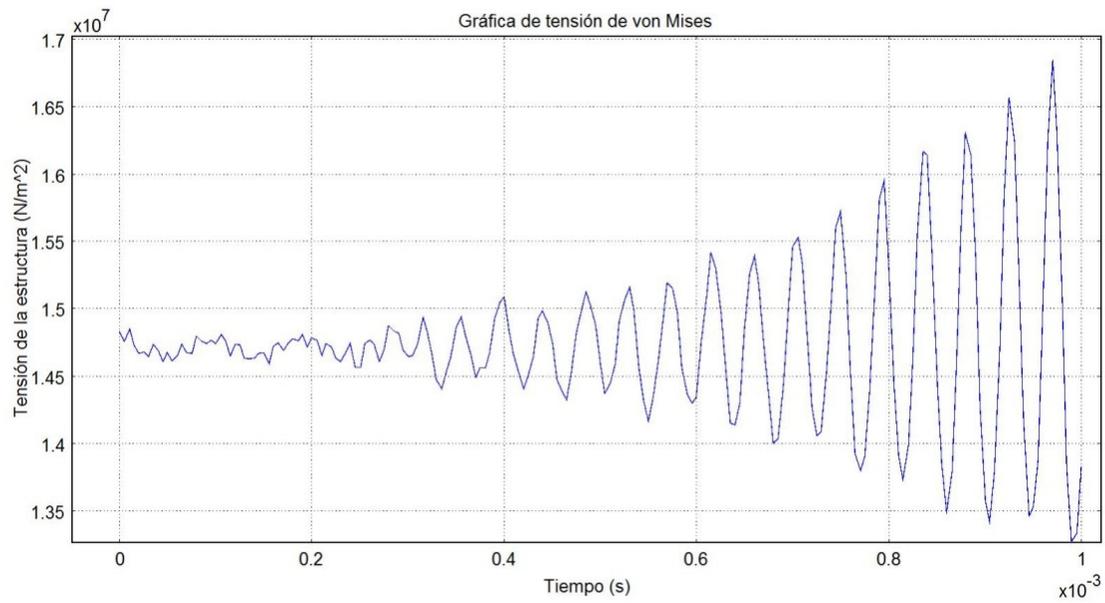
Al añadir la curvatura y sujetar la estructura en la frontera señalada con “B” de la Figura 4.3.24 se hicieron los análisis de frecuencia, desplazamiento y tensión de von Mises. En la figura 4.3.26 se muestran los resultados para los modelos sencillo (Figura 4.3.26.a y 4.3.26.b) y mejorado (Figura 4.3.26.c y 4.3.26.d).

En los resultados obtenidos que se muestran en las figuras 4.3.26.a y 4.3.26.c, se puede apreciar que el modelo mejorado presenta un mayor desplazamiento, el cual ronda los 140µm, esto representa un mejor desempeño al mismo nivel de tensión aplicada para controlar el microrobot. En las figuras 4.3.26.b y 4.3.26.d se puede observar que en términos de estrés mecánico el modelo mejorado presenta menos oscilaciones y además parte con tensión igual a cero, es decir la estructura es más estable, incluso según la figura 4.3.26.b tomando en cuenta la tendencia observada se podría intuir que el estrés mecánico va en aumento. Por otro lado es de esperarse de que al darse un mayor desplazamiento se genere una mayor tensión en la estructura, figura 4.3.26.d. Los gráficos mostrados llevan a la conclusión que la pata mejorada con ambos cambios tiene en general un mejor desempeño desde todo punto de vista, aún en la presencia de fricción en la superficie de desplazamiento.

a)



b)



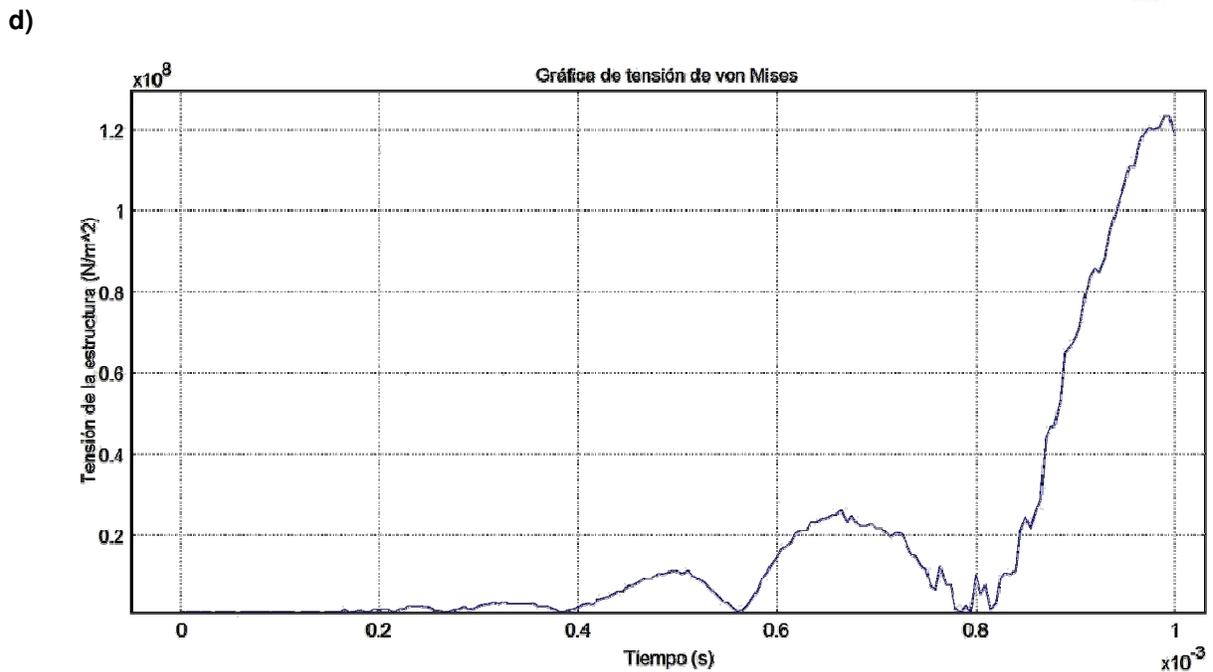
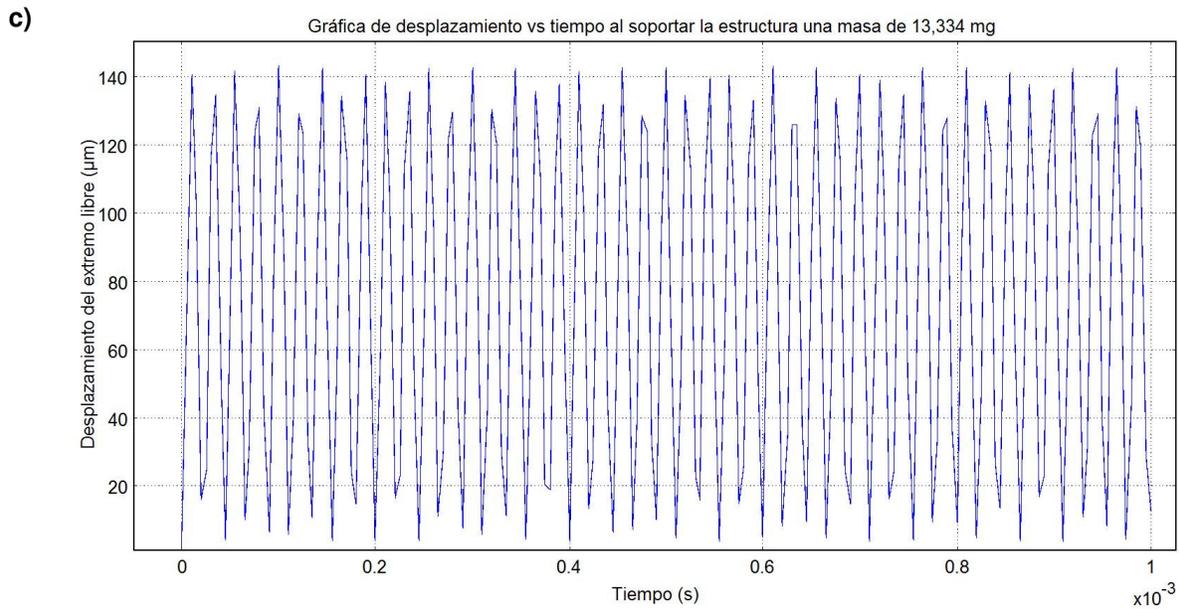


Figura 4.3.26: Comportamiento del cantiléver bimorfo de 4 capas con curvatura al aplicarle una señal cuadrada con amplitud de 3 V pico en frecuencia de resonancia y soportar una masa de 13, 33 mg, a) desplazamiento, b) tensión de la estructura, c) desplazamiento del modelo mejorado, d) tensión de la estructura del modelo mejorado.

En la Tabla 4.3.8 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de la simulación y se compara con el modelo de 4 capas sin curvatura.

Tabla 4.3.8. Comparación del comportamiento dinámico de la estructura al utilizar 4 capas de material activo PVDF en distintos modelos bajo la carga de una masa de 13,334 mg

| Modelo | Primera frecuencia de resonancia (Hz) | Desplazamiento máximo alcanzado en el eje z (μm) | Tensión máxima alcanzada por la estructura (N/m^2) |
|----------------------------------|--|---|---|
| 4 capas | 105607,8 | 9,809 | $167,27 \times 10^6$ |
| 4 capas con curvatura | 41978,8 | 30,000 | $16,84 \times 10^6$ |
| 4 capas con curvatura (mejorado) | 45180,2 | 143,340 | $123,45 \times 10^6$ |

En conclusión, al observar los resultados que se muestran tanto en la Tabla 4.3.8 como en la figura 4.3.26, el modelo que presenta el mejor desempeño es el que se logra al utilizar 4 capas de PVDF con curvatura y recortado (modelo mejorado), ya que se obtiene un mayor desplazamiento y una curva de tensión mecánica que parte desde cero en su estado de reposo y presenta menos oscilaciones.

4.3.6 Rediseño del sistema de locomoción del robot

El rediseño del sistema de locomoción llevó a la creación de un módulo de locomoción muy diferente del diseñado para trabajar en la escala de los milímetros y mostrado en los apartados anteriores. La implementación del sistema de locomoción abarcó un proceso de cerca de seis meses durante los cuales se realizaron muchas pruebas y ensayos de la posible configuración del elemento de locomoción y el cuerpo del robot para obtener un prototipo. En esta sección se presentan y describen los ensayos con los resultados más significativos y determinantes en el camino hacia la obtención del sistema de locomoción funcional.

4.3.6.1 Características del sistema de locomoción

El sistema de locomoción implementado se muestra en la imagen de la Figura 4.3.27. Como se observa, el cuerpo del robot comprende la base del circuito de control sustentado en los actuadores piezoeléctricos que funcionan como los elementos de locomoción. En la figura, f_1 , f_2 y f_3 denotan la frecuencia de resonancia de cada elemento de locomoción.

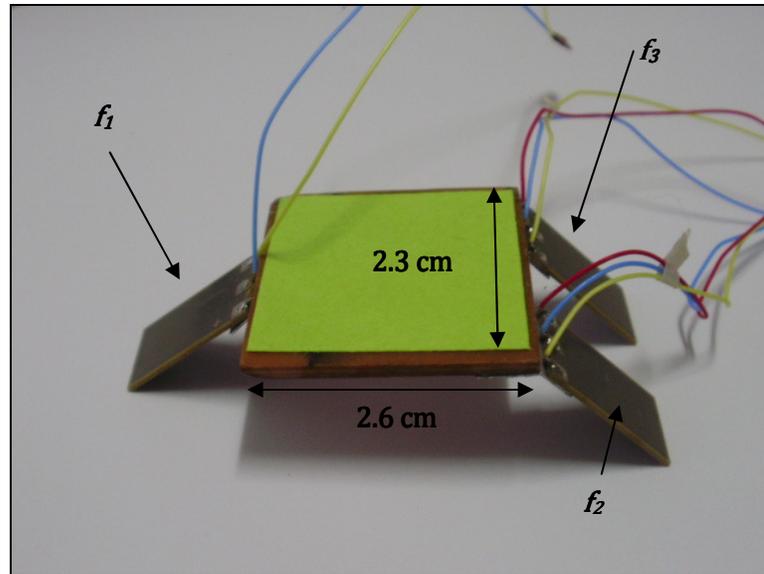


Figura 4.3.27: Imagen del sistema de locomoción del robot Spiderbot

El material de los elementos de locomoción es un material piezoeléctrico cerámico con estructura de bimorfo correspondientes a la serie PL112 del fabricante Physik Instrumente (PI) [15]. Tal y como se observa en la figura 4.3.28, el material utilizado tiene dimensiones de 17.8x9.6 mm y un grosor de 0.65 mm. Además consta de tres terminales de conexión que permiten brindar la señal de excitación al actuador en un rango de tensión de 0 a 60 V.

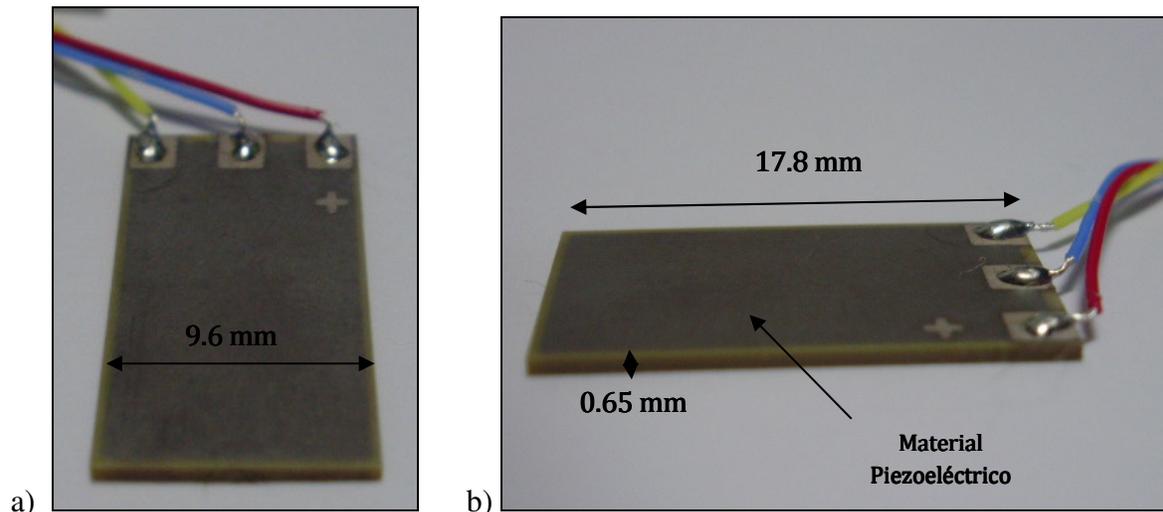


Figura 4.3.28: Imagen de las cerámicas piezoeléctricas proporcionadas por la empresa Physik Instrumente utilizadas en el módulo de locomoción del Spiderbot

Según la hoja de datos del fabricante del actuador piezoeléctrico, el circuito de alimentación para operación del dispositivo corresponde al diagrama de la figura 4.3.29.

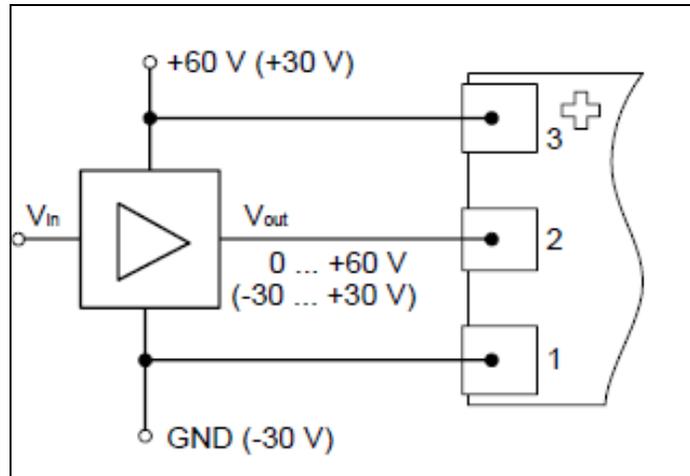


Figura 4.3.29: Diagrama de conexión de los actuadores piezoeléctricos según el fabricante

De acuerdo con las especificaciones del fabricante en cuanto a la conexión de los actuadores, se realizaron dos barridos de frecuencia. El primer barrido corresponde a un rango de 0-6 kHz con variaciones de 1 kHz y el segundo de 0- 1.5 kHz con variaciones de 100 Hz. Esto se realizó con el fin de ubicar el rango en el que se encuentran las frecuencias de resonancia y anti resonancia, para así adecuar la frecuencia de operación del actuador a la aplicación específica. Debido a que el actuador no se alimenta a la tensión diferencial nominal especificada por el fabricante (60 V), la frecuencia de resonancia no coincide con los datos del fabricante, siendo necesario determinar el modo de resonancia adecuado para generar el movimiento deseado en el actuador como fuente de tracción del robot con una tensión de alimentación de 3.3 V y una señal con la misma amplitud. Cabe resaltar que esta caracterización de las frecuencias de resonancia se realizó para cada uno de los prototipos obtenidos en cada ensayo para la obtención del sistema final descritos en la siguiente sección. Sin embargo, se presentan a continuación sólo los resultados para el prototipo final con mejor comportamiento.

Realizados los barridos en el prototipo final de la figura 4.3.1, se limita el rango de frecuencias de operación entre 500-600 Hz, donde se observó el máximo movimiento de resonancia del actuador de acuerdo con la vibración observable de cada actuador sobre una superficie rígida, de tal forma que la vibración fuese capaz de desplazar al actuador y la carga en el plano a lo largo de la superficie. Dentro de este rango, se determinó que la frecuencia que mostraba mayor resonancia con vibración corresponde a $f_1=545.0$ Hz para el elemento de locomoción frontal, $f_2=550.10$ Hz para

la pata inferior derecho y $f_3=551.30$ Hz para la pata inferior izquierda. En la Tabla 4.3.9 se muestra resumen estas frecuencias de resonancia para los elementos de locomoción del sistema.

Tabla 4.3.9. Frecuencias de resonancia para los elementos de locomoción del sistema final de la figura 4.3.1

| Elementos de locomoción | Frecuencia de resonancia (Hz) |
|-------------------------|-------------------------------|
| Elemento 1 (f_1) | 545.0 |
| Elemento 2 (f_2) | 550.1 |
| Elemento 3 (f_3) | 551.3 |

Por lo tanto la caracterización de los actuadores de acuerdo con la aplicación requerida proporciona los parámetros de operación del sistema de locomoción, correspondiente a una alimentación de 3.3 V y tres señales con las frecuencias antes mencionadas respectivamente para cada actuador. Por tanto, en la figura 4.3.30 se observa el diagrama de conexión de los actuadores utilizados para locomoción con los parámetros de operación determinados.

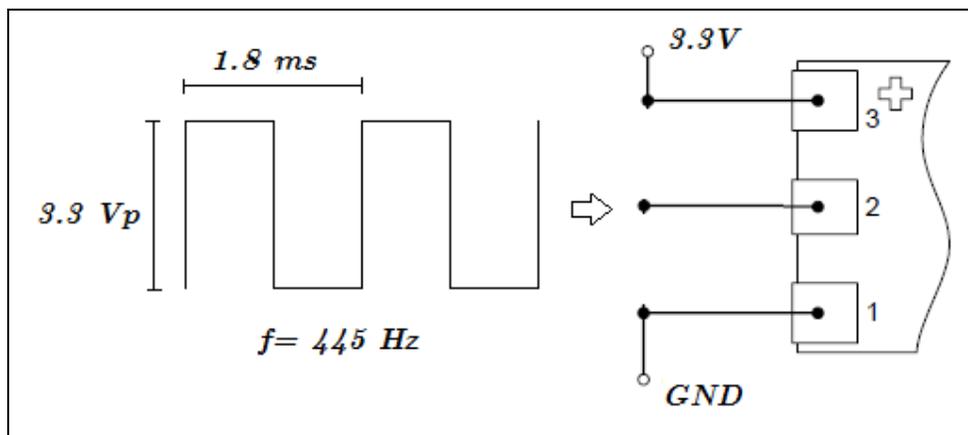


Figura 4.3.30: Diagrama de conexión experimental de los actuadores piezoeléctricos.

4.3.6.2 Ensayos realizados para la obtención del sistema de locomoción

Como se mencionó, para obtener un prototipo final se realizaron varios ensayos de la posible configuración de los elementos de locomoción y el cuerpo del robot. En seguida se describen los ensayos que permitieron hacer conclusiones importantes que llevaron a obtener el prototipo funcional de la figura 4.3.1.

El montaje de los prototipos se realizó en un inicio sobre un sustrato de Kapton de la forma deseada para el cuerpo del robot, el cual previamente se cortó con bisturí. Después se procedió a la limpieza de la estructura de Kapton con acetona con el fin de eliminar las impurezas en la superficie introducidas en el tratamiento previo durante el corte. Una vez que se contaba con el sustrato o cuerpo del robot a base de Kapton libre de impurezas, se procedió a adherir el elemento de actuación piezoeléctrico a éste. De igual forma, al elemento de locomoción se le quitaron previamente las impurezas para garantizar la máxima adherencia con el sustrato o cuerpo del robot. En la Figura 4.3.31 se muestra el diagrama de flujo que resume el procedimiento seguido para el montaje del prototipo en este primer ensayo.



Figura 4.3.31. Diagrama de flujo del procedimiento de montaje del prototipo para el ensayo con una pata y cuerpo de Kapton.

El prototipo obtenido después de seguir el procedimiento de la Figura 4.3.31 se observa en la Figura 4.3.32. Con este prototipo se procedió seguidamente a investigar si era posible dar tracción al cuerpo del robot construido en Kapton a través del actuador piezoeléctrico.

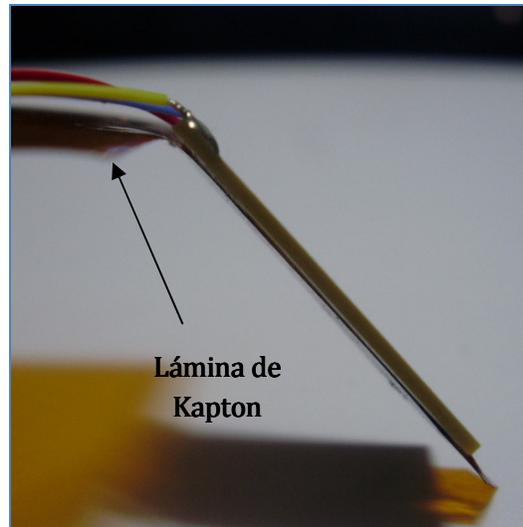


Figura 4.3.32. Configuración de la estructura del robot para el ensayo con una pata y Kapton.

Sin embargo, con esta configuración no se consiguió un resultado cercano a lo esperado, ya que el desplazamiento del cuerpo del robot cuando se suministró alimentación a la extremidad no fue el máximo esperado.

Basado en las observaciones de los resultados obtenidos con la configuración antes descrita, se procedió a dar una mayor rigidez a la base de los miembros en Kapton donde se sustentan los actuadores piezoeléctricos de cerámica. Para esto se adhirió al miembro una capa de lámina de cobre de 100 μm de grosor, de manera que el miembro tuviera una rigidez adecuada y evitar la absorción de las vibraciones en el cuerpo de kapton. En la Figura 4.3.33 se observa el procedimiento de montaje del prototipo para este ensayo. En la Ffigura 4.3.34 se observa entonces el prototipo obtenido al seguir este procedimiento.

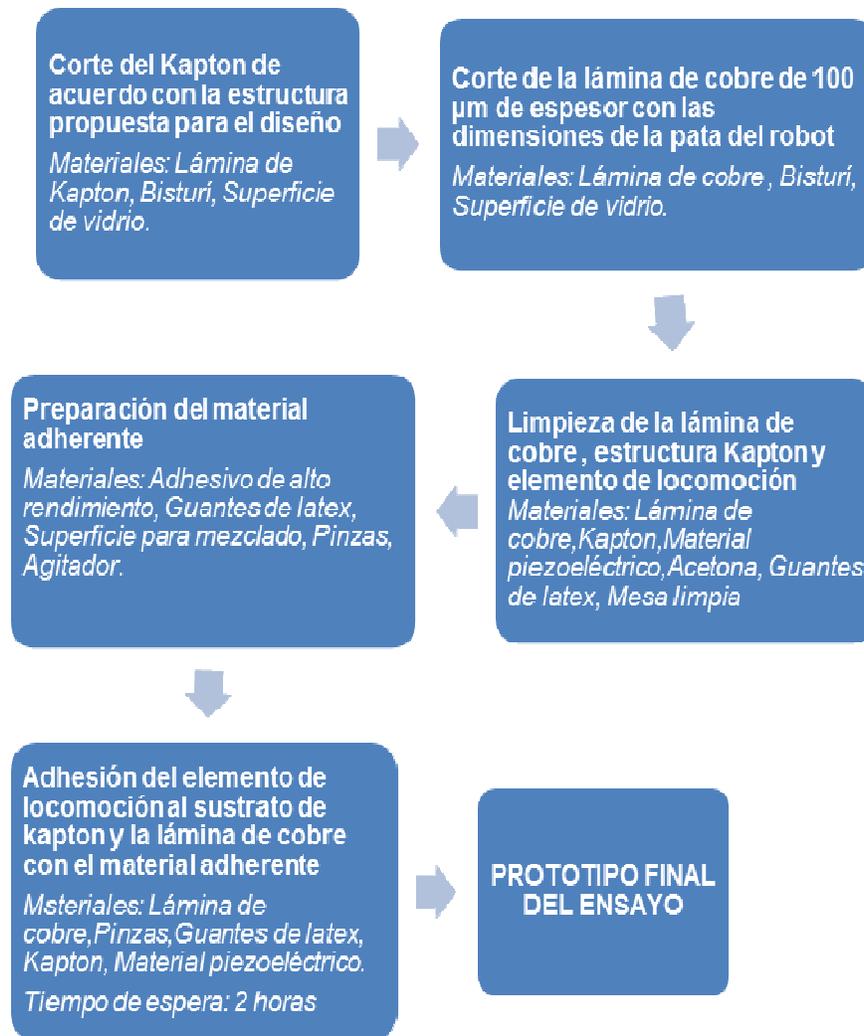


Figura 4.3.33: Diagrama de flujo del procedimiento de montaje del prototipo para el ensayo con una pata, Kapton y lámina de cobre

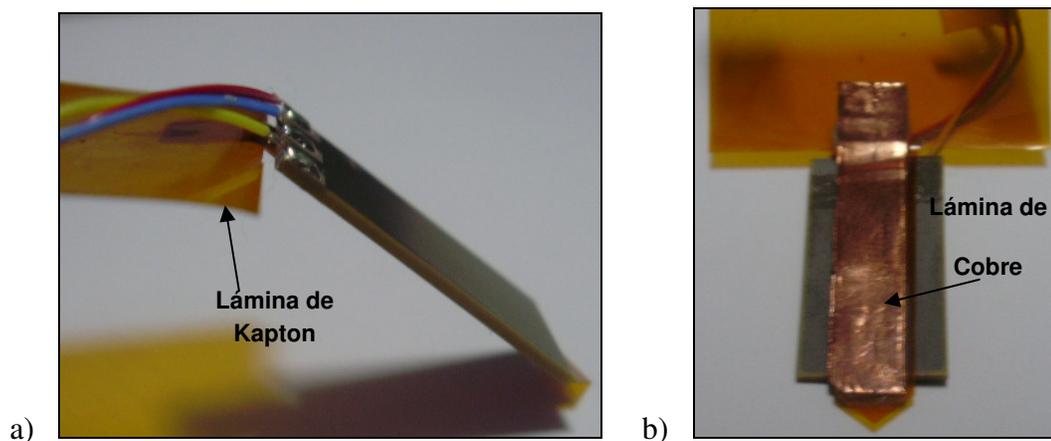


Figura 4.3.34: Configuración de la estructura del robot para el ensayo con una pata, Kapton y lámina de cobre.

Para esta configuración se observó una leve mejora en la tracción del cuerpo, pero no aún la esperada para poder desplazarlo. Además, con base en las observaciones también fue posible notar que la estructura del cuerpo del robot a base de Kapton experimentaba vibraciones considerablemente visibles, por lo que fue posible concluir que el cuerpo de Kapton estaba absorbiendo y amortiguando el movimiento de los actuadores piezoeléctricos. Por lo tanto como siguiente ensayo se procedió a sustituir el sustrato por una estructura rígida (placa para circuito impreso) de las mismas dimensiones y además se adicionó a la estructura epoxy y pequeños segmentos de lámina de cobre justo en la articulación de la pata, ya que se observó que en ese punto la estructura cedía con el peso. En la Figura 4.3.35 se observa el procedimiento seguido para obtener un prototipo con las características antes descritas y en la Figura 4.3.36 se observa una imagen del prototipo obtenido.

Con esta configuración se consiguió un mejor desplazamiento (1 mm/s) y comportamiento del sistema ya que la vibración se presentaba principalmente en los actuadores, lo que permitió dar más tracción a la pata. A pesar de la mejora, también se observó que ahora la vibración se concentraba en el miembro, de manera que la unión entre el Kapton de éste y el piezoeléctrico cedía. Otra observación obtenida en este ensayo fue que la forma en punta del miembro en Kapton también cedía y amortiguaba el contacto de la pata con la superficie disminuyendo el desplazamiento total del dispositivo.

Por esta razón se procedió a eliminar el Kapton de la pata para dejar en total contacto el piezoeléctrico con la superficie sobre la que se supone se va desplazar el robot, con lo cual se observó una mejora muy significativa en el desplazamiento y tracción de la pata. Y para resolver la problemática de la unión entre el actuador y el cuerpo, se procedió a sustituir la junta de Kapton, el cobre y el epoxy que se tenía, por una estructura de tipo bisagra a base de una placa de aluminio de 0.5 mm de espesor, la cual da mayor rigidez a la junta del actuador con el cuerpo del robot, que ahora es a base de placa de circuito impreso, sobre la cual se desarrolla posteriormente el circuito de control y comunicación del robot. En la figura 4.3.37 se observa también el procedimiento de ensamble de este prototipo esta configuración. En la figura 4.3.38 se observa la imagen del prototipo obtenido.

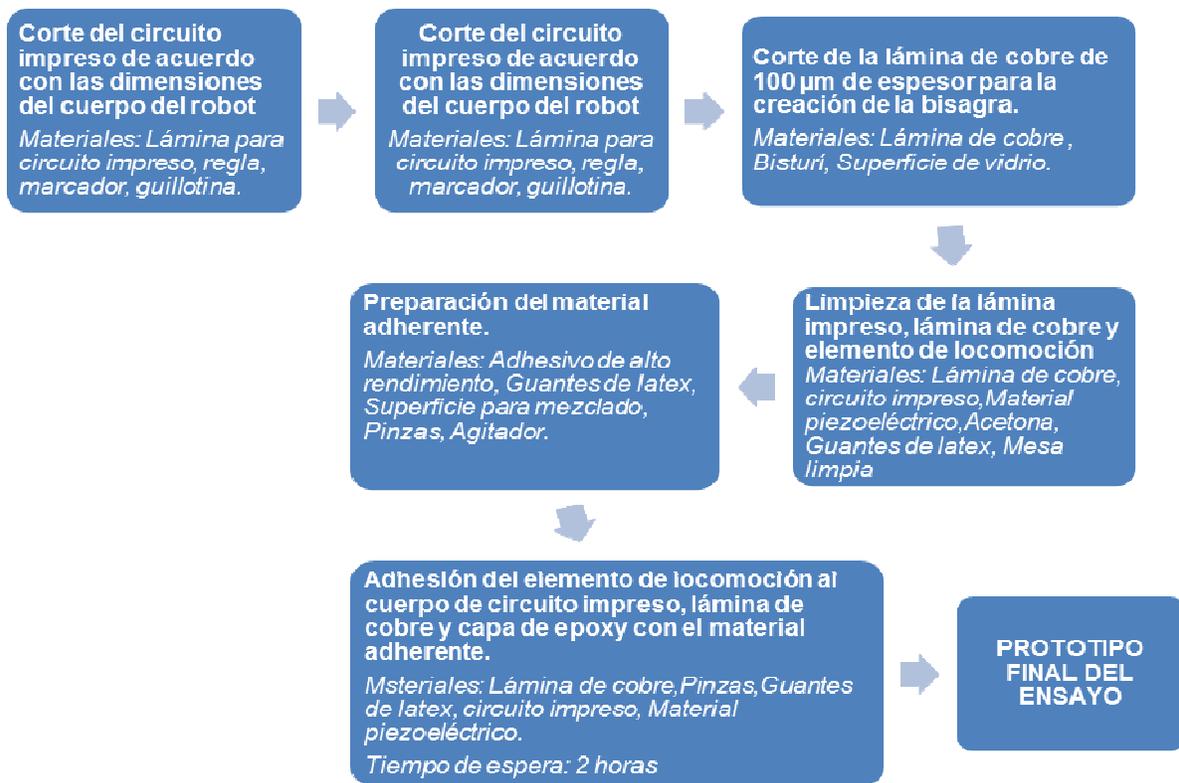


Figura 4.3.35. Diagrama de flujo del procedimiento de montaje del prototipo para el ensayo con una pata, Kapton, impreso, lámina de cobre y una capa delgada de epoxy como bisagra.

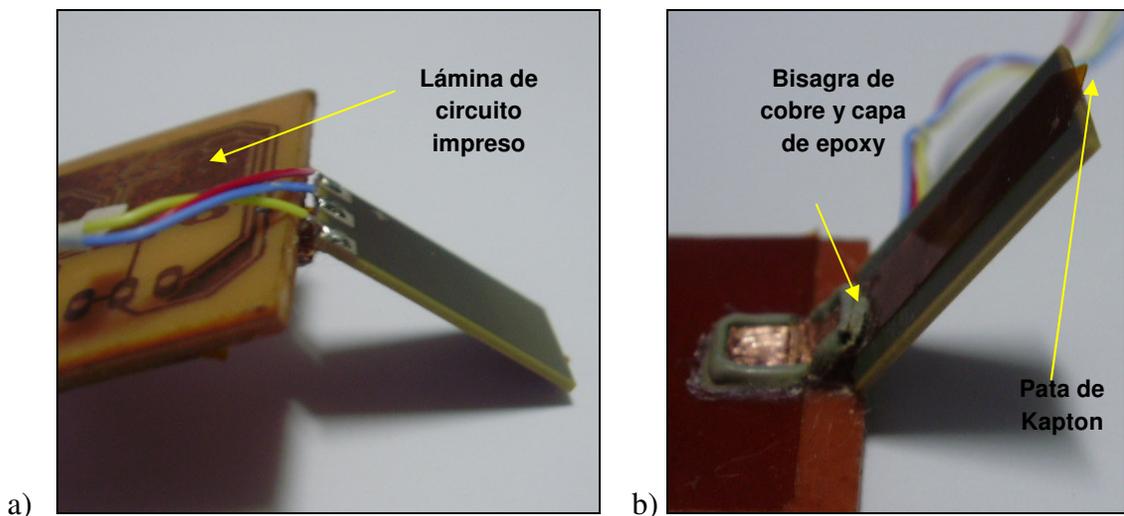


Figura 4.3.36: Configuración de la estructura del robot para el ensayo con una pata, Kapton, impreso, lámina de cobre y el epoxy.

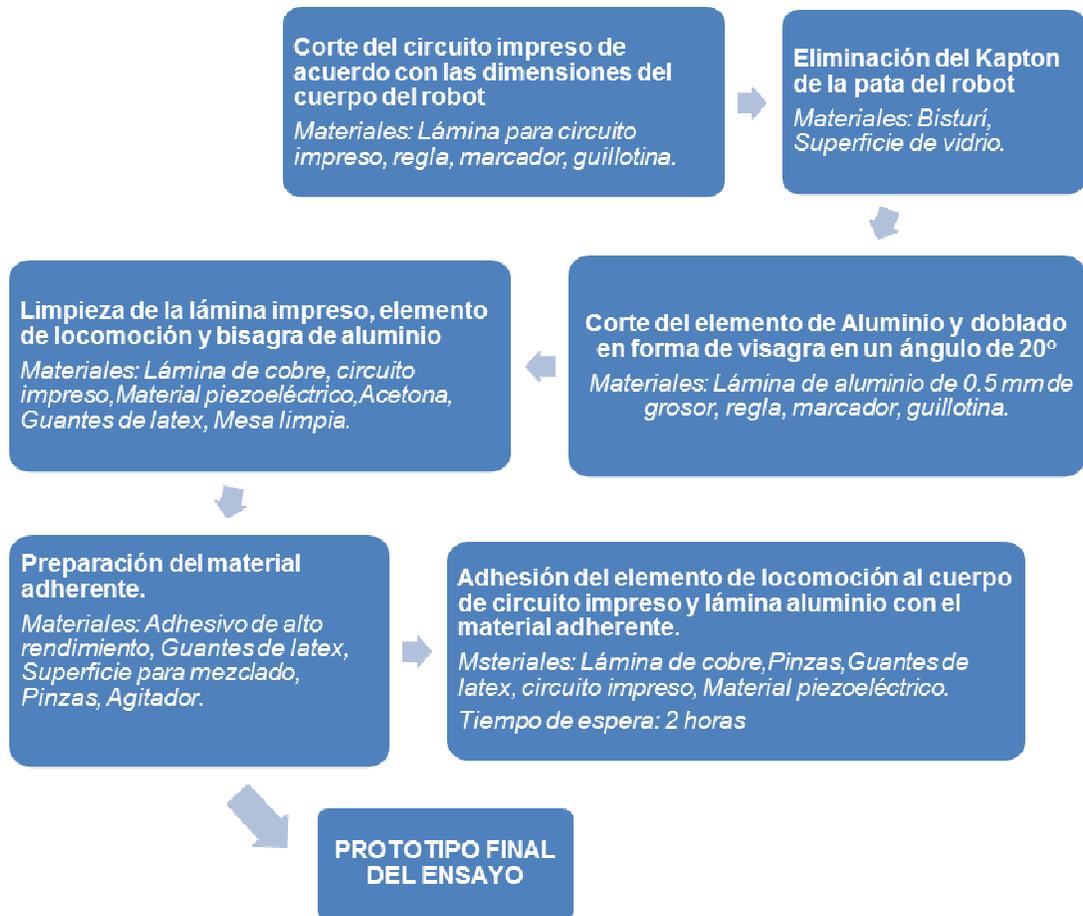


Figura 4.3.37: Diagrama de flujo del procedimiento de montaje del prototipo para el ensayo con una pata, placa de circuito impreso y bisagra de aluminio.

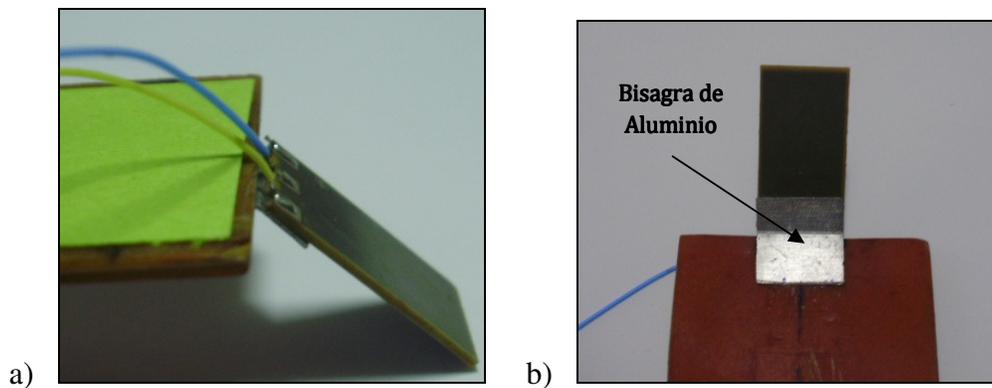


Figura 4.3.38: Configuración de la estructura del robot para el ensayo con una pata, placa de circuito impreso y bisagra de aluminio.

Esta configuración mostró los mejores resultados en cuanto a desplazamiento y tracción del robot, por cuanto se procedió a realizar el montaje de todos los miembros del robot

con el fin de evaluar la locomoción del robot completo, esto bajo el mismo procedimiento seguido para una pata que se describió en la Figura 4.3.37. De igual forma las dos patas restantes se configuraron con el elemento de aluminio como bisagra para soporte de los actuadores y se unieron al cuerpo de robot con epoxy de alto rendimiento. En la Figura 4.3.39 se observa la configuración final de las extremidades del robot con las características antes descritas.

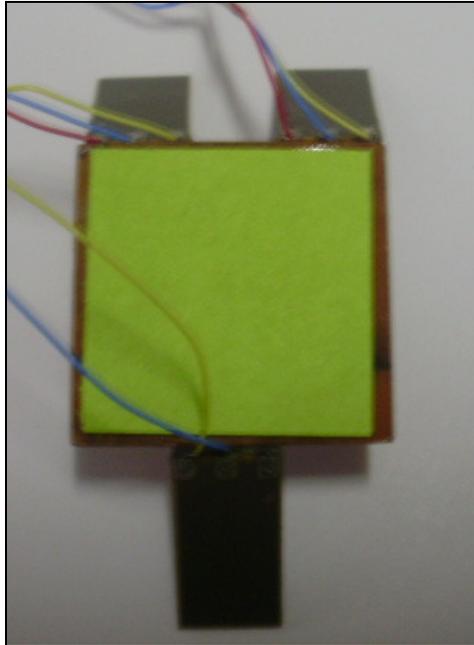


Figura 4.3.39: Estructura final del sistema de locomoción del robot con todas las patas

La estructura antes mostrada y descrita comprende la versión final del sistema de locomoción ya que se obtuvieron los resultados deseados en cuanto a desplazamiento y tracción del cuerpo del robot. Se logró un desplazamiento del robot de hasta 2 cm para tiempos de hasta 3 s, lo cual es correspondiente a velocidades de 6.6 mm/s, que se consideran adecuados para la aplicación proyectada, y constituyen resultados muy importantes y demuestran la viabilidad del diseño en una futura reducción de escala, contando con el equipo requerido para hacer esto posible.

Adicionalmente a los resultados en cuanto a las características del desplazamiento del sistema de locomoción en su configuración final correspondiente a la Figura 4.3.39, se procedió a medir el consumo de potencia del sistema con el fin de determinar la viabilidad de integrar este sistema al robot, cuya alimentación está limitada a decenas de Watts. Para realizar esta medición se utilizó una unidad fuente-medidora (SMU) de

la marca Keithley correspondiente al modelo 2636A. En la Figura 4.3.40 se observa una imagen de este dispositivo.



Figura 4.3.40. Imagen del dispositivo para la medición de la potencia consumida por los elementos de actuación (Unidad fuente-medidora Keithley 2636A).

Se midió con un dispositivo fuente-medidor debido a que los actuadores piezoeléctricos se caracterizan por su bajo consumo de corriente, dado que la excitación de este tipo de materiales se da debido a la presencia de un potencial y no de corriente, ya que el estrés en el material se debe a la polarización de la estructura cristalina por la presencia de un campo eléctrico y no por el flujo de electrones. Por tanto, dado que el SMU utilizado es capaz de medir en escala hasta de femto amperios, este posibilita hacer las mediciones de corriente y tensión para estimar el consumo de potencia de las patas del robot. Estos datos fueron tomados programando una señal cuadrada de 3.3 V y frecuencia de 445 Hz en el SMU donde simultáneamente se midió para varios periodos la tensión y la corriente consumida por las patas. Las mediciones se hicieron para los dos casos posibles de operación del sistema de locomoción, es decir para el caso en que solo una pata está activa y para el caso en que las dos patas contiguas están activas. En la Tablas 4.3.10 y Tabla 4.3.11 se observan los datos de corriente y tensión para ambos casos, obtenidos mediante el SMU. La potencia que es necesario suministrar al sistema de locomoción es de 3.03 mW y 5.6 mW, para el caso en que una y dos patas están activas, respectivamente. Esto permite integrar el módulo de locomoción en sistemas que operan con un consumo de potencia en el rango de decenas de miliwatts.

Tabla 4.3.10. Datos de corriente pico suministrada a un actuador piezoeléctrico (pata) del sistema de locomoción para diferentes tiempos medidos en el SMU Keithley 2636A

| Tiempo (s) | Tensión de alimentación (V) | Corriente (A) |
|------------|-----------------------------|---------------|
| 0 | 3.3 | 4.34E-06 |

| | | |
|----------|-----|------------|
| 0.007605 | 3.3 | 5.17E-06 |
| 0.015049 | 3.3 | 6.56E-06 |
| 0.020424 | 3.3 | 6.95E-04 |
| 0.025763 | 3.3 | 6.88E-04 |
| 0.031083 | 3.3 | 7.06E-04 |
| 0.040976 | 3.3 | -9.40E-05 |
| 0.046326 | 3.3 | 0.00148272 |
| 0.05165 | 3.3 | 0.00158551 |
| 0.056961 | 3.3 | 0.00148262 |
| 0.062309 | 3.3 | 0.00161527 |
| 0.067623 | 3.3 | 0.00147236 |
| 0.073002 | 3.3 | 0.00172187 |
| 0.078308 | 3.3 | 0.00148964 |
| 0.083609 | 3.3 | 0.00158715 |
| 0.089073 | 3.3 | 0.00144042 |
| 0.094419 | 3.3 | 0.00158678 |
| 0.099759 | 3.3 | 0.00147285 |
| 0.105067 | 3.3 | 0.00159155 |

Tabla 4.3.11. Datos de corriente pico suministrada a dos actuadores piezoeléctricos (patas) del sistema de locomoción para diferentes tiempos medidos en el SMU Keithley 2636A

| Tiempo (s) | Tensión de alimentación (V) | Corriente (A) |
|-------------------|------------------------------------|----------------------|
| 0 | 3.3 | 0.00410732 |
| 0.005444 | 3.3 | 0.00412887 |
| 0.011014 | 3.3 | 0.00403435 |
| 0.016438 | 3.3 | 0.00386867 |
| 0.021791 | 3.3 | 0.00351439 |
| 0.027185 | 3.3 | 0.00274974 |
| 0.035176 | 3.3 | 0.0034279 |
| 0.040504 | 3.3 | 0.00245797 |
| 0.045816 | 3.3 | 0.00211841 |
| 0.051145 | 3.3 | 0.00228046 |
| 0.056464 | 3.3 | 0.00220939 |
| 0.061792 | 3.3 | 0.00225951 |
| 0.067125 | 3.3 | 0.00221905 |
| 0.072457 | 3.3 | 0.00222919 |
| 0.077802 | 3.3 | 0.00223305 |
| 0.083139 | 3.3 | 0.00221894 |
| 0.088529 | 3.3 | 0.00228446 |
| 0.093863 | 3.3 | 0.00222074 |
| 0.099186 | 3.3 | 0.00220907 |

De los datos mostrados anteriormente en las Tablas 4.3.10 y 4.3.11, se obtuvieron los valores promedio de corriente, el valor RMS y la potencia total estimada para el consumo de potencia con una pata y dos patas. Estos datos se resumen en la Tabla 4.3.12.

Tabla 4.3.12. Datos para determinación del consumo de potencia del sistema de locomoción del robot de acuerdo con el número de patas activadas

| Número de patas | Corriente Pico (mA) | Corriente RMS (mA) | Potencia (mW) |
|------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|
| Una pata | 1.3 | 0.91 | 3.03 |
| Dos patas | 2.4 | 1.69 | 5.6 |

4.4 MICROMANIPULADOR Y HERRAMIENTA DE MICROCORTE

Investigador: Paola Vega Castillo

Estudiantes: William Quirós Solano, Juan Andrés Alfaro Barrantes

4.4.1 MICROMANIPULADOR

4.4.1.1 Principio de funcionamiento

En la implementación de robot miniaturizados existen diferentes posibilidades de actuación que pueden llevarse a la microescala, pero que deben ser evaluados de acuerdo con la función que desea realizarse, la resistencia mecánica y deformación, resolución, tensión de alimentación, consumo de energía y grados de libertad necesarios.

La actuación piezoeléctrica es una de las formas más efectivas de incorporar microactuadores en estructuras miniaturizadas. Entre sus ventajas están la baja tensión de actuación, bajo consumo de potencia, facilidad de control y tiempo de respuesta. Además, el desplazamiento del actuador puede aumentarse incorporando un mayor número de capas electroactivas. Por todas estas razones, se utiliza el efecto piezoeléctrico en la implementación de un actuador bimorfo con aplicación en un actuador básico de posicionamiento x-y para el robot miniaturizado.

En un cuerpo elástico sin campo eléctrico aplicado, la tensión mecánica T y la deformación S están relacionados por la ecuación 4.4.1.

$$\mathbf{T} = c\mathbf{S} \quad (\text{Ec. 4.4.1})$$

Donde c es la rigidez del material. Para materiales piezoeléctricos, las ecuaciones constitutivas eléctricas y mecánicas están acopladas. En el caso de actuadores, un campo eléctrico aplicado alinea los polos internos, causando tensión mecánica en el material. Esto se conoce como el efecto piezoeléctrico inverso.

El diseño de sistemas piezoeléctricos depende de los modos de acoplamiento, es decir, de los elementos de la matriz de acoplamiento que son diferentes de cero. En el caso de actuadores, la deformación mecánica de un material piezoeléctrico como función del campo eléctrico aplicado está dada por la ecuación 4.4.2

$$\mathbf{S} = s^E\mathbf{T} + d^T\mathbf{E} \quad (\text{Ec. 4.4.2})$$

Donde S es la deformación, T es la tensión mecánica medida en N/m² para un campo eléctrico constante con tensión constante, s es la matriz de correspondencia y el superíndice E indica cero campo eléctrico, d^t es la matriz piezoeléctrica inversa, es decir, la transpuesta de la matriz de coeficientes de acople piezoeléctrico.

Para implementar actuadores piezoeléctricos se cuenta principalmente con tres modos de actuación: modo de grosor (acoplamiento d₃₃), modo de corte (acoplamiento d₁₅) y modo en el plano (acoplamiento d₃₁).

En el modo de corte domina la constante de acople piezoeléctrico d₁₅=d₂₄; el campo eléctrico se aplica perpendicularmente a la dirección de polarización. El modo de grosor se utiliza para actuadores en pila.

Por último, el modo en el plano es el utilizado para implementar actuadores laminares bimorfos. En este modo, d₃₁ es la constante dominante y la dirección del desplazamiento es perpendicular al campo eléctrico. Las cerámicas PZT son materiales isotrópicos en la dirección perpendicular a la dirección de polarización (d₃₂=d₃₁). En un actuador laminar, el desplazamiento y la tensión aplicada V₀ se relacionan con el grosor de la capa piezoeléctrica según la ecuación 4.4.3:

$$\Delta = \frac{d_{31} V_0 \cdot L}{a} \quad (\text{Ec. 4.4.3})$$

Donde d₃₁ es la constante transversal de acoplamiento piezoeléctrico, V₀ es la tensión eléctrica aplicada, L es la longitud del actuador y a es el grosor de la capa piezoeléctrica. En diseños laminares bimorfos el actuador se deforma en la dirección del campo eléctrico, combinando así el funcionamiento de un actuador de pila y el coeficiente de acoplamiento d₃₁ del modo en el plano.

Como una primera aproximación, el desplazamiento está dado por la ecuación 4.4.4. En comparación con la ecuación 4.5.3, ésta incluye el cuadrado de la longitud del actuador y su espesor total:

$$\Delta = -\frac{3d_{31} V_0 L^2}{2a^2} \quad (\text{Ec. 4.4.4})$$

El mayor desplazamiento ocurre a la frecuencia de resonancia, que puede aproximarse como indica la ecuación 4.4.5: [16]

$$f_{res} = \frac{K_n t_a}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{Y_a}{12\rho_{eff}}} \quad (\text{Ec. 4.4.5})$$

Donde t_a es el espesor total del actuador, Y_a es el módulo de Young del material piezoeléctrico, ρ_{eff} es la densidad efectiva del actuador, K_n es una constante en la que el subíndice n representa el modo de vibración ($K_1= 3.52$, $K_2= 22.0$) y L es la longitud efectiva del actuador.

4.4.1.2. Concepción y requerimientos del actuador

Para incorporar el actuador en el minirobot en su escala final (no las de este prototipo), debe cumplirse con las siguientes especificaciones:

- Dimensiones máximas: $1000\mu\text{m} \times 500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$
- Consumo de potencia: menor que 1mW
- Tensión de alimentación: 3V
- Operación en ambientes secos y en vacío
- Precisión mejor que 50nm

Para el diseño del actuador se recurrió al método de elementos finitos, realizando simulaciones multifísicas incluyendo efectos mecánicos y eléctricos. El actuador diseñado es un actuador laminar bimorfo, por lo que opera en el modo de acoplamiento d_{31} . Este tipo de actuador permite obtener desplazamientos mayores al 0.1% de la longitud del actuador.

Las simulaciones con las que se contaba del proyecto anterior utilizaban como material piezoeléctrico PZT3203HD de Motorola. La geometría del actuador se presenta en la figura 4.4.1. Consiste en dos capas de material piezoeléctrico y una capa delgada de aluminio de 300nm de espesor en las caras externas se utiliza como electrodo para contactar las capas piezoeléctricas. Un tercer electrodo del mismo tipo se encuentra entre las capas piezoeléctricas. La tensión de alimentación varía de 0 a 3V , controlando el desplazamiento. Las flechas indican la dirección de la polarización piezoeléctrica.

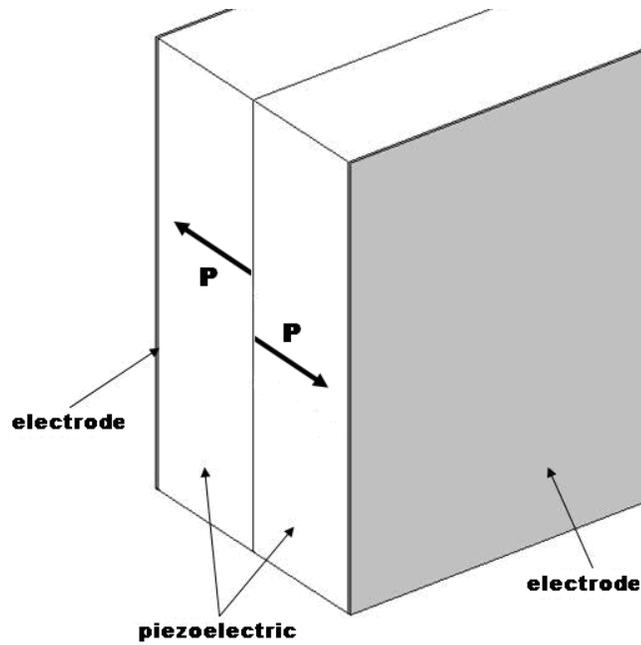


Figura 4.4.1. Geometría básica de un actuador laminar bimorfo

Esta configuración es la base para implementar el sistema de posicionamiento x-y, pues la combinación de dos actuadores de este tipo se utilizó para lograr movimiento con dos grados de libertad, como muestra la figura 4.4.2.

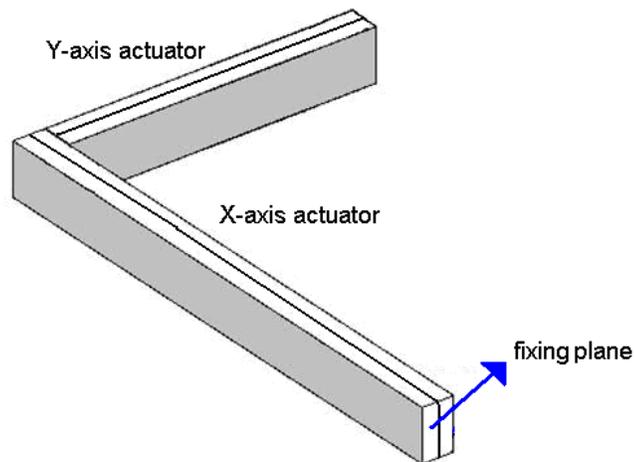


Figura 4.4.2. Actuador para posicionamiento con dos grados de libertad

Para PZT3203HD, la matriz de acoplamiento es [17]:

$$d_{PZT\ 3203HD} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 \\ -320 & -320 & 650 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} 10^{-12} \text{ m/V} \quad (\text{Ec. 4.4.6})$$

La densidad del material es 7870 kg/m^3 , el modulo de Young Y_{E11} es $6.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ y la razón de Poisson es 0.31. La constante dieléctrica K_{T3} is 3800. La matriz de conformidad es [17]:

$$S_E = \begin{pmatrix} 16.6 & -4.2 & -8.2 & 0 & 0 & 0 \\ -4.2 & 16.6 & -8.2 & 0 & 0 & 0 \\ -8.2 & -8.2 & 21 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 52.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 52.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 52.4 \end{pmatrix} \cdot 10^{-12} \frac{1}{Pa} \quad (\text{Ec. 4.4.7})$$

4.4.1.3 Simulaciones

Las simulaciones se llevaron a cabo considerando el modelo piezo-sólido de COMSOL Multiphysics para obtener el desplazamiento mecánico de los actuadores.

La dirección de polarización de cada capa debe ser considerada en la simulación. La polarización del material debe estar orientada en la misma dirección que el campo eléctrico para obtener elongación en la dirección deseada. Esto se logra configurando en el simulador el sistema de coordenadas para cada subdominio. El sistema de coordenadas de los subdominios está rotado 90° con respecto al eje longitudinal del actuador.

Inicialmente se simuló un único actuador bimorfo con las siguientes dimensiones: $30\mu\text{m}$ de alto, $580 \mu\text{m}$ de longitud y dos capas de PZT de $5\mu\text{m}$ de espesor. Se obtuvo un desplazamiento de $4.91\mu\text{m}$ al aplicar una tensión eléctrica de 3V. Para determinar la longitud requerida para operar a 1.5V, se simuló el actuador con una longitud de $805\mu\text{m}$. Con esto se obtuvo un desplazamiento ligeramente diferente al anterior, de $4.73\mu\text{m}$.

Debido a que se requiere un actuador de dos grados de libertad, el acople de ambos actuadores conlleva un cambio en las dimensiones, dado que un actuador debe soportar el peso del otro. El actuador a lo largo del eje X implementa el desplazamiento en la dirección del eje Y y viceversa. Se obtuvo un desplazamiento máximo de $4.13\mu\text{m}$ en dirección Y utilizando una longitud de $500\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ de alto y dos capas de $10\mu\text{m}$ de

espesor operando a 10V. En la dirección X se obtuvo un desplazamiento máximo de 4.51 μm con una longitud de 700 μm , 30 μm de alto y dos capas de 10 μm de espesor, también a 10V. Al disminuir el espesor de capa en un factor de dos, se obtuvieron desplazamiento similares pero esta vez operando a 3V. Los resultados de las simulaciones se resumen en la Tabla 4.4.1.

Tabla 4.4.1. Desplazamiento máximo de los actuadores sin carga

| Configuración | Longitud (μm) | | Desplazamiento (μm) | | Espesor (μm) |
|-------------------------|----------------------------|-----|----------------------------------|------------|---------------------------|
| | X | Y | X | Y | |
| Bimorfo a 1.5 V | - | 805 | ± 4.73 | - | 5 |
| Bimorfo a 3V | - | 580 | ± 4.91 | - | 5 |
| Microposicionador a 10V | 500 | 700 | ± 4.51 | ± 4.13 | 10 |
| Microposicionador a 3V | 500 | 700 | ± 5.39 | ± 4.93 | 5 |

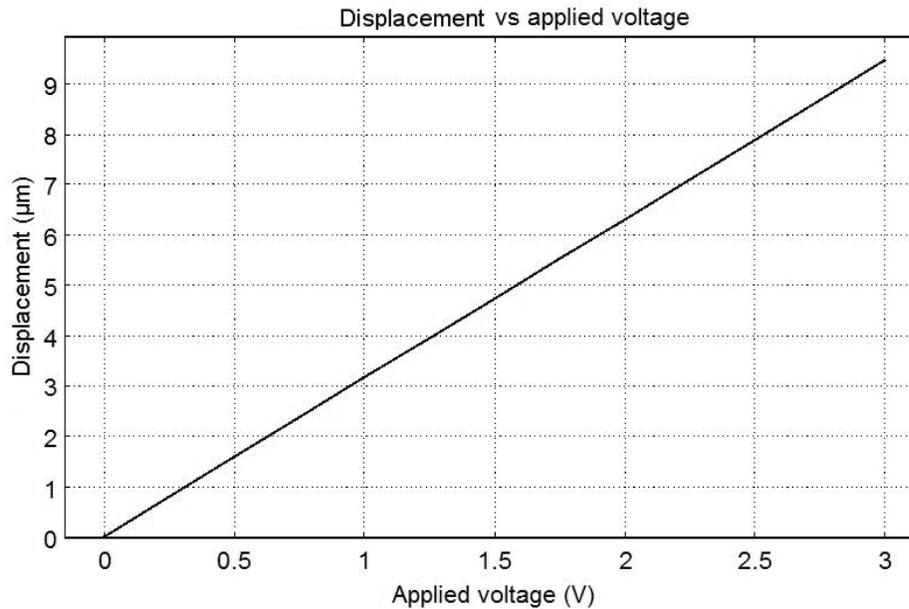


Figura 4.4.3. Desplazamiento del actuador laminar bimorfo vs voltaje aplicado a L = 805 μm

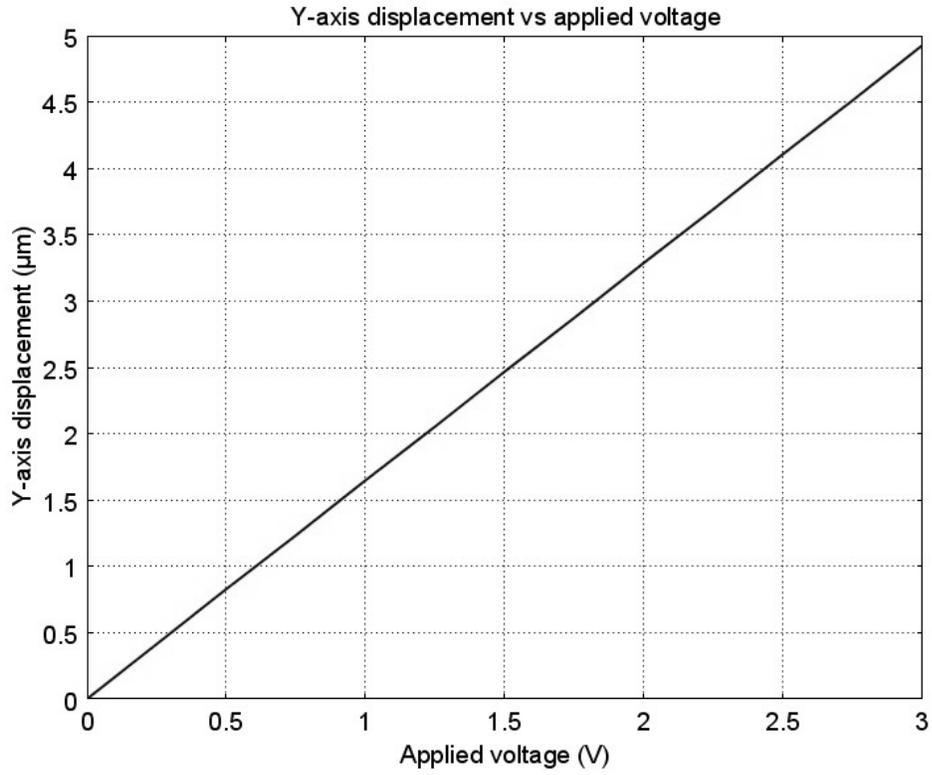


Figura 4.4.4. Desplazamiento en el eje Y contra voltaje aplicado para el microposicionador de espesor reducido

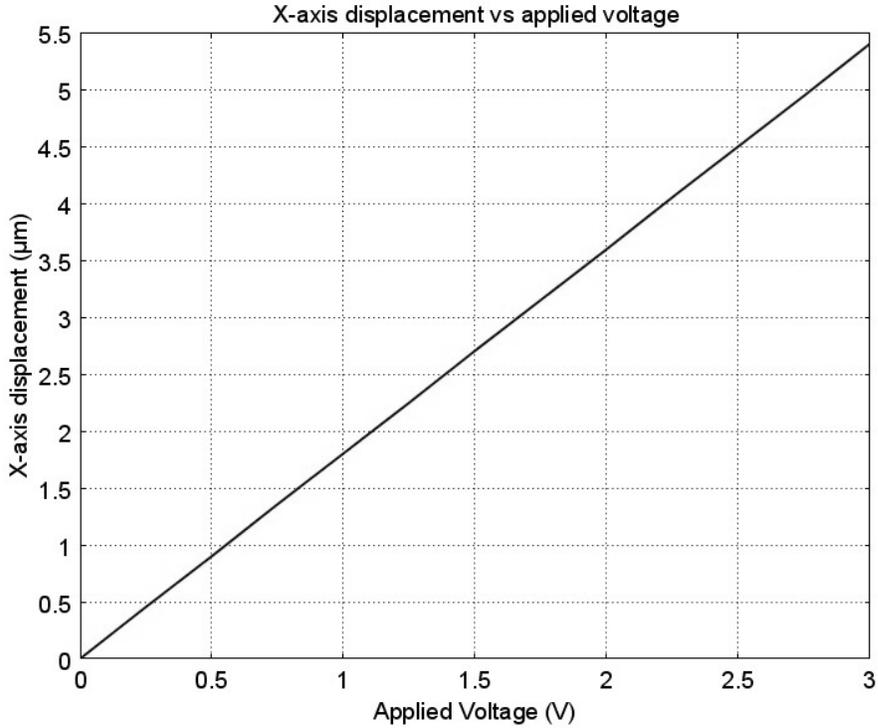


Figura 4.4.5. Desplazamiento en el eje X contra voltaje aplicado para el microposicionador de espesor reducido

Para el actuador bimorfo corto se obtiene un desplazamiento de 163,6nm por cada 100mV en el voltaje aplicado, mientras que el actuador bimorfo largo se deforma 315,33nm para el mismo voltaje aplicado. La precisión del microactuador de mayor espesor es de 41,3nm in en el eje Y y de 45,1nm en el eje X, y se obtiene al aplicar 100mV. Para el microactuador de espesor reducido, al aplicar 100mV se obtienen 164nm de desplazamiento en la dirección Y y 180nm en la dirección X.

De esta forma, para lograr 50nm de precisión con el microposicionador operando a una tensión máxima de 3V, el escalón de tensión máxima es de 30,5mV para la tensión aplicada al actuador de desplazamiento en X y de 27,8mV para la tensión aplicada al actuador de desplazamiento en Y. Esto se traduce en una resolución de al menos 7 bits en el convertidor digital-analógico del microcontrolador. Otra opción para lograr esta resolución consiste en elegir un piezoeléctrico con constantes de acoplamiento menor. Sin embargo, esto limitaría el desplazamiento máximo que puede obtenerse a 3V. Existe entonces un compromiso entre desplazamiento y precisión.

4.4.1.4 Tensión mecánica máxima y resonancia

Se simuló un análisis de von Mises para considerar la tensión mecánica experimentada por los actuadores durante el desplazamiento. Este análisis es un criterio importante para determinar la factibilidad de operación del actuador. Para materiales dúctiles se produce una falla mecánica del material cuando la tensión de von Mises es igual o mayor que la tensión de fractura del material. En el caso del actuador piezoeléctrico este análisis permite calcular una tensión equivalente en una dirección, con lo que se obtiene la tensión experimentada por el material en las direcciones x , y e z . Para simular esto se agregó el modelo solid stress-strain. Los resultados se resumen en la Tabla 4.4.2.

Tal como se esperaba, los resultados de la Tabla 4.4.2 muestran que la tensión mecánica máxima se presenta en el actuador bimorfo corto y en el microposicionador grueso. En el caso del microposicionador la región de tensión máxima se encuentra en la superficie de acople mecánico entre ambos actuadores y en sus alrededores. Esto se muestra en la Figura 4.4.6.

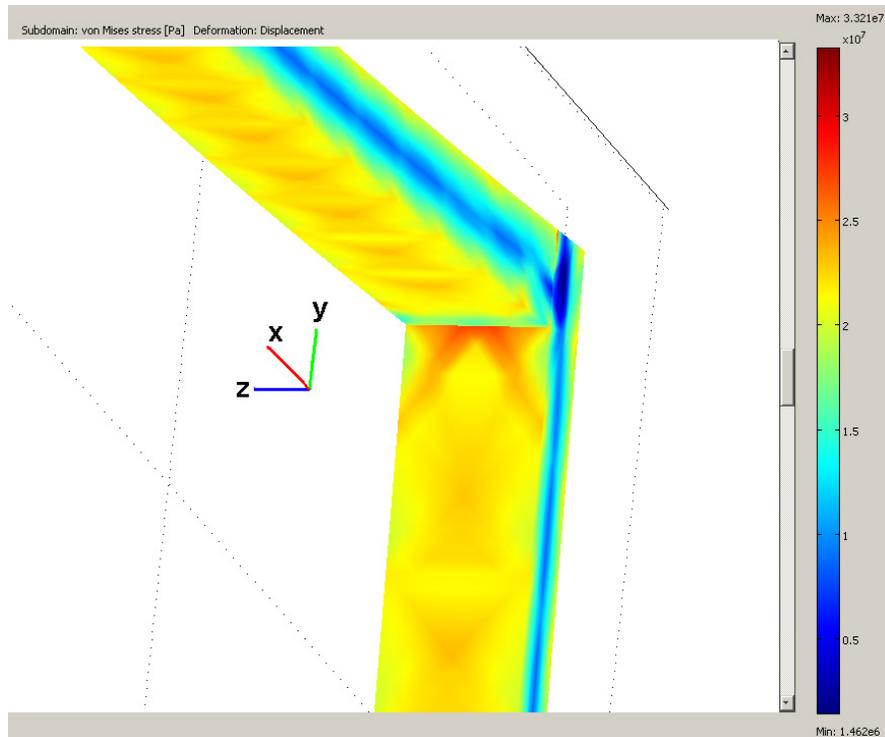


Figura 4.4.6. Regiones de máxima tensión de Von Mises para el microposicionador grueso

Tabla 4.4.2. Tensión de Von Mises sin carga

| Configuración | Tensión de von Mises | | Espesor del actuador (μm) |
|---------------------------|----------------------|-------------------|---|
| | Mínimo (Pa) | Máximo (Pa) | |
| Bimorfo (a 1.5 V) | 9.6×10^5 | 5.8×10^7 | 5 |
| Bimorfo (a 3V) | 1.7×10^6 | 1.2×10^8 | 5 |
| Microposicionador (a 10V) | 1.5×10^6 | 3.3×10^7 | 10 |
| Microposicionador (a 3V) | 4.1×10^5 | 1.9×10^7 | 5 |

Además de las consideraciones de tensión, debe tomarse en cuenta la frecuencia de operación de los actuadores piezoeléctricos. En algunos casos es deseable operar cerca de la frecuencia de resonancia, como en el caso de sistemas de locomoción y transportadores de carga. Sin embargo, para aplicaciones de microposicionamiento debe evitarse operar a las frecuencias de resonancia, puesto que se desea lograr una posición fija del actuador.

La figura 4.4.7 muestra la respuesta de frecuencia del actuador laminar bimorfo con $L = 805 \mu\text{m}$ cerca de la frecuencia de resonancia. La tensión de alimentación es de 1.5V.

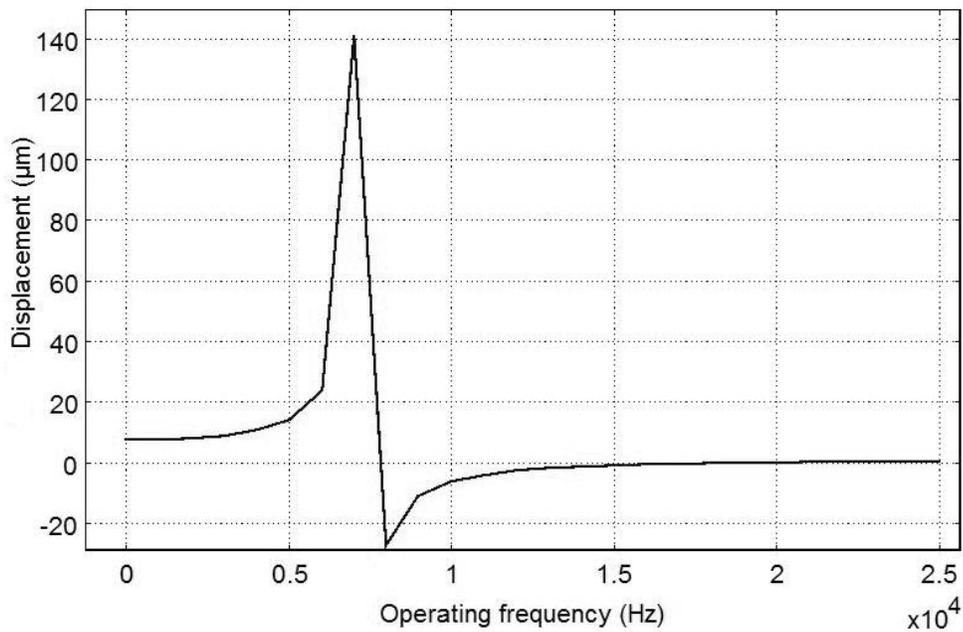


Figura 4.4.7. Desplazamiento en el eje X contra frecuencia para el actuador laminar bimorfo con $L = 805 \mu\text{m}$

Por otra parte, para el actuador bimorfo con $L = 580 \mu\text{m}$ se obtiene una frecuencia de resonancia de 13836 Hz y el actuador presenta un desplazamiento de 192.6 μm . Esto se ilustra en la figura 4.4.8. El comportamiento a la segunda frecuencia de resonancia se muestra en la figura 4.4.9. Puede observarse que a esta frecuencia el actuador se defleca tanto en la dirección x como en z.

Para el microposicionador grueso operando a 10V la primera frecuencia de resonancia está localizada a 8390Hz. El desplazamiento en los ejes x e y se presenta en las figuras 4.4.10 y 4.4.11, respectivamente.

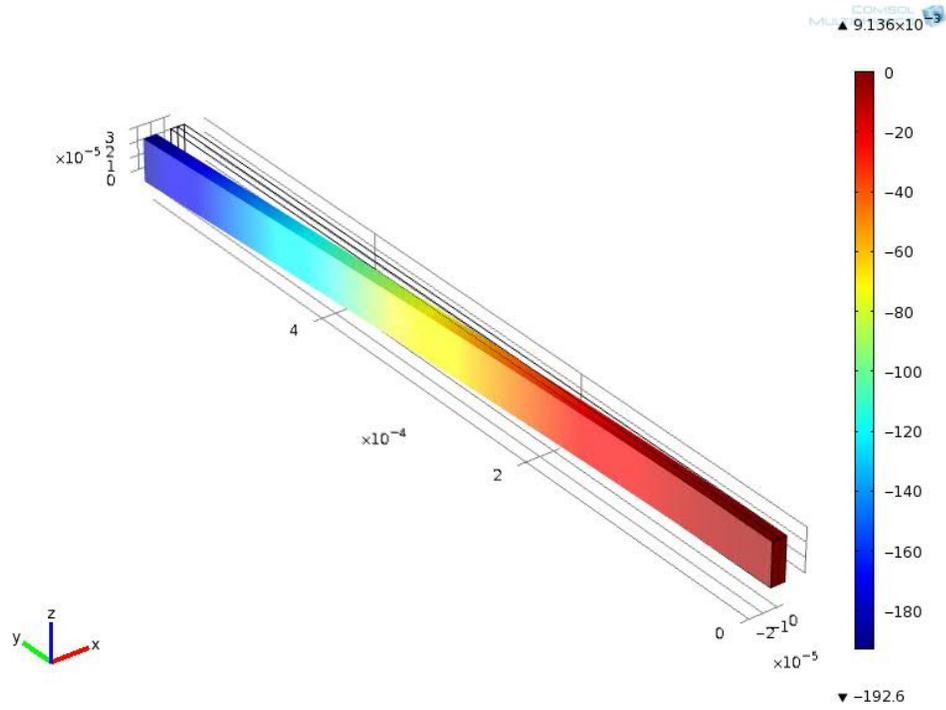


Figura 4.4.8. Comportamiento del actuador laminar bimorfo a la primera frecuencia de resonancia para $L = 580 \mu\text{m}$

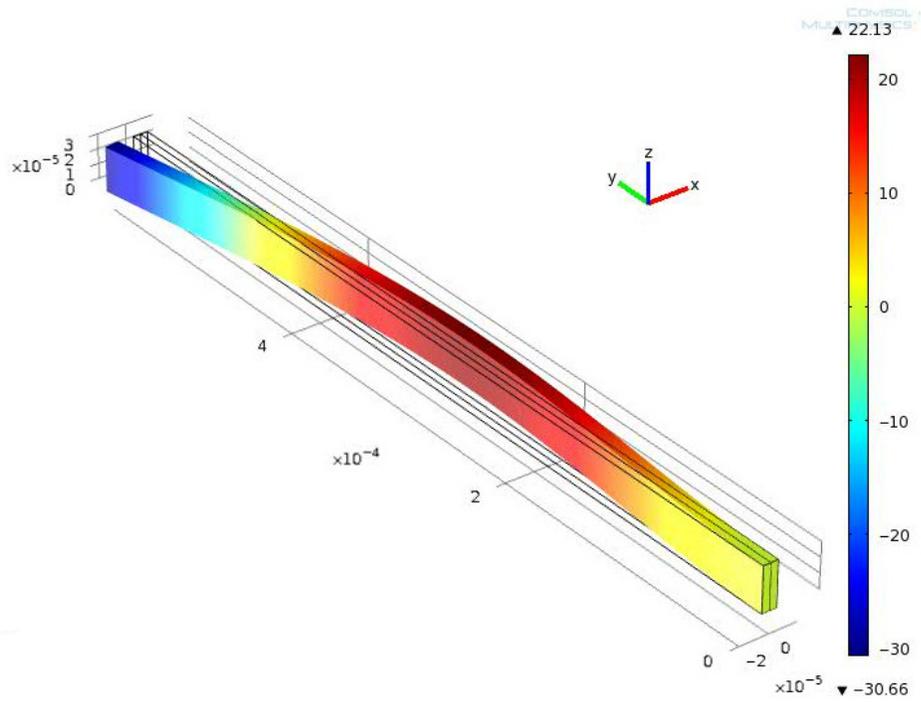


Figura 4.4. 9. Deformación del actuador laminar bimorfo a la segunda frecuencia de resonancia para $L = 580 \mu\text{m}$

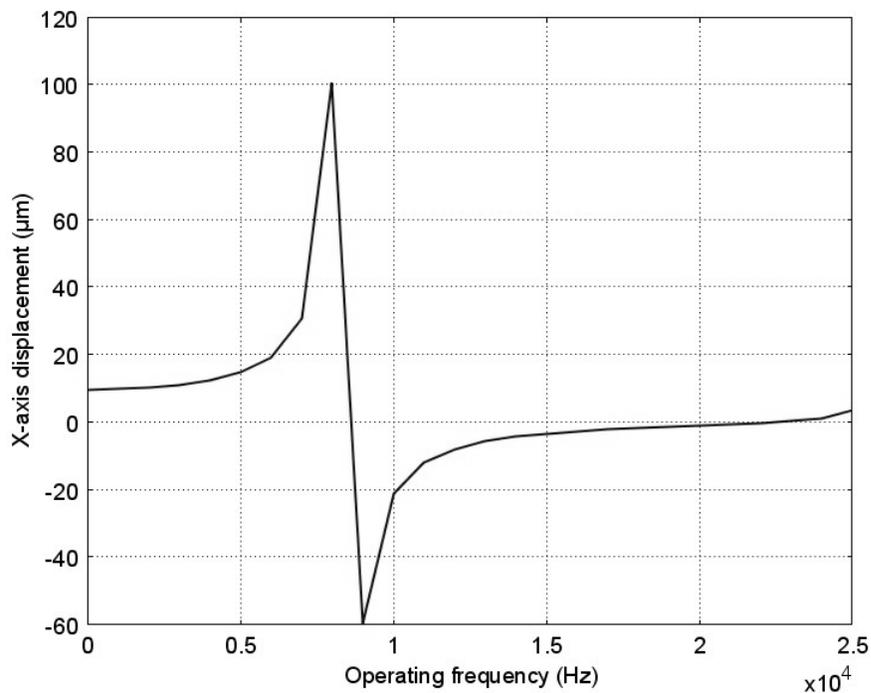


Figura 4.4.10. Desplazamiento en el eje X contra frecuencia para el microposicionador grueso

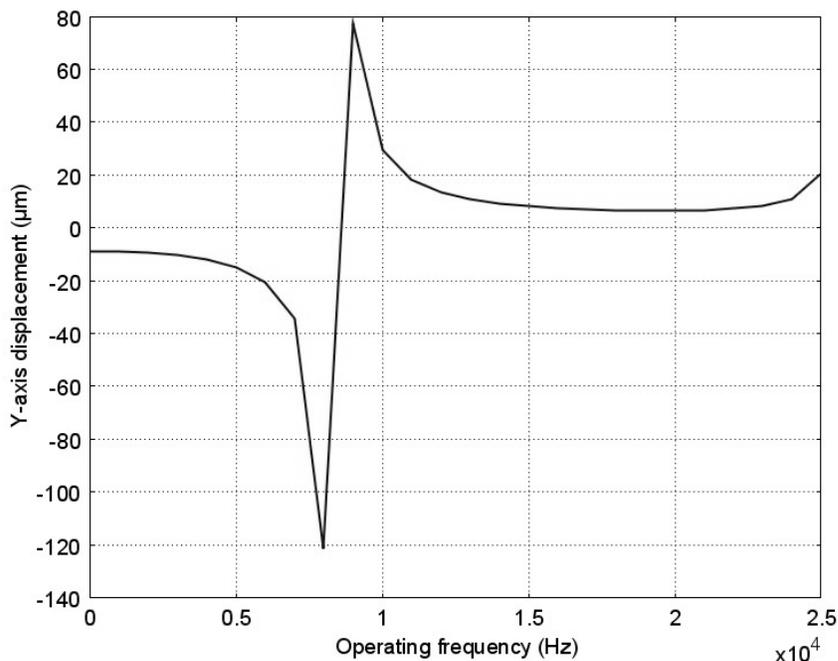


Figura 4.4.11. Desplazamiento en el eje Y contra frecuencia para el microposicionador grueso

En caso del microposicionador delgado operando a 3V, la primera frecuencia de resonancia está a 4281.67Hz.

El consumo de potencia calculado para el actuador bimorfo corto operando a 3V y 10kHz es de 4.44 μW . La potencia disminuye a 3.08 μW para el actuador bimorfo largo, que opera

a 1.5V. Comparando estos dos valores, se obtiene que la potencia es 9.3% mayor para el actuador bimorfo, pero el actuador es un 28% más corto. Esto significa que la potencia no aumenta tan significativamente como para justificar el aumento en la longitud, y este es el criterio predominante para implementar un actuador corto en vez de uno largo.

Para el microposicionador, los cálculos de potencia muestran que el microposicionador delgado consumiría $18,4\mu\text{W}$ al operar a 10kHz y 3V. Al aumentar el espesor del piezoeléctrico de $5\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$, la potencia aumenta en un factor de 5.54. El actuador grueso consume $102\mu\text{W}$ a 10V, dado que el aumento en el espesor requiere un campo eléctrico mayor para lograr el mismo desplazamiento. Mayores tensiones de alimentación generan un gran aumento en la potencia, dado que ésta es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación. Por lo tanto, a pesar de que se obtienen desplazamientos relativamente similares, el espesor del piezoeléctrico es un factor crítico para implementar un actuador.

4.4.1.5. Materiales del prototipo

Con el conocimiento ganado a partir de las simulaciones realizadas en este proyecto, se procedió a implementar un prototipo a mayor escala del micromanipulador XY con el fin de comprobar su funcionamiento. La figura 4.4.12 se muestra la estructura general del manipulador XY implementado.

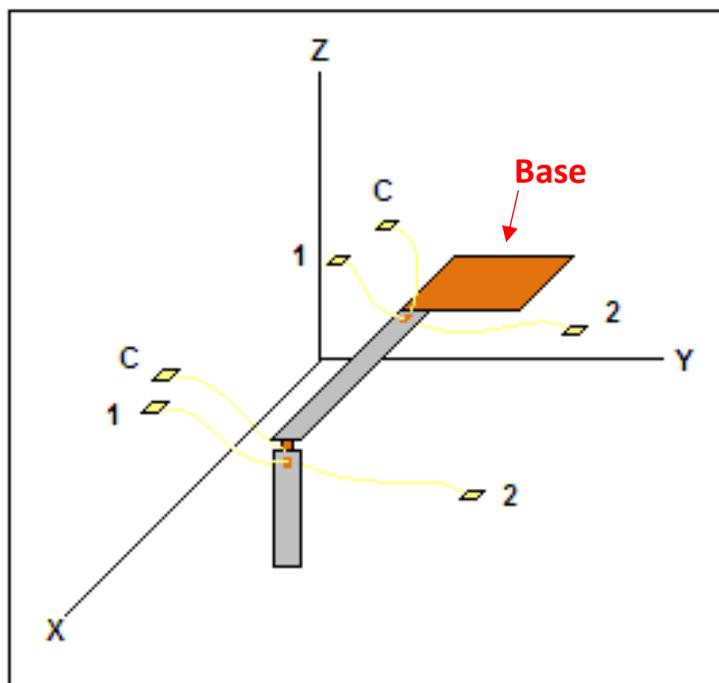


Figura 4.4.12. Diagrama general del actuador piezoeléctrico.

El actuador comprende dos estructuras a base de un material estructural y otro con propiedades piezoeléctricas. Estas estructuras están orientadas perpendicularmente entre sí, y las soporta una base sobre la cual se suspende el actuador en el cuerpo del robot. El material estructural utilizado para el desarrollo de este actuador corresponde a una filmina de una poliamida llamada Kapton, como la que se muestra en la Figura 4.4.13.



Figura 4.4.13. Lámina de Kapton para la construcción de la parte estructural del actuador

Por otro lado, el material piezoeléctrico utilizado corresponde a un polímero con propiedades piezoeléctricas llamado PVDF, puesto que este es el material más apropiado en cuanto a precio, disponibilidad y facilidad de manipulación para la implementación de prototipos. En la Figura 4.4.14 se observa una imagen de la lámina de piezoeléctrico PVDF utilizado. Las láminas fueron compradas a la empresa Measurement Specialities, y consisten en una capa de 28 μm de PVDF con un recubrimiento de níquel para mejorar el contacto eléctrico con el piezoeléctrico.



Figura 4.4.14. Lámina de material piezoeléctrico PVDF

Además del material estructural y el piezoeléctrico, el actuador está compuesto por cobre, tanto en lámina como hilado, con filamentos de 40 μm de diámetro, los cuales se

utilizan para crear la conexión eléctrica del material piezoeléctrico ensamblado sobre el Kapton, con la fuente de alimentación proveniente de uno de los puertos del sistema de control del robot correspondiente al control de posicionamiento.

Consecuentemente, el material piezoeléctrico fue segmentado de acuerdo con las siguientes especificaciones para el caso de un primer actuador implementado:

- Dos piezas rectangulares de 2 cm x 0.6 cm
- Dos piezas rectangulares de 1 cm x 0.6 cm

Esto se muestra en la figura 4.4.15.

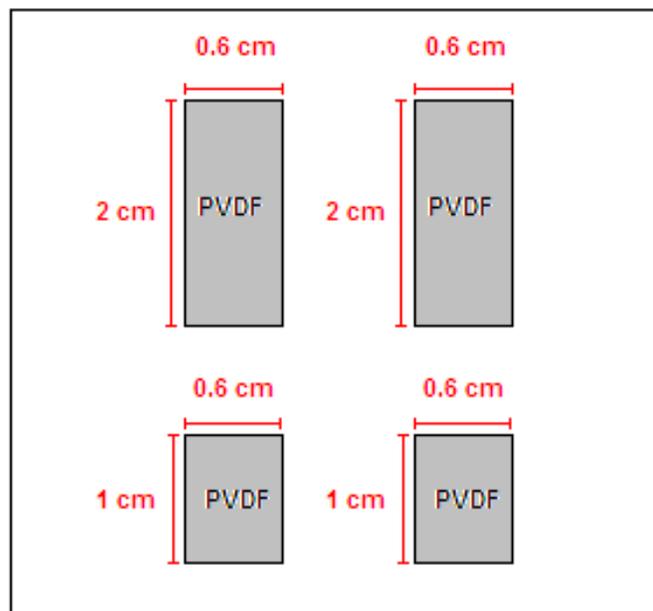


Figura 4.4.15. Especificación de los segmentos de material piezoeléctrico (PVDF) necesarios para la construcción del prototipo del actuador para posicionamiento

Por otro lado, los segmentos correspondientes a la estructura de soporte del actuador de Kapton cumplen con las especificaciones de diseño mostradas en la Figura 4.4.16.

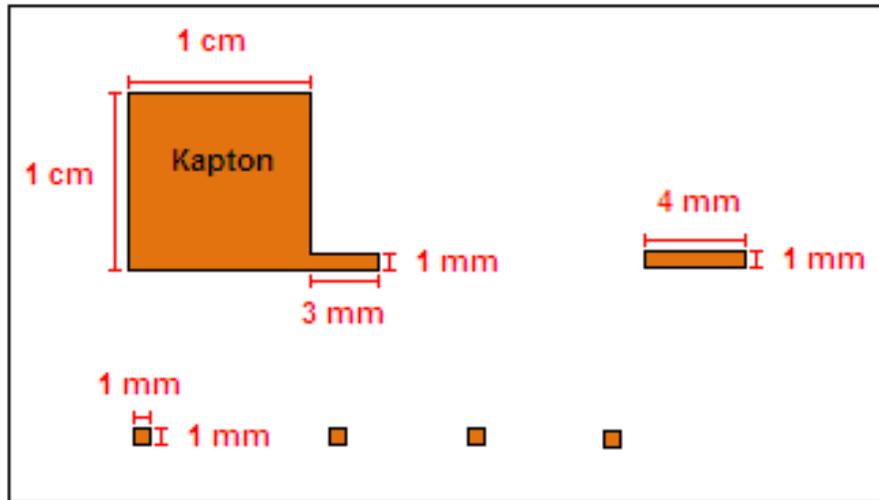


Figura 4.4.16. Dimensiones de las piezas de Kapton para la estructura del actuador piezoeléctrico

En lo concerniente a los elementos de alimentación eléctrica, las piezas de lámina de cobre son rectangulares y corresponden a la superficie que permite el contacto del cable con la fuente de alimentación del actuador. En la Figura 4.4.17 se observa una imagen de la lámina de cobre, desdoblada después de haber sido utilizada.



Figura 4.4.17. Cable y lámina de cobre

Las especificaciones para los contactos de cobre corresponde a seis piezas rectangulares de 1 cm x 0.6 cm, como se muestra en la Figura 4.4.18.

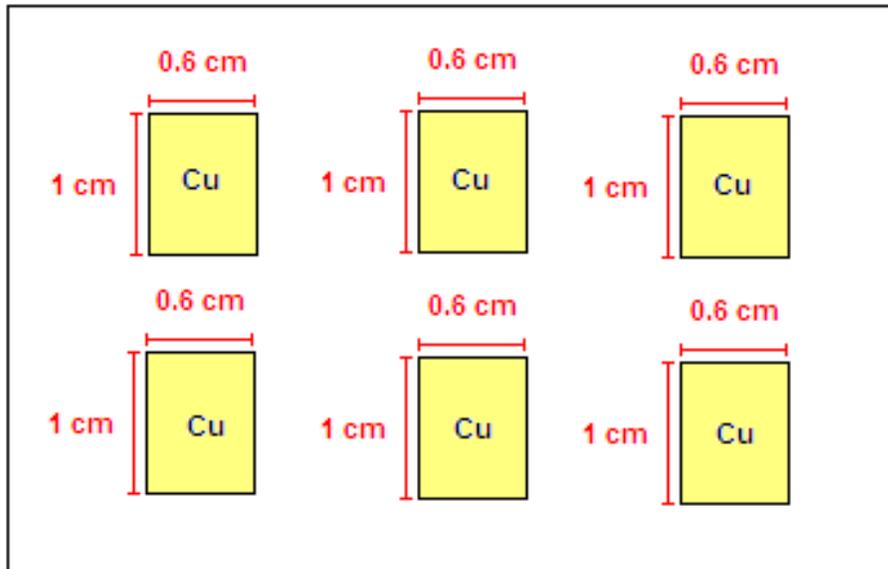


Figura 4.4.18. Dimensiones de las piezas de cobre para los contactos del actuador piezoeléctrico

Además es necesario utilizar 6 cables de cobre para la conexión. Para este caso se utilizaron segmentos de cable de 7 cm de longitud y 40 μm de diámetro. Las dimensiones del cable varían de acuerdo con las necesidades del actuador implementado y cuánta libertad requiera para desplazarse con respecto a la distancia entre el actuador y la fuente de alimentación a utilizar. En el caso de este prototipo, se eligieron cables delgados para que éstos sean una carga mecánica despreciable para el actuador, en cuanto a peso y rigidez.

4.4.1.6 Ensamble del prototipo

El ensamble del actuador comprende su estructuración a partir de cada uno de los segmentos de material piezoeléctrico y Kapton para crear una estructura tipo “escuadra”, en el que dos segmentos se colocan perpendicularmente, sujetos ambos en los extremos por una bisagra, como se ilustró en la figura 4.4.12.

El proceso de ensamble consiste básicamente en unir los segmentos estructurales de Kapton laminados con el material piezoeléctrico, de manera tal que se obtengan dos bimorfos de material piezoeléctrico unidos entre sí. La unión de las capas de material piezoeléctrico de cada segmento se realiza mediante un adhesivo reposicionable.

En cuanto a la conexión eléctrica, es necesario que las superficies interiores de las láminas de material piezoeléctrico estén conectadas, por cuanto se utiliza epoxy

conductor para poner en contacto ambas superficies a través de pequeños puntos de este material, para crear una de las líneas de conexión del actuador para cada bimorfo uniendo el epoxy con el cable de cobre delgado.

En la figura 4.4.19 se observa un diagrama que resume el proceso de ensamble. En esta figura, el material piezoeléctrico se representa en color gris, el adhesivo reposicionable en color verde y el epoxy conductor con color rojo.

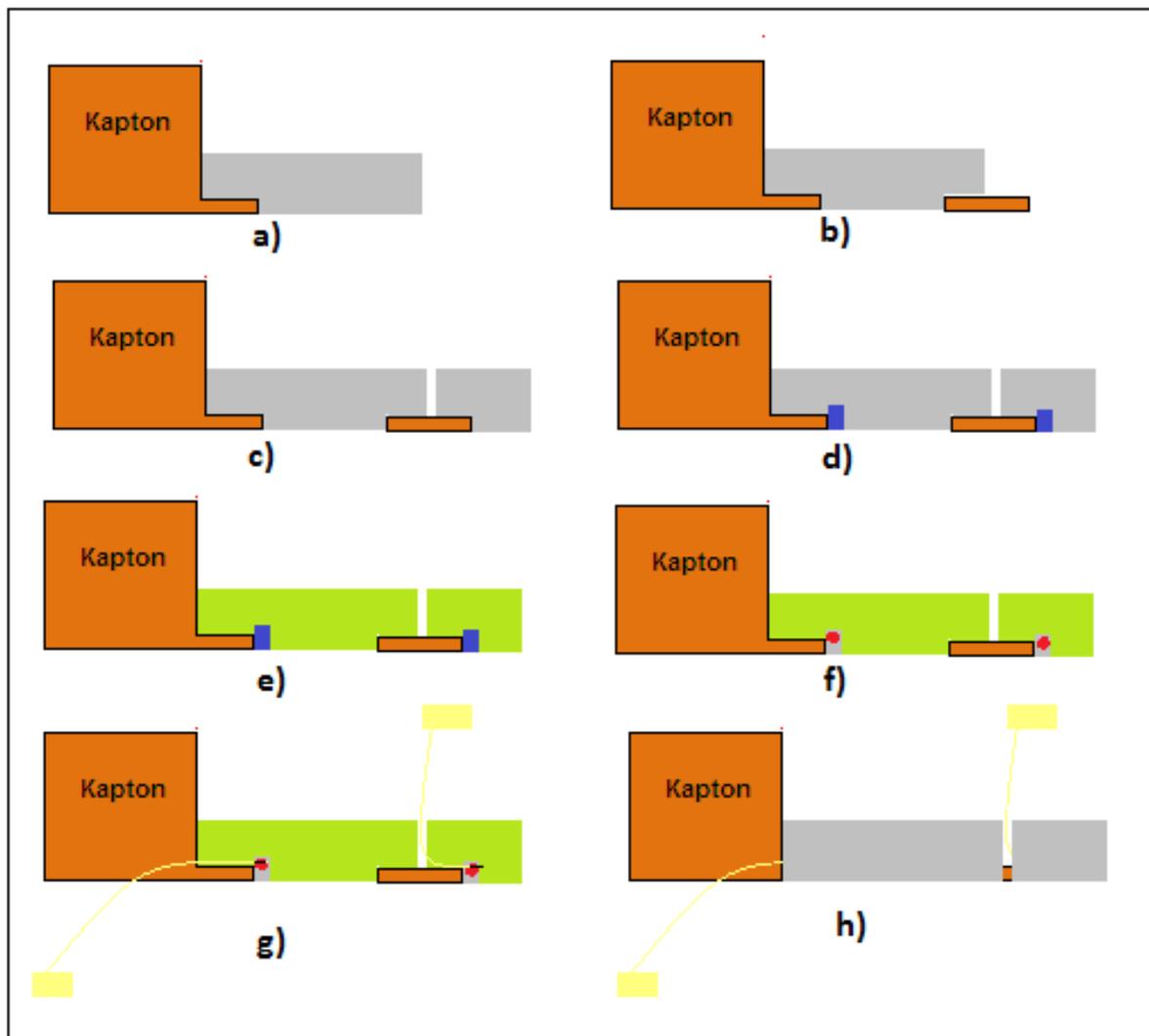


Figura 4.4.19. Diagrama del proceso de ensamble del actuador piezoeléctrico sin contactos exteriores

Además, es necesario la creación de los contactos para las capas exteriores tanto superior como inferior del material piezoeléctrico en cada segmento del actuador. En la Figura 4.4.20 se resume este procedimiento de manera gráfica.

De manera similar, el contacto para las superficies exteriores de los segmentos de piezoeléctrico se realizó mediante epoxy conductivo que se pone en contacto con el cable de cobre, sin embargo para este caso dado que la conexión queda expuesta en el exterior, se agregó un pequeño segmento de Kapton para recubrir el área de contacto.

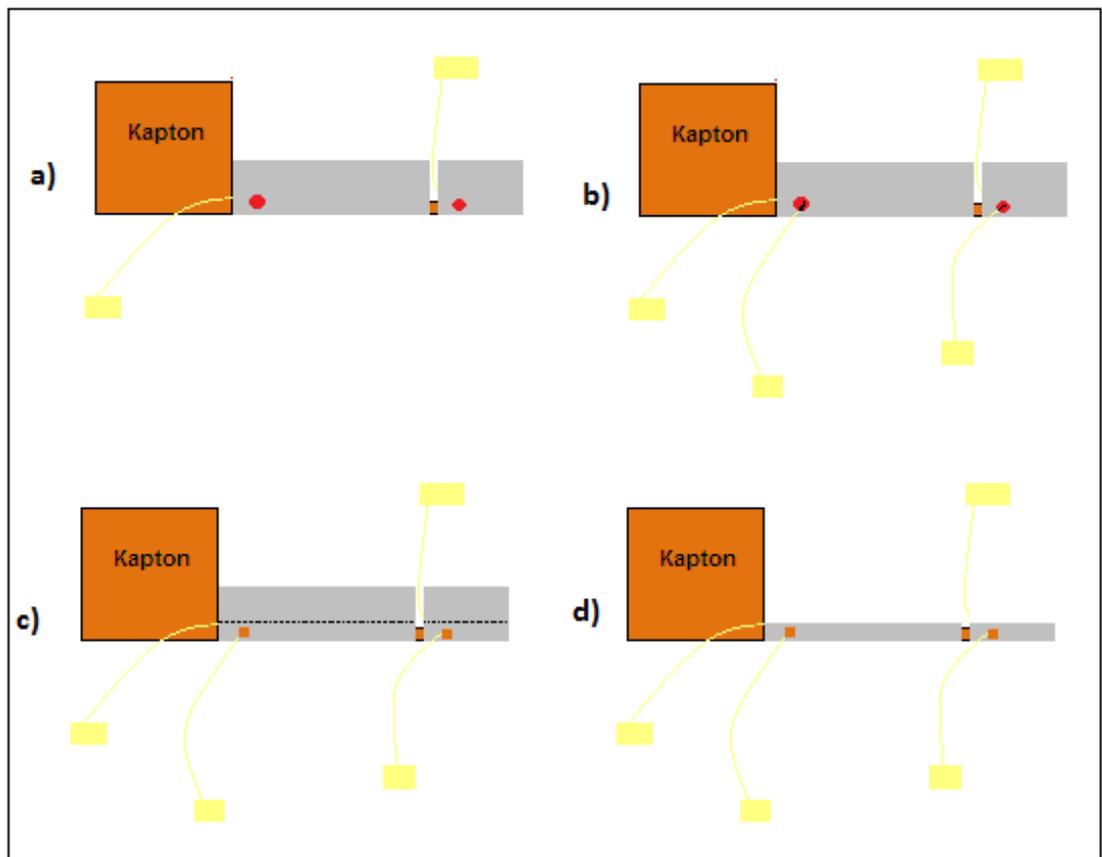


Figura 4.4.20. Diagrama del proceso de ensamblaje del actuador piezoeléctrico con contactos exteriores y corte final

4.4.1.7 Prueba de funcionamiento

La prueba de funcionamiento se realizó alimentando una señal eléctrica de determinada frecuencia al actuador mediante los contactos realizados a cada una de las superficies del material piezoeléctrico, de forma que en las capas de este material que comprenden los dos segmentos principales del actuador, exista un campo eléctrico en direcciones opuestas. Esto permite que una capa se extienda y otra se contraiga,

logrando así la actuación de la estructura. En la Figura 4.4.21 se observa este principio de actuación.

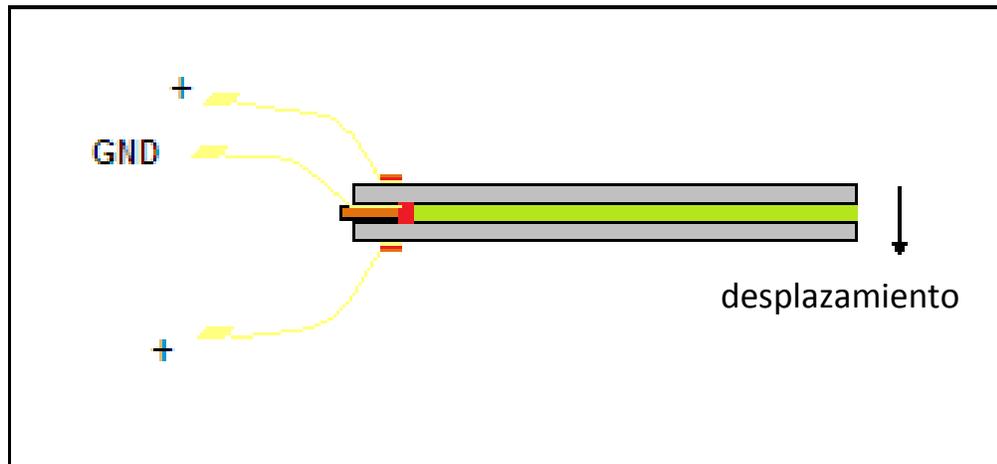


Figura 4.4.21. Alimentación de señal de prueba en el actuador

En las figuras 4.4.22 y 4.4.23 se muestra la imagen correspondiente a los dos actuadores implementados para el minirobot, que difieren en la longitud del segmento inicial, con el primer actuador con 2 cm y el segundo con 1 cm.

Para la prueba del funcionamiento de los actuadores mostrados en las figuras 4.4.22 y 4.4.23 fue necesario sujetar el segmento grande de Kapton, como se observa en la Figura 4.4.24, ya que esto actúa como la base de soporte para el actuador, lo que le brinda rigidez a la estructura y hace más notorio a simple vista el movimiento del actuador. Para la operación del robot, dicho soporte corresponde al cuerpo del mismo, donde se localiza la circuitería de control y comunicación.

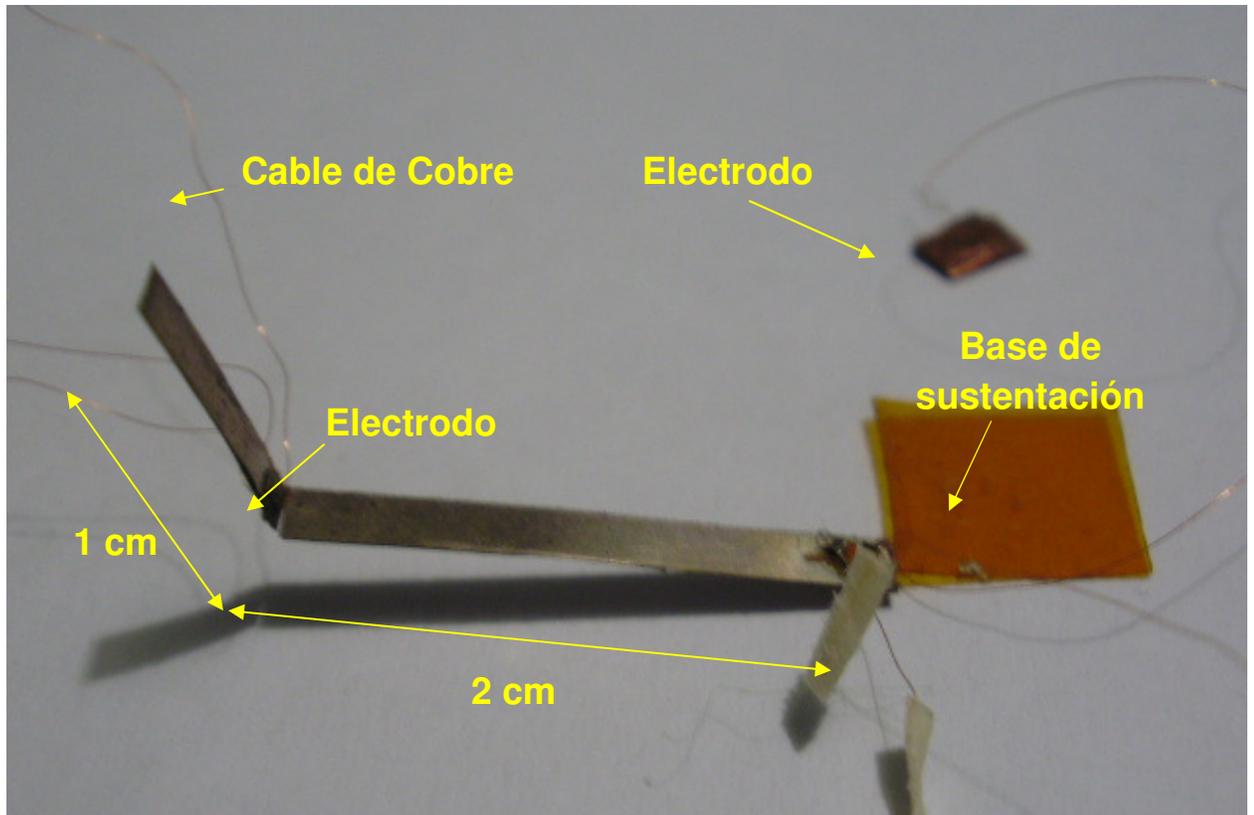


Figura 4.4.22. Imagen del actuador de posicionamiento implementado con segmento inicial de 2 cm

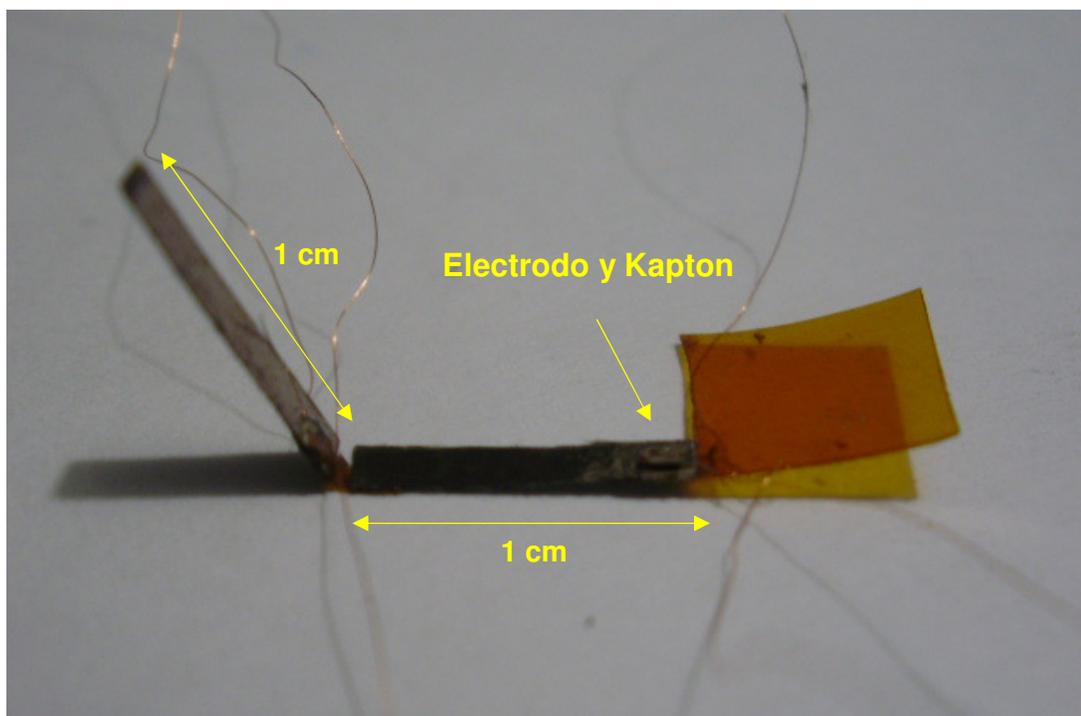


Figura 4.4.23. Imagen del actuador de posicionamiento implementado con segmento inicial de 1 cm.

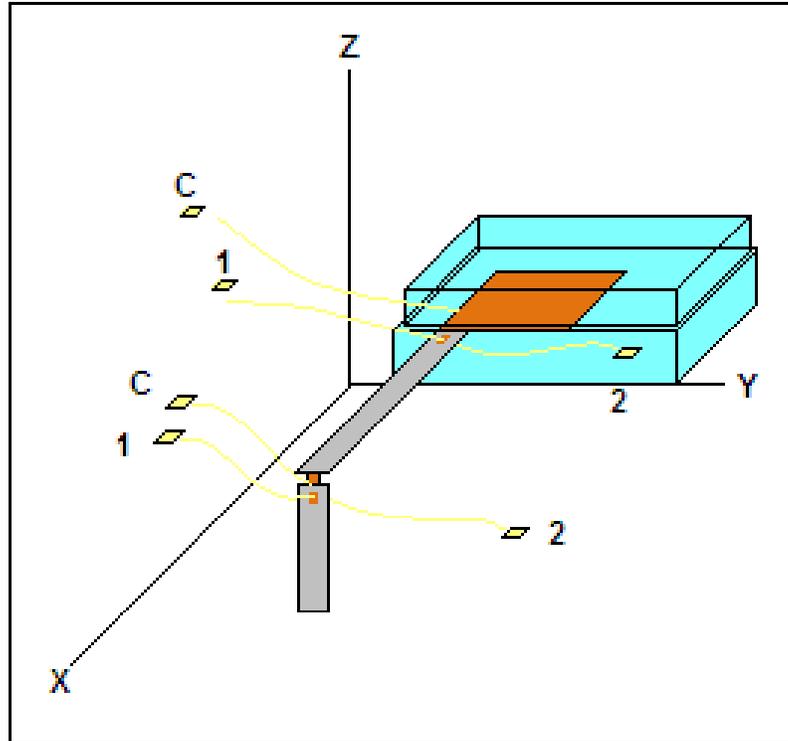


Figura 4.4.24. Alimentación de los segmentos del actuador piezoeléctrico

La Figura 4.4.24 muestra el esquema de alimentación de los segmentos para la prueba del actuador. Los contactos 1 y 2 se conectaron a un generador de funciones con una señal de $20 V_{pp}$ y se varió la frecuencia de operación con el fin de encontrar los puntos de resonancia que caracterizan a la estructura. El barrido de frecuencia del generador se realizó hasta percibir un movimiento mínimo del actuador e incluso una vibración observable en los cables de cobre. En la tabla 4.4.3 se resumen las frecuencias de resonancia encontradas para cada uno de los actuadores implementados.

Tabla 4.4.3. Frecuencia de resonancia observable obtenida para cada uno de los actuadores implementados

| Actuador | Frecuencia de resonancia (Hz) |
|------------|-------------------------------|
| Actuador 1 | 7.6 |
| Actuador 2 | 15 |

De manera alternativa, se pudo comprobar el movimiento del actuador haciendo incidir un haz laser sobre la superficie del material piezoeléctrico, el cual posee cierta

reflectividad, de manera que el movimiento causó un desplazamiento en el haz proyectado en una superficie de fondo de hasta un máximo de 2° con respecto a una línea de referencia, verificando el movimiento del actuador. En la figura 4.4.25 se observa un diagrama de esta forma alternativa en que se comprobó el movimiento del actuador.

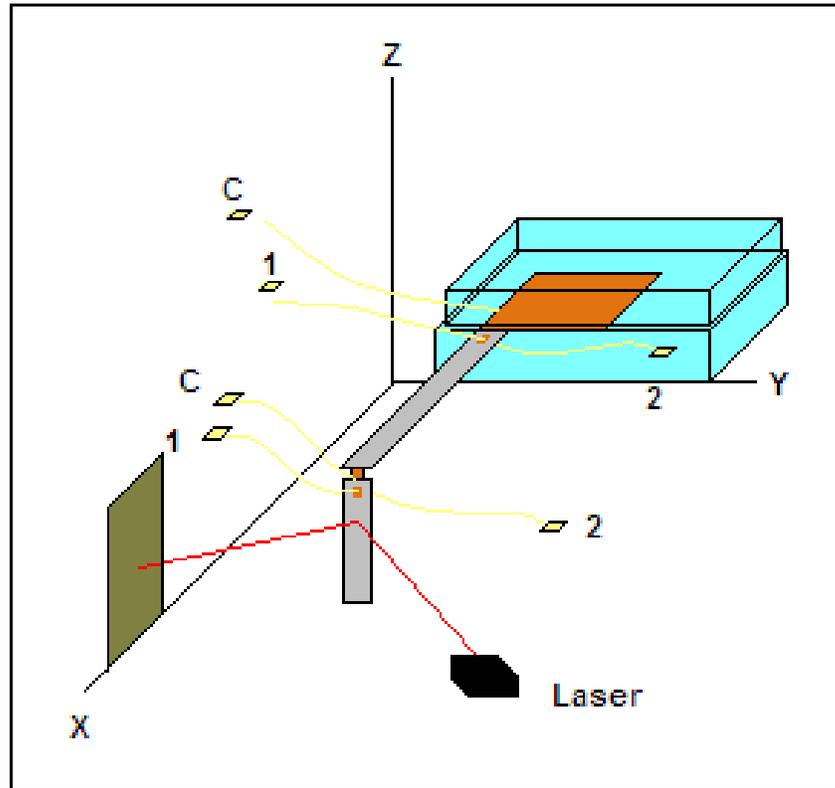


Figura 4.4.25. Diagrama de comprobación alternativa de los actuadores implementados

4.4.2 HERRAMIENTA DE CORTE

4.4.2.1 *Materiales del prototipo*

La herramienta de corte basada en una pila piezoeléctrica comprende otro de los actuadores estudiados para el minirobot. La pila piezoeléctrica se estudió como un mecanismo de movimiento vertical que pueda ser incorporado en el robot, que permitiría lograr tanto el movimiento vertical para el corte por percusión, como el posicionamiento de las agujas de prueba, completando el actuador para microposicionamiento XY. La estructura general de la pila piezoeléctrica estudiada se muestra en la Figura 4.4.26.

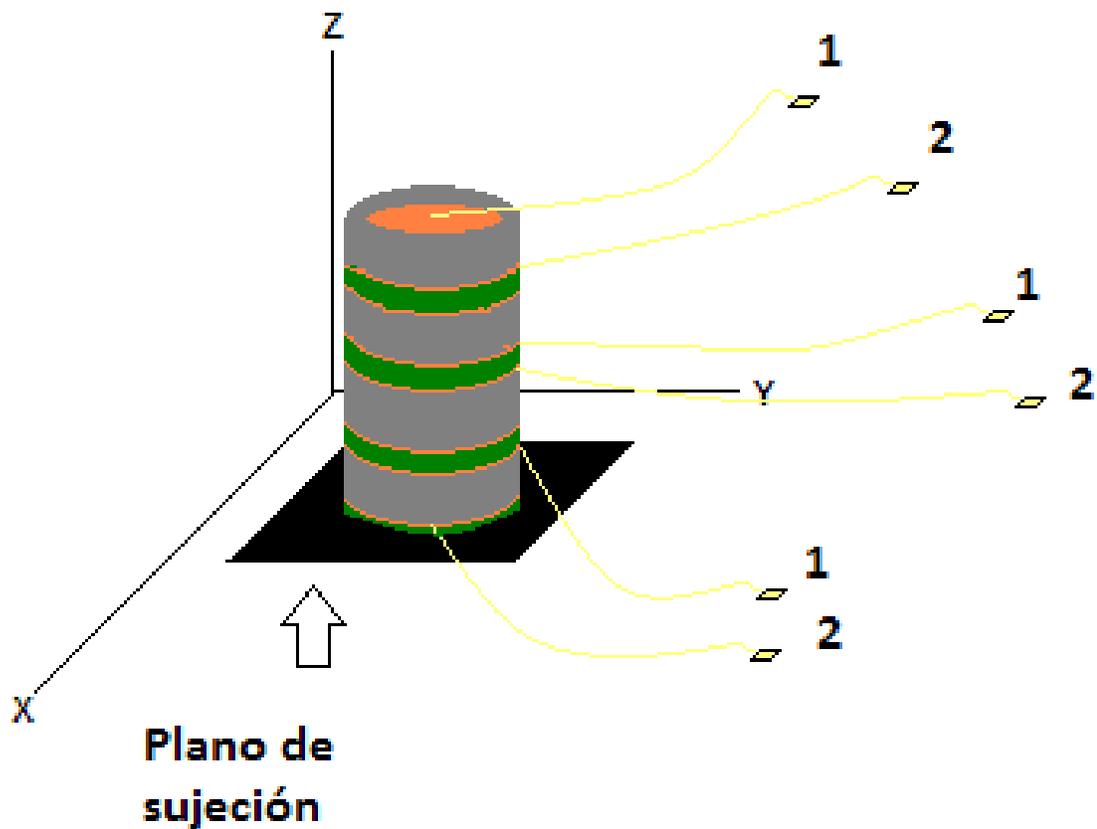


Figura 4.4.26. Diagrama general de la pila piezoeléctrica

La estructura de la pila piezoeléctrica comprende básicamente tres discos de material piezoeléctrico modelo PSI-5A4E, de la empresa Piezo Systems Inc. Estos discos tienen 0.191 mm de grosor y 3.22 mm de diámetro. Los discos son apilados uniendo cada uno entre sí, en este caso mediante un epoxy no conductor y lámina de cobre como los electrodos para aplicar la alimentación.

Las piezas de lámina de cobre son circulares y corresponden a la superficie que permite el contacto del cable con los discos piezoeléctricos y la fuente de alimentación del actuador; los electrodos de lámina de cobre tienen 2mm de diámetro.

4.4.2.2. *Ensamble del actuador de pila*

El ensamble de la pila piezoeléctrica comprende tomar cada uno de los discos de material piezoeléctrico y los segmentos de cobre circulares para apilarlos, donde cada superficie de los discos toque los contactos de cobre de manera que se aplique el

campo eléctrico necesario para la expansión del material. La sujeción entre discos se realiza mediante epoxy, lo que le da la rigidez necesaria al sistema y la sujeción entre cada elemento que comprende la pila.

Para la construcción de la pila siguió el procedimiento resumido en la figura 4.4.27. En esta figura, el piezoeléctrico se muestra de color gris, el adhesivo reposicionable de color rojo, el cobre de color naranja y el epoxy de color verde. El procedimiento se describe a continuación:

- a) Depositar el epoxy sobre el plano al que quiere sujetar la pila y que hace de punto de sujeción. Esto se muestra en la Figura 4.4.27a.
- b) Posicionar el primer contacto circular de placa de cobre correspondiente al electrodo inferior del primer disco piezoeléctrico, como se observa en la Figura 4.4.27b.
- c) Posicionar sobre el contacto de cobre un trozo circular de papel adhesivo con un diámetro de 1 mm como máscara que cubra una pequeña región de la lámina de cobre y aplique una capa delgada de adhesivo reposicionable. Esto se observa en Figura 4.4.27c.
- d) Retirar la máscara después de posicionado el adhesivo y colocación del cable de cobre sobre la superficie que quedó sin adhesivo, como se observa en la Figura 4.4.27d.
- e) Posicionar el primer disco piezoeléctrico sobre el cable y el contacto de cobre antes mencionado. Esto se presenta en la Figura 4.4.27e.
- f) Posicionar sobre la superficie superior expuesta del disco piezoeléctrico un trozo circular de papel adhesivo con diámetro de 1 mm como máscara, que cubra una pequeña región del disco y aplique una capa delgada de adhesivo reposicionable. Esto se muestra en la Figura 4.4.27f.
- g) Retirar la máscara y colocar nuevamente el segundo cable correspondiente a la extensión del electrodo superior del primer disco de la pila. Esto se ilustra en la Figura 4.4.27g.
- h) Posicionar el segundo contacto de lámina de cobre sobre el cable y el adhesivo como lo indica la Figura 4.4.27h.
- i) Depositar una capa delgada de epoxy sobre el electrodo superior del primer disco piezoeléctrico, de forma que permita unir este disco con el segundo disco piezoeléctrico de la pila, tal y como se observa en la Figura 4.4.27i.

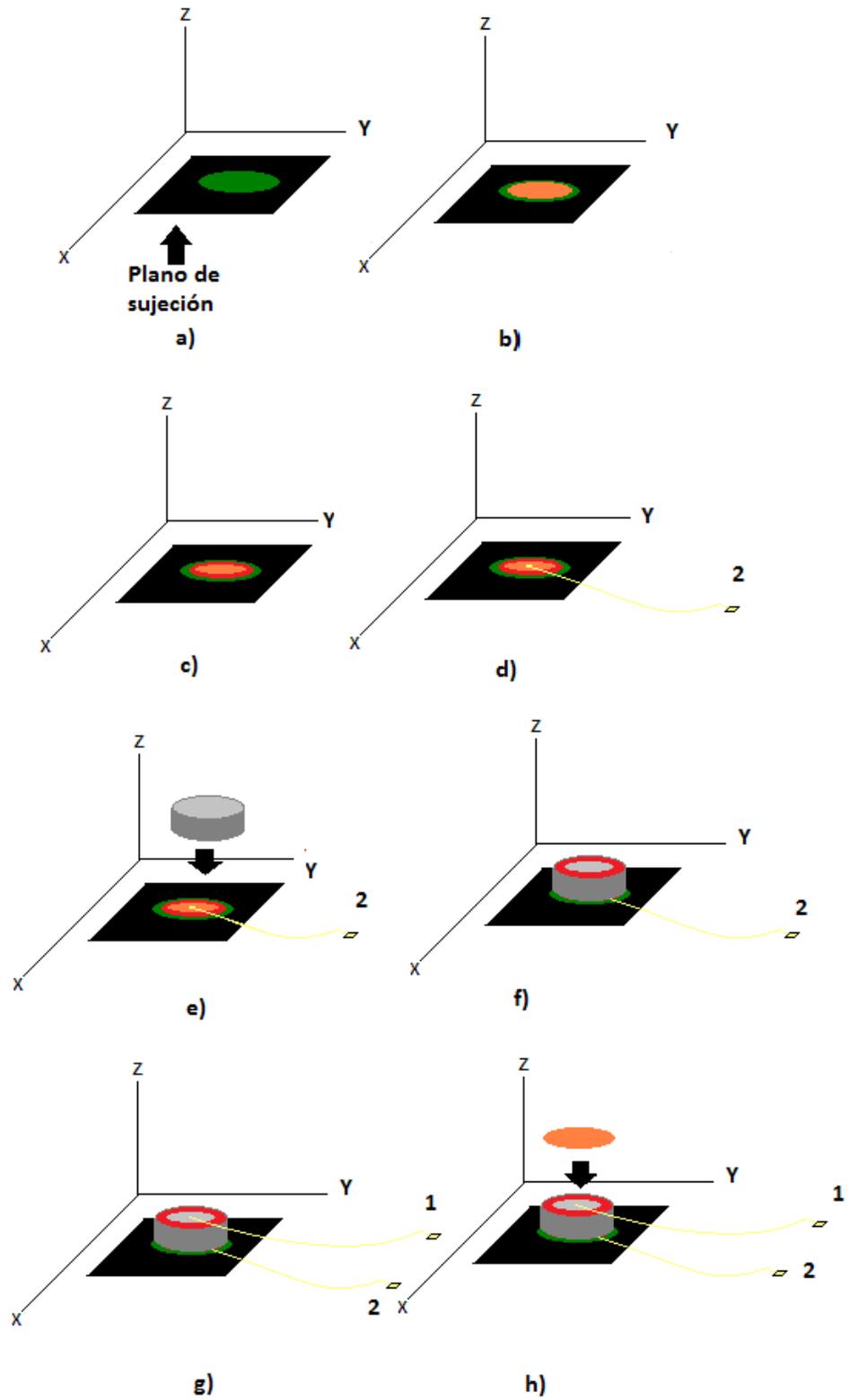


Figura 4.4.27. Diagrama del proceso de ensamble de la pila piezoeléctrica

4.4.2.3 Implementación de la pila

Una vez seguido el procedimiento de ensamble previamente detallado, se obtuvo la pila piezoeléctrica que se muestra en las imágenes de la Figura 4.4.28. En la Figura 4.4.28a se muestra una perspectiva general del actuador y los electrodos, mientras que en la figura 4.4.28b se muestra un acercamiento de la pila.

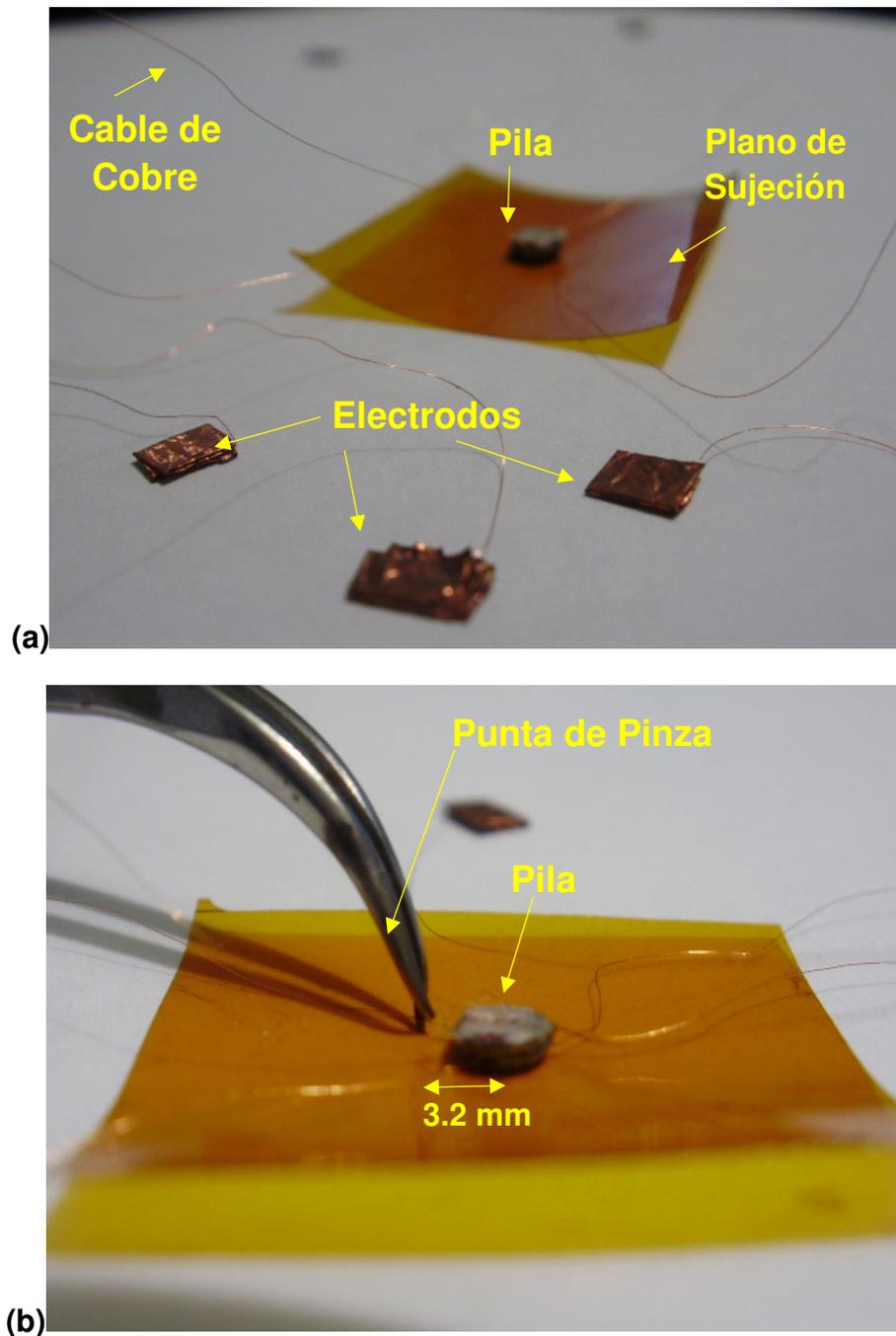


Figura 4.4.28 Imagen de la pila piezoeléctrica implementada

Una vez ensamblada la pila piezoeléctrica, se aplicó un potencial positivo correspondiente a 10 V a la terminal denotada como “1” en cada disco y la terminal de tierra en la sección denotada como “2”, con el fin de verificar su funcionamiento. Esto permite una expansión o desplazamiento de la longitud de la pila por el efecto piezoeléctrico que experimentan los discos de la pila. En la Figura 4.4.29 se muestra el diagrama que ilustra la conexión y el comportamiento esperado.

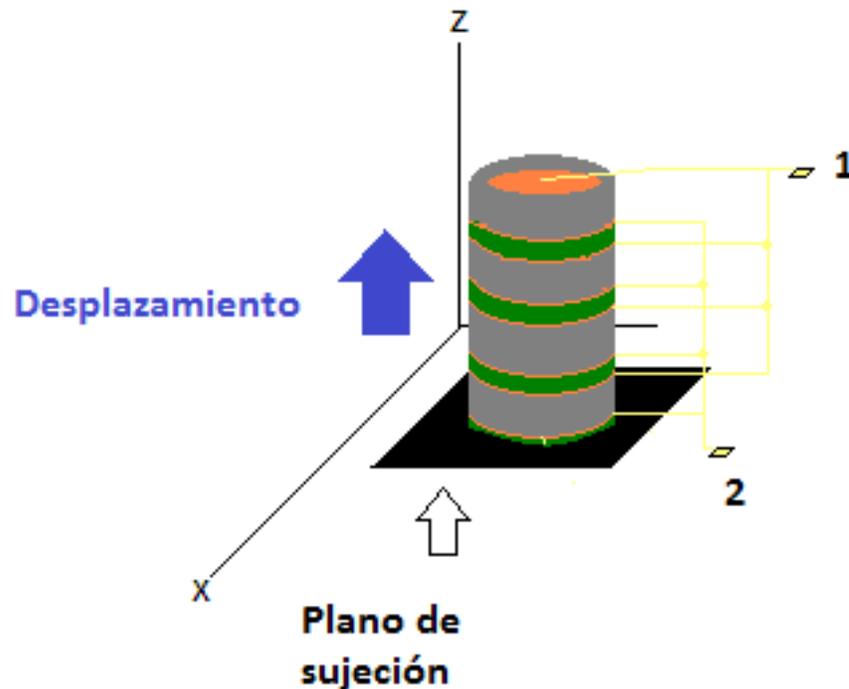


Figura 4.4.29. Diagrama de conexión de la pila piezoeléctrica y el comportamiento esperado al aplicar un potencial eléctrico

4.4.2.4 Simulación de la herramienta de corte

Para la simulación de la herramienta de corte se retomaron los resultados del proyecto anterior para continuar su análisis, que incluye también la interconexión por cortar. La figura 4.4.30 muestra las dimensiones de la sección transversal de la herramienta y el cable; la escala mostrada está en micrómetros. Se utilizan esquinas redondeadas con el fin de disminuir la cantidad de elementos en el mallado. Los rectángulos que están debajo de la punta de la herramienta de corte no tienen mayor representación en el sistema, se utilizan únicamente como referencia en el mallado para afinar la calidad del mismo en esa sección, la que es de mayor interés.

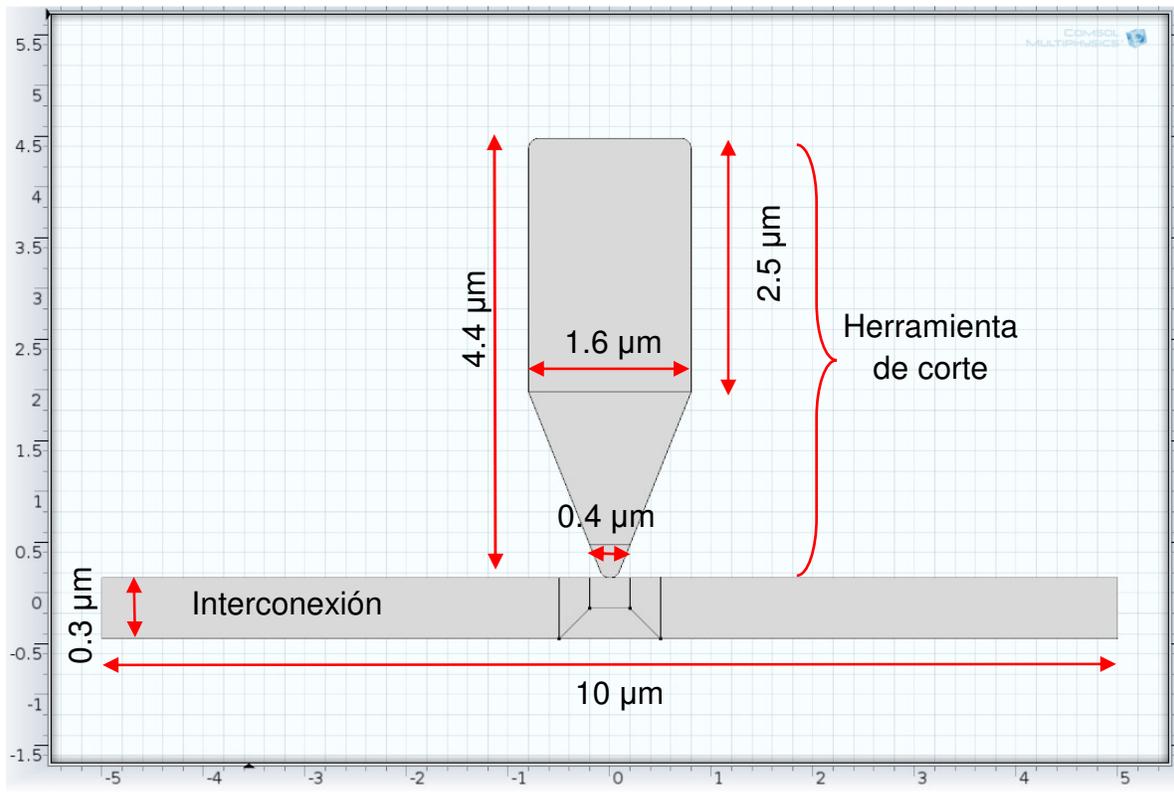


Figura 4.4.30. Geometría utilizada para la simulación de la herramienta de corte

Los materiales utilizados para la simulación fueron tungsteno en la punta y cobre en la interconexión. Como comparación, también se realizaron simulaciones con punta de diamante. La distribución de materiales se muestra en la Figura 4.4.31. Para el módulo de mecánica de sólidos, que fue el utilizado en esta simulación, se tomaron los valores de densidad, módulo de Young y la razón de Poisson disponibles en la biblioteca de materiales de COMSOL Multiphysics. Estos valores se resumen en la Tabla 4.4.4.

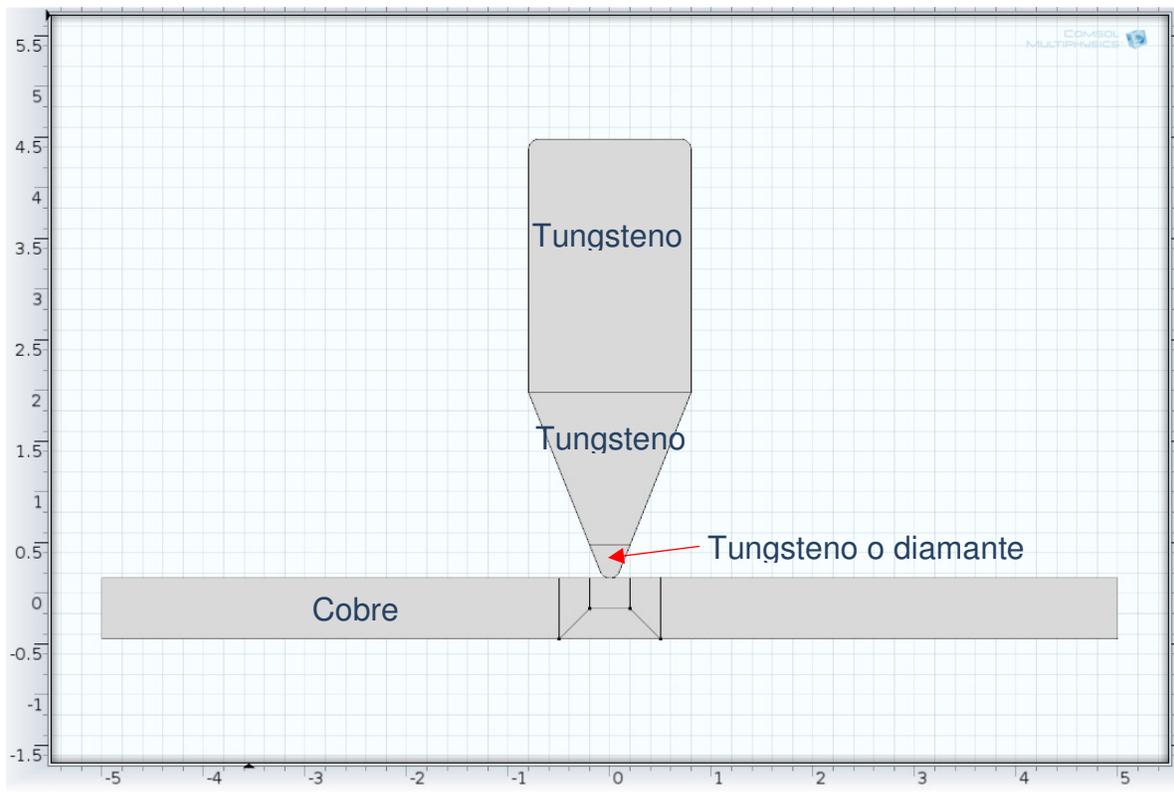


Figura 4.4.31. Asignación de los materiales para la simulación de la herramienta de corte

Tabla 4.4.4. Propiedades de los materiales utilizados para la simulación de la herramienta de corte

| Propiedad | Tungsteno | Cobre | Diamante |
|-------------------------------|-----------|-------|----------|
| Densidad (kg/m ³) | 17800 | 8700 | 3515 |
| Módulo de Young (GPa) | 360 | 110 | 1146 |
| Razón de Poisson | 0.27 | 0.35 | 0.20 |

Con el módulo de mecánica de sólidos pueden realizarse el análisis del estrés y la simular la mecánica de sólidos lineales y no lineales. Para simular esta herramienta de corte se utilizó una aproximación en dos dimensiones con el fin de reducir la cantidad de elementos y el tiempo de cómputo para el cálculo. A pesar de que la simulación es en dos dimensiones, es posible definir un grosor como si se tratase de una simulación tridimensional. En este caso el grosor corresponde al ancho de la interconexión entrando al plano de la sección transversal. Este ancho se fijó en un valor de 2 μ m, que es el ancho mínimo de la interconexión a cortar.

Al utilizarse el módulo de mecánica de sólidos se agregan de forma automática dos condiciones de dominio y una condición de frontera a la simulación. La primera condición de dominio es "*Linear Elastic Material*" el cual está relacionado con las ecuaciones para materiales sólidos elásticos y las propiedades elásticas del material, y es la condición que requiere la definición de las propiedades de los materiales resumidas en la Tabla 4.4.4. Esta condición de dominio se aplica a todos los dominios del sistema.

La segunda condición de dominio es la de condiciones iniciales, como desplazamiento o velocidad, que no existen en este caso. La condición de frontera que se agrega al inicio es la condición "*Free*", la cual es la condición de frontera por defecto. Esto indica que no hay restricciones o cargas actuando en la frontera, por lo que todas las fronteras que no se utilicen en las siguientes asignaciones quedarán definidas automáticamente de la misma manera.

Para poder accionar el sistema de forma que una fuerza se aplique a la herramienta de corte fue necesario incluir la condición de frontera "*Boundary Load*". Se utilizó una carga tipo "Total force" sobre la herramienta, como se muestra en la figura 4.4.32. Esta fuerza se divide entre el área sobre la cual se ejerce la fuerza.

También es necesario agregar una condición de frontera "*Contact Pair*" para definir el contacto entre la punta de la herramienta y la interconexión. Sin esta definición, la punta de la herramienta y la interconexión no podrían tener ninguna relación durante la simulación, a no ser que formaran parte de una misma pieza.

Al ejercer la fuerza de corte puede darse el caso de que la herramienta tienda a moverse hacia alguno de los lados de forma que se ocasione un corte inclinado. Esto puede corregirse al agregar una condición de frontera de tipo "Roller" como se indica en la Figura 4.4.32, la cual restringe el desplazamiento a cero en la dirección perpendicular a la frontera. En este caso, la herramienta sólo se debe mover en la dirección negativa del eje z, es decir, hacia la interconexión.

Por último, es necesario definir una condición que fije la posición de la interconexión para poder simular el corte; para esto se utiliza la condición de frontera "*Prescribed Displacement*" la cual define el desplazamiento en una o más dimensiones. En este caso se fijó un desplazamiento de 0 metros en el eje x y 0 metros en el eje y en la superficie inferior del cable.

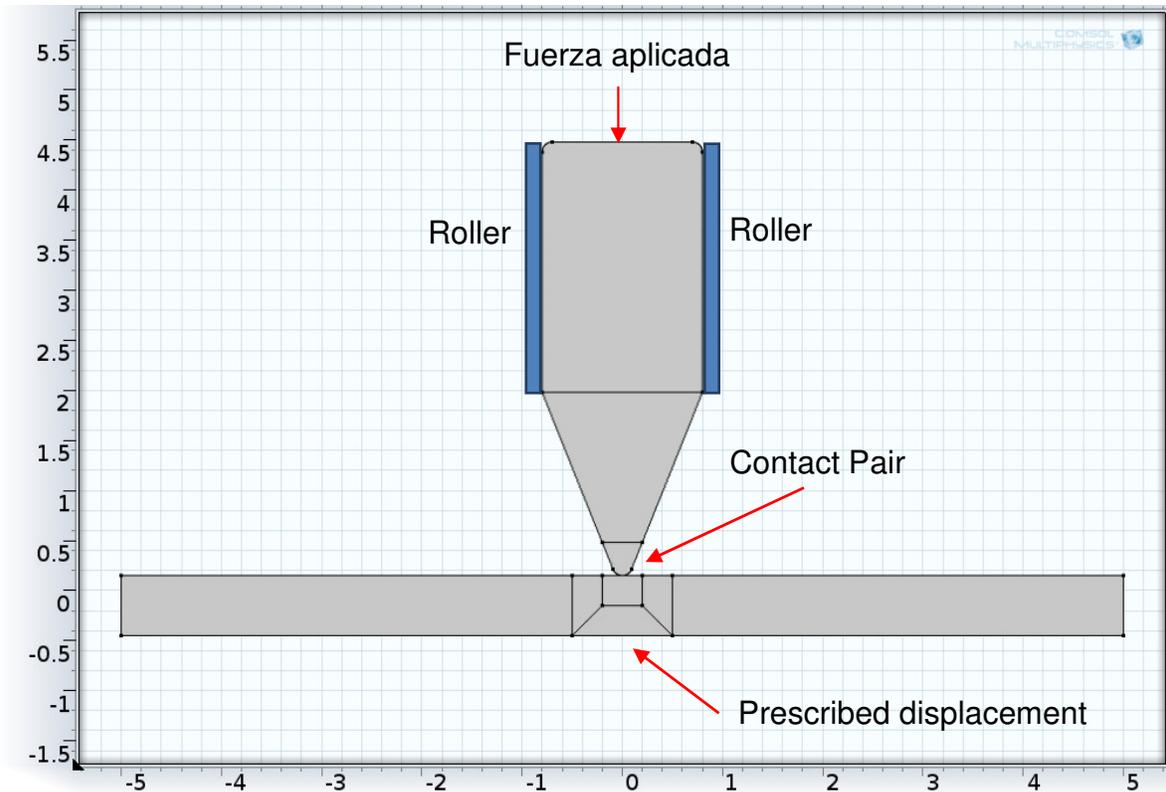


Figura 4.4.32. Asignación de condiciones de frontera

Se utilizó un mallado triangular con una distribución de tres tamaños diferentes de elemento como se muestra en la Figura 4.4.33. Para la sección de la herramienta se utilizó el tamaño extra grueso. Para la interconexión se utilizó un tamaño extremadamente fino y para la región más fina mostrada en negro en la Figura 4.4.33 se utilizó una versión modificada del mallado extremadamente fino, reduciendo el tamaño del elemento más grande de $0.1\mu\text{m}$ a $0.005\mu\text{m}$ con el fin de tener una mejor descripción de esa zona.

En la Figura 4.4.34 se muestra la distribución probabilística del mallado, la cual se considera un indicador de la calidad del mallado. En este gráfico, creado por COMSOL, eje x representa la calidad del elemento y el eje y representa el número de elementos con calidad similar. Esta figura permitió verificar la calidad de mallado, mostrando que la gran mayoría de los elementos son de tamaño adecuado para la región donde se encuentran. Esto es importante, dado que un mejor mallado reduce el error numérico intrínseco en la simulación.

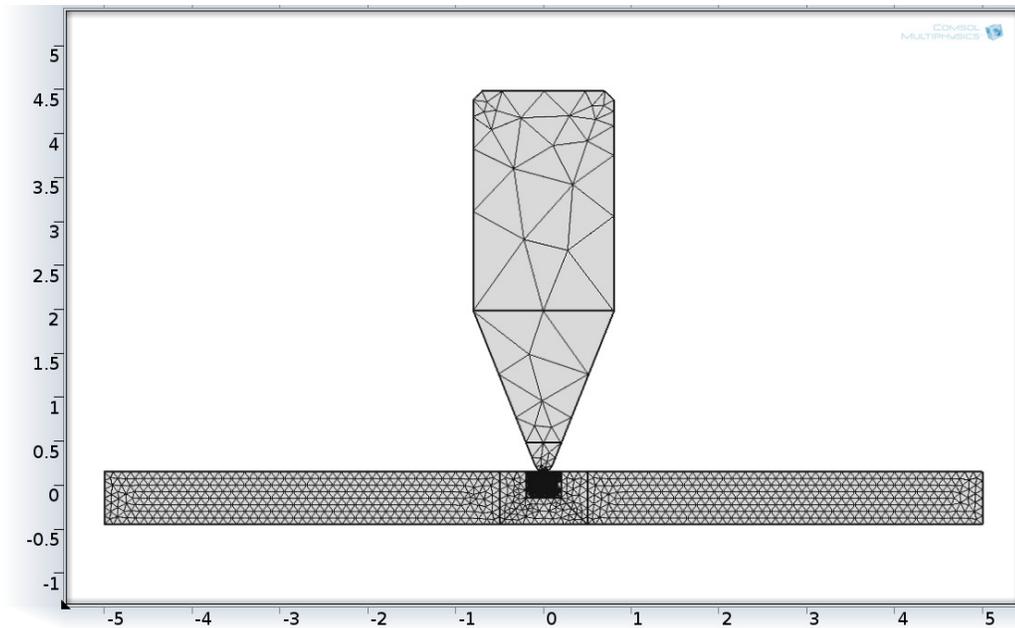


Figura 4.4.33. Mallado de la geometría

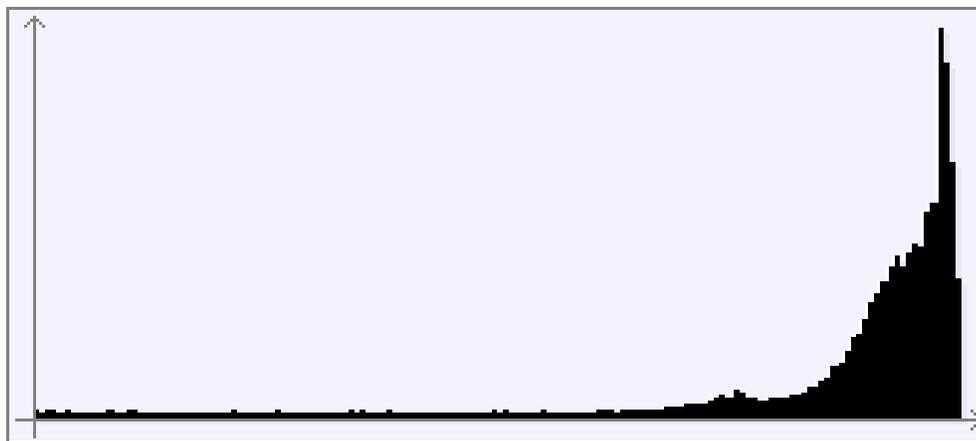


Figura 4.4.34. Distribución estadística del mallado

Como base de comparación se realizó un estudio estacionario con la herramienta con punta de diamante, en el que se fue incrementando la fuerza desde $1\mu\text{N}$ hasta llegar al valor máximo en el que la solución aún convergiera, que en este caso fue de $13,7\text{ mN}$. El desplazamiento y la tensión de von Mises obtenidos al aplicar ese valor máximo de fuerza se muestra en la Figura 4.4.35. En estas condiciones se logra un desplazamiento máximo de la herramienta de 159 nm en la interconexión. El signo negativo indica la dirección del desplazamiento.

La máxima tensión de von Mises en la punta fue de $57,44\text{ GPa}$. La Figura 4.4.36 muestra cómo la herramienta presiona la interconexión. Se observa que la tensión

mecánica en el material sobrepasa el límite elástico del cobre (70 MPa) y la tensión de ruptura (220 MPa), de manera que se obtiene deformación plástica y se observa una reducción permanente del espesor de la interconexión, indicando que se ha alcanzado la zona de estricción y con ello que el material está siendo forzado hacia el corte. COMSOL Multiphysics no puede representar el corte, dado que esto significaría romper el mallado, sin embargo el valor de tensión mecánica obtenida muestra la tendencia al corte.

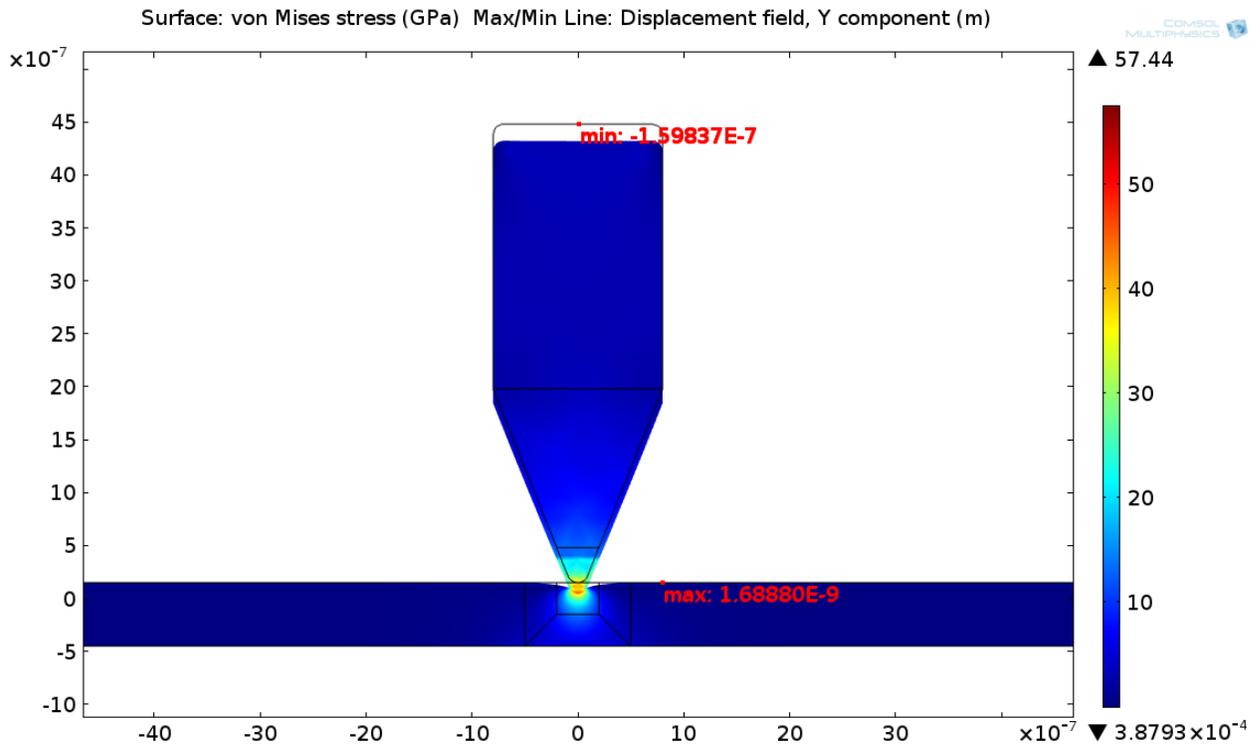


Figura 4.4.35. Análisis de von Mises y desplazamiento máximo de la herramienta de corte con punta de diamante

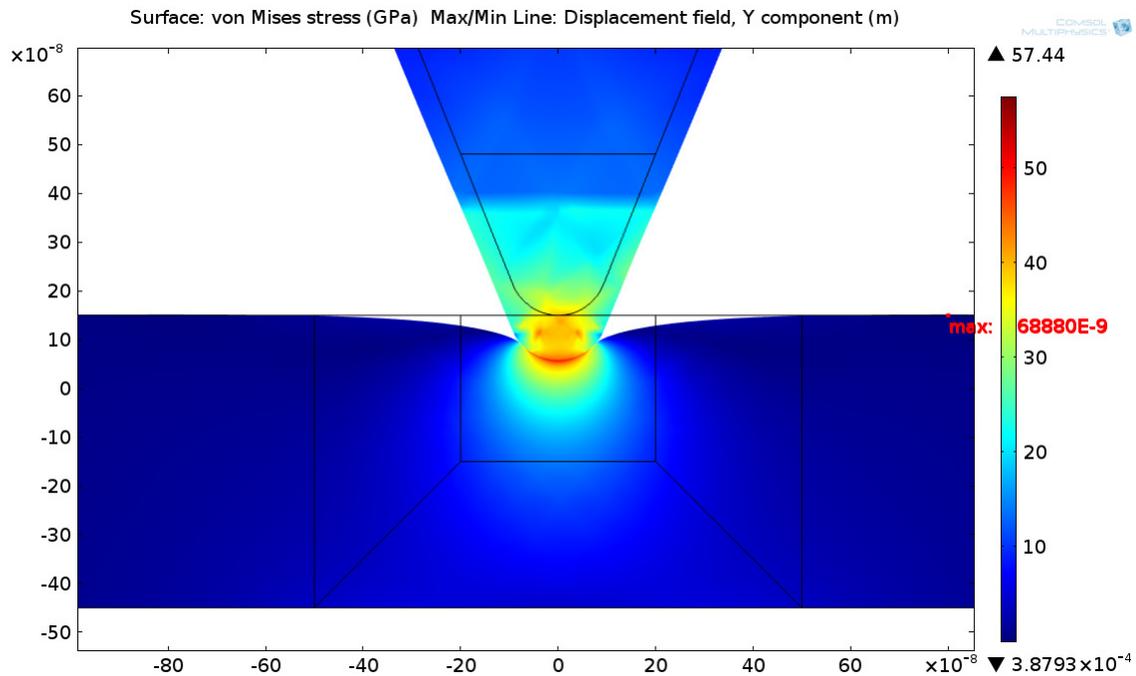


Figura 4.4.36. Acercamiento de la figura 4.4.35 en la zona de corte con punta de diamante

Como es de esperar, las pruebas con punta de diamante arrojaron mejores resultados de deformación del material de interconexión en comparación con los obtenidos con punta de tungsteno. La mayor diferencia de características de los materiales es el valor del módulo de Young.

Al sustituir la punta de diamante por una punta de tungsteno, la fuerza máxima que pudo aplicarse con la herramienta antes de que la simulación empezara a divergir es de 1.3mN, en comparación con 13.7 mN con la punta de diamante. Con la punta de tungsteno se obtiene un desplazamiento máximo de 2nm. Esto se muestra en las figuras 4.4.37 y 4.4.38.

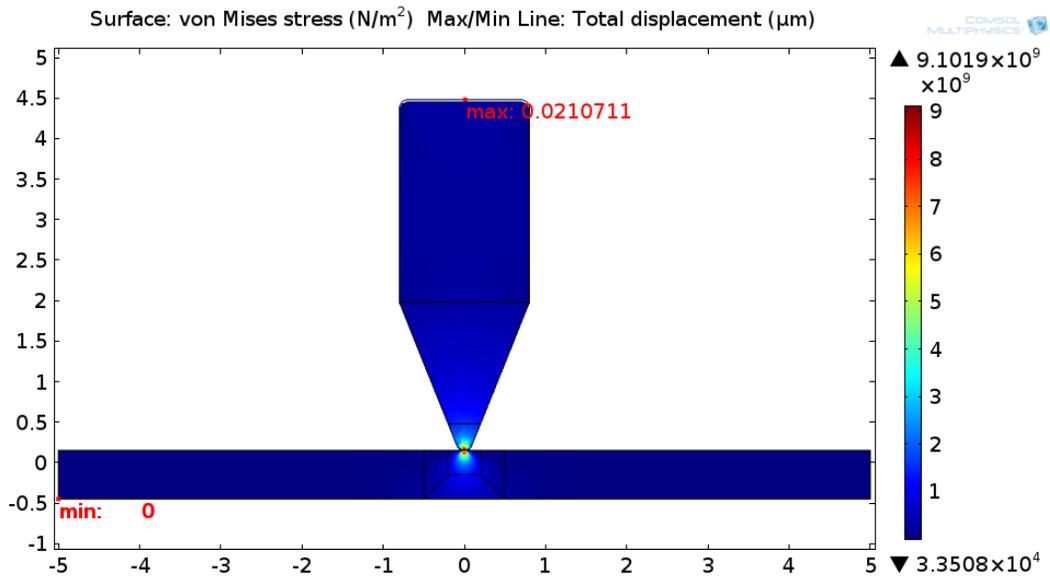


Figura 4.4.37. Análisis de von Mises y desplazamiento máximo con punta de tungsteno

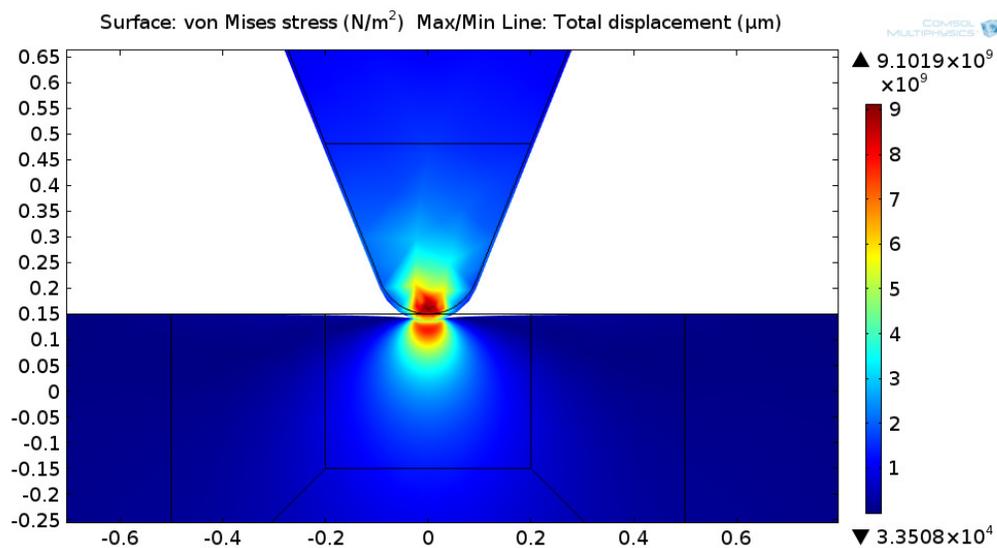


Figura 4.4.38. Acercamiento de la figura 4.4.37

Como una aproximación a la simulación del corte con punta de diamante, se realizó la simulación de un segundo golpe de la herramienta removiendo aproximadamente de la geometría de la interconexión la parte deformada hasta llegar a la profundidad máxima de corte. En este caso, la fuerza máxima que se pudo aplicar antes de divergir fue de 4mN con un desplazamiento máximo adicional fue de 38.8 nm. Esto se muestra en las figuras 4.4.39 y 4.4.40.

Con base en esta información, puede decirse en caso de tener una punta de diamante, después de dos golpes de la herramienta el espesor de la interconexión se ha reducido a 102.2nm.

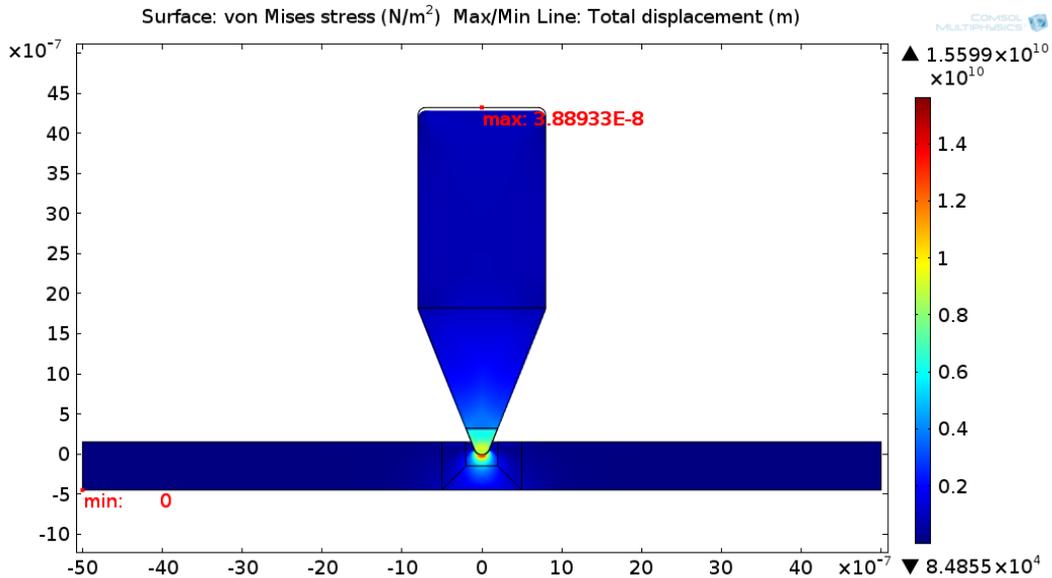


Figura 4.4.39. Análisis de von Mises y desplazamiento máximo con punta de diamante tras un segundo golpe de la herramienta

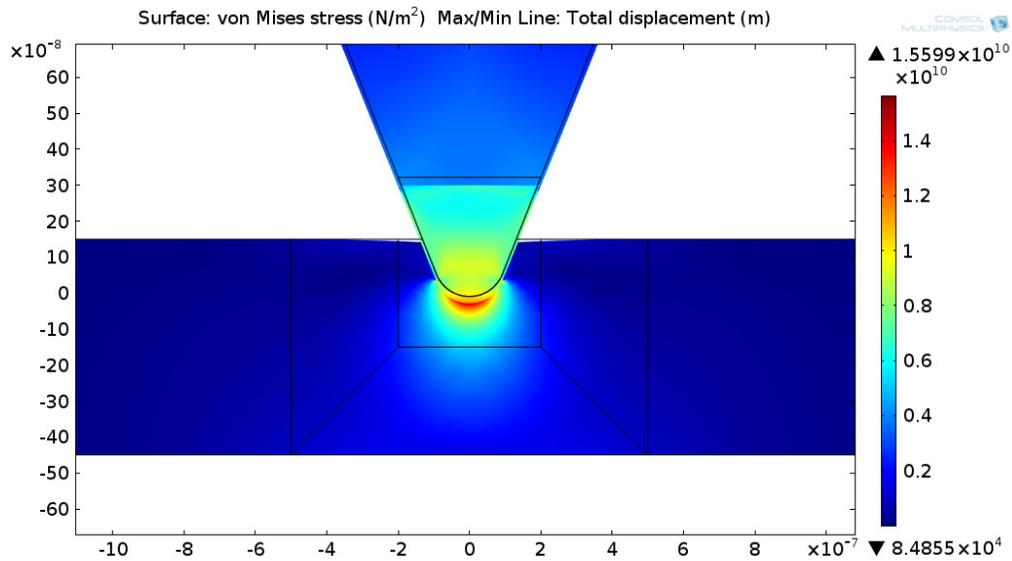
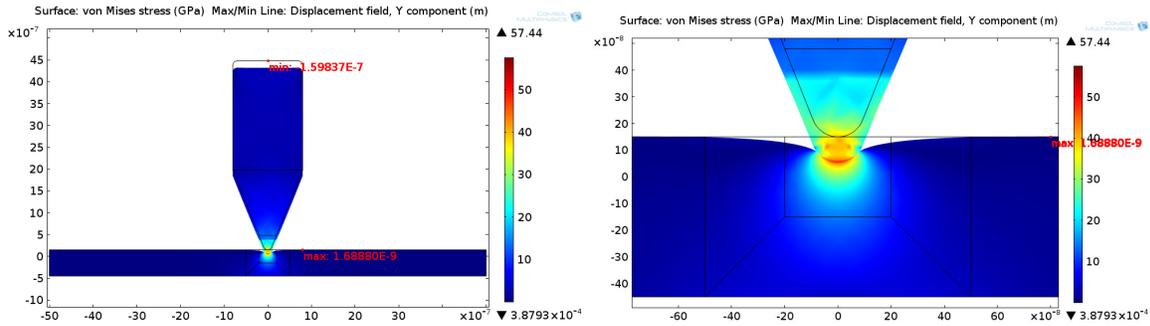


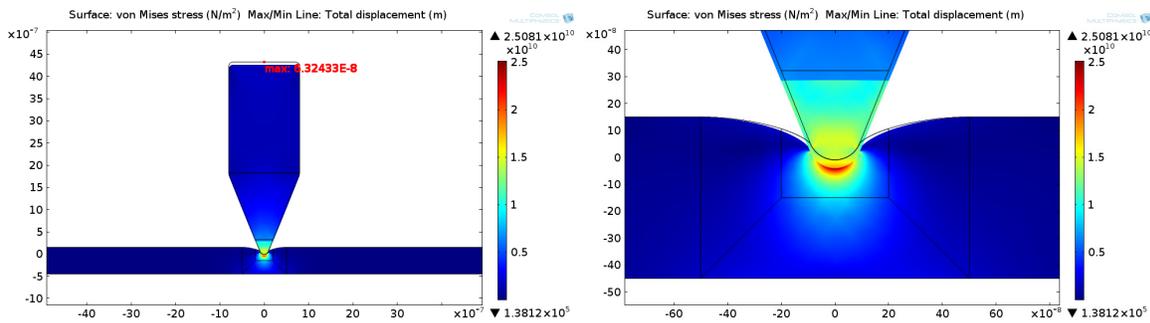
Figura 4.4.40. Acercamiento de la figura 4.4.39

Tras simular el segundo golpe de la herramienta de corte, se simuló la secuencia completa de corte para determinar cuántos golpes de la herramienta serían necesarios para completar un corte de 300nm, el cual es el espesor de las interconexiones a

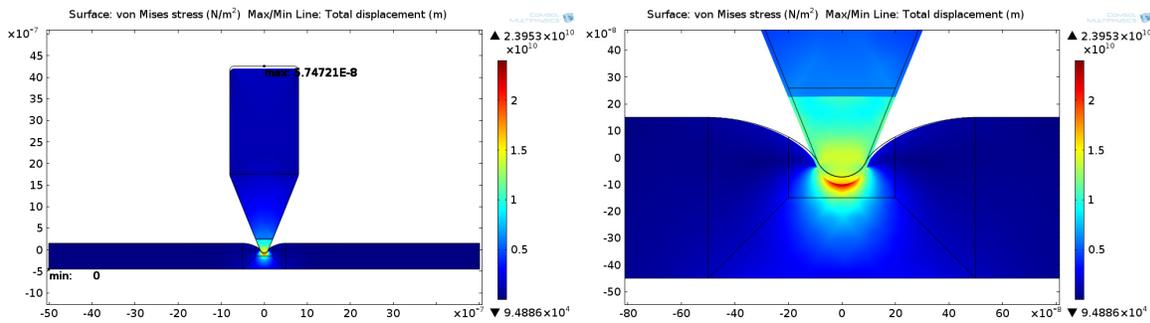
cortar. Esta secuencia de simulaciones permitió determinar que se necesitan al menos 7 golpes de la herramienta con una fuerza entre 6 y 7.5 mN para lograr interrumpir la interconexión. La secuencia de simulaciones se muestra en la Figura 4.4.41. En la Figura 4.4.41 las imágenes de la izquierda muestran el análisis de von Mises y las de la derecha un acercamiento a la zona de corte.



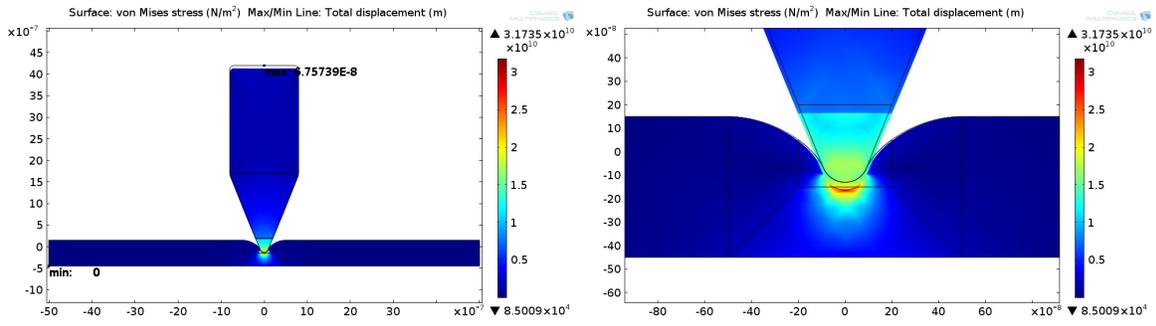
a) Primer golpe de la herramienta



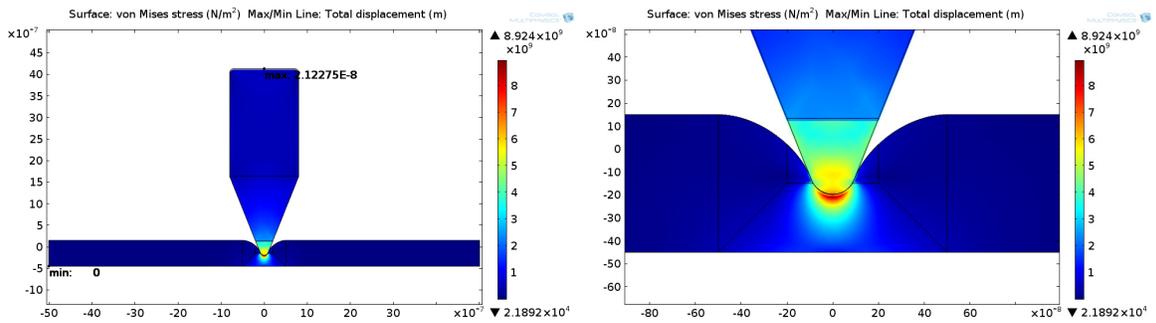
b) Segundo golpe de la herramienta



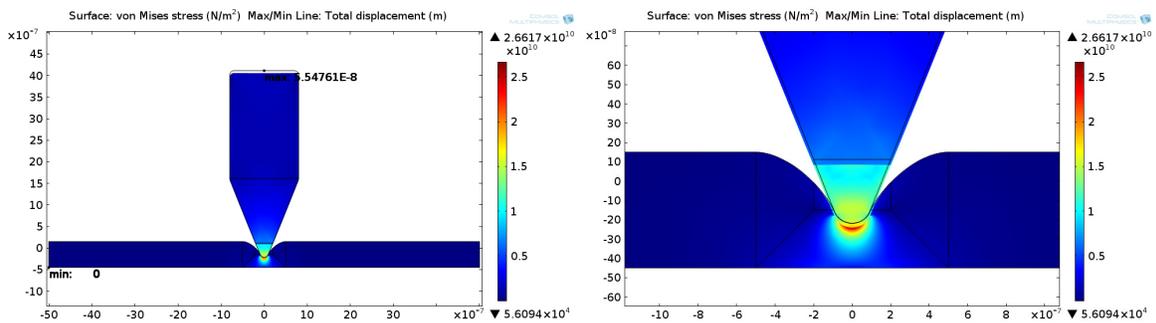
c) Tercer golpe de la herramienta



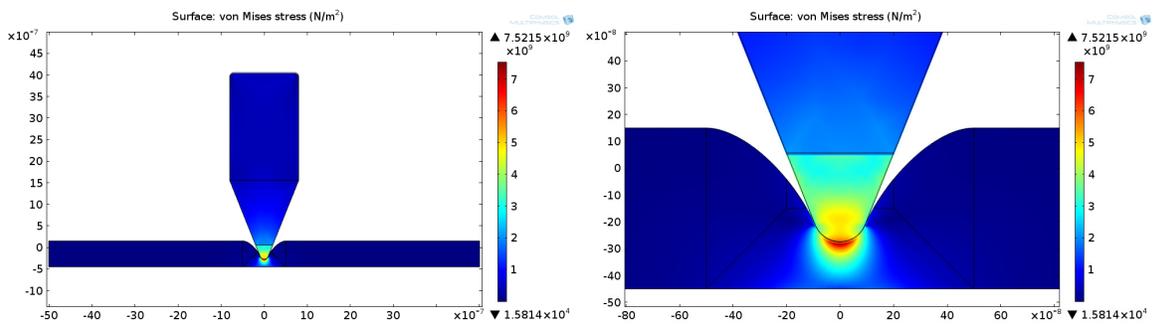
d) Cuarto golpe de la herramienta



e) Quinto golpe de la herramienta



f) Sexto golpe de la herramienta



g) Séptimo golpe y último golpe de la herramienta para completar el corte

Figura 4.4.41. Secuencia de simulaciones para aproximar el corte de la interconexión.

4.5 SOFTWARE Y ENSAMBLE

Investigador: Milton Villegas Lemus, Paola Vega Castillo, Marta Vílchez Monge, Aníbal Coto Cortez, Pablo Alvarado Moya

Estudiantes: Juan José Montero Rodríguez, William Quirós Solano, Taigin Acón Garro, Pablo Núñez Morán, Fabián Zamora Ramírez, Agustín Meneses Fuentes, Edgar Fernández, Sergio Garro Cabezas, Vianney Monestel, Alejandro Córdoba Meneses, Juan Carlos Rivera Elizondo

4.5.1. Ensamble del minirobot

Para el ensamble y prueba del minirobot se recurrió al diseño de un circuito impreso (PCB) utilizando los componentes según las especificaciones eléctricas y el tamaño disponible en el mercado. Con el fin de lograr un circuito impreso pequeño y liviano se recurrió a componentes de montaje superficial siempre que estuvieran disponibles. El diagrama esquemático del diseño del PCB se muestra en la figura 4.5.1 y el correspondiente layout en la figura 4.5.2.

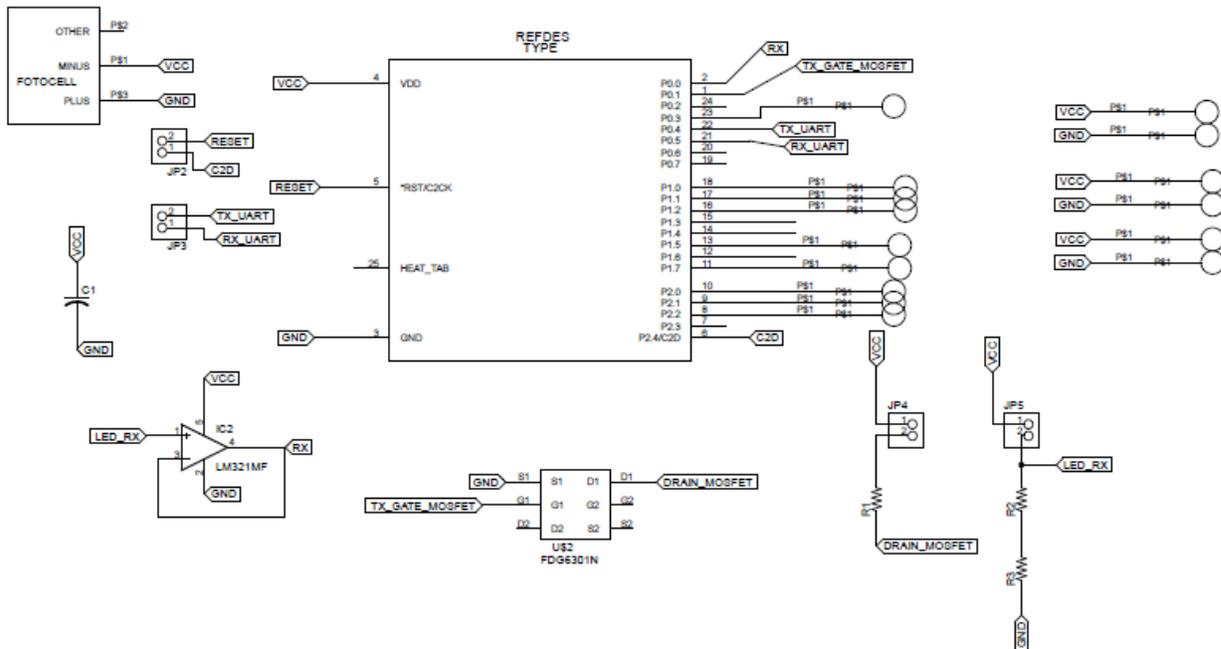


Figura 4.5.1. Diagrama esquemático de conexiones del PCB en su diseño final

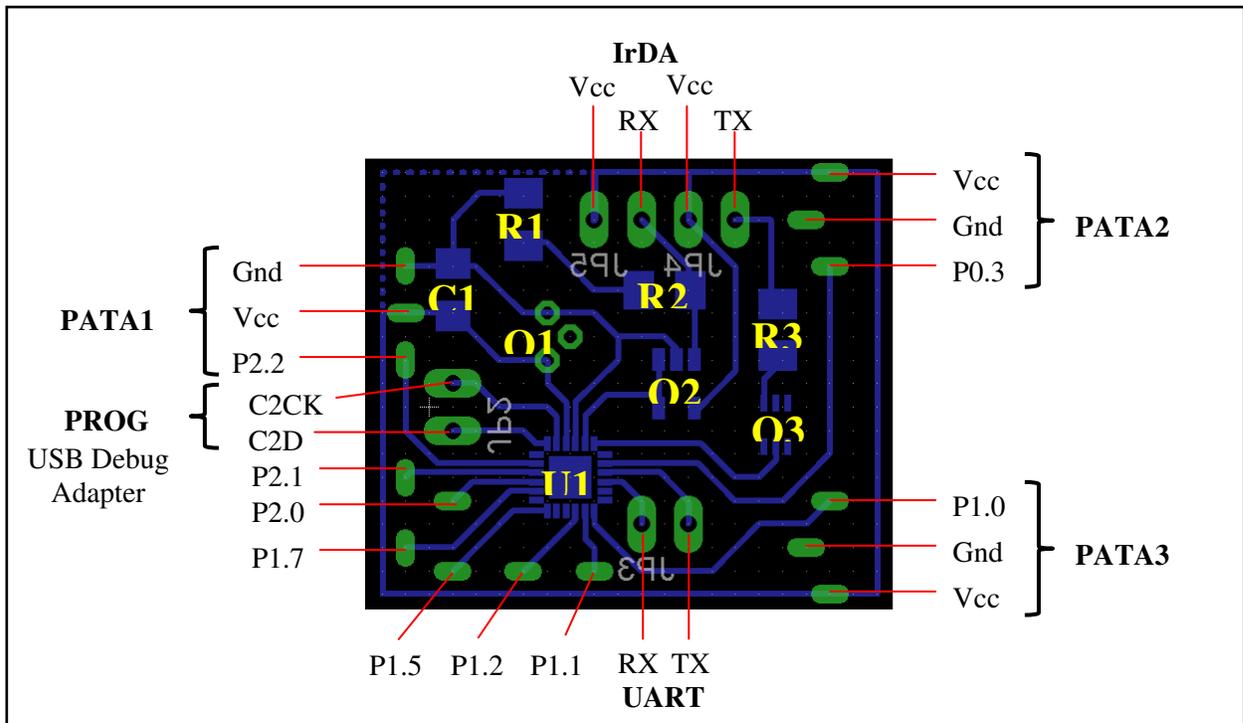


Figura 4.5.2. Diagrama de conexiones (layout) del PCB en diseño final

Los componentes electrónicos incluido en el circuito impreso se muestran en la Tabla 4.5.1.

Tabla 4.5.1. Componentes electrónicos incluidos en el prototipo del minirobot

| Símbolo | Componente | Descripción |
|---------|------------------|--------------|
| R1 | Resistencia | 330kΩ |
| R2 | Resistencia | 680kΩ |
| R3 | Resistencia | 470kΩ |
| C1 | Condensador | N.D. |
| Q1 | Fotocelda | N.A. |
| Q2 | Operacional | LM321MF/NOPB |
| Q3 | MOSFET | FDG6301N |
| U1 | Microcontrolador | C8051F338-GM |

El circuito impreso así como el stencil para la conexión de los componentes de montaje superficial fue fabricado por la empresa Leiton en Alemania. Para realizar la conexión se utilizó la máquina de ensamble conocida como máquina de “pick and place” del Instituto de Nanoelectrónica de la Universidad Técnica Hamburg-Harburg. En este caso, el procedimiento de soldado consiste en los siguientes pasos:

1) Preparación de la pasta de soldadura

Como material para la soldadura se utilizó la pasta de soldadura libre de plomo SN96.5/Ag3/Cu0.5/F-SW32 de marca Paggen Werkzeugtechnik GmbH. Para su preparación debe primeramente sacarse del refrigerador y dejarse 12 horas a temperatura ambiente. La pasta se revuelve cortamente en el frasco para suavizarla un poco antes de su aplicación con el stencil.

2) Aplicación de la pasta de soldadura

En este paso se coloca el circuito impreso en una base con sujetadores ajustables con el fin de mantenerlo quieto durante la aplicación de la pasta. El stencil metálico se coloca en un bastidor ajustable y se ajusta la posición del impreso para que los pads donde deben conectarse los componentes de montaje superficial queden alineados con las aberturas del stencil. Una vez fijada la posición del impreso, se utiliza una paleta para extraer pasta de soldadura del frasco contenedor y se coloca en la cercanía de las aberturas del stencil. Posteriormente se utiliza un squeegee para aplicar la pasta, tal como se aplica pintura al negativo en el proceso de serigrafía. Los utensilios necesarios para aplicar la pasta se muestran en la Figura 4.5.3.

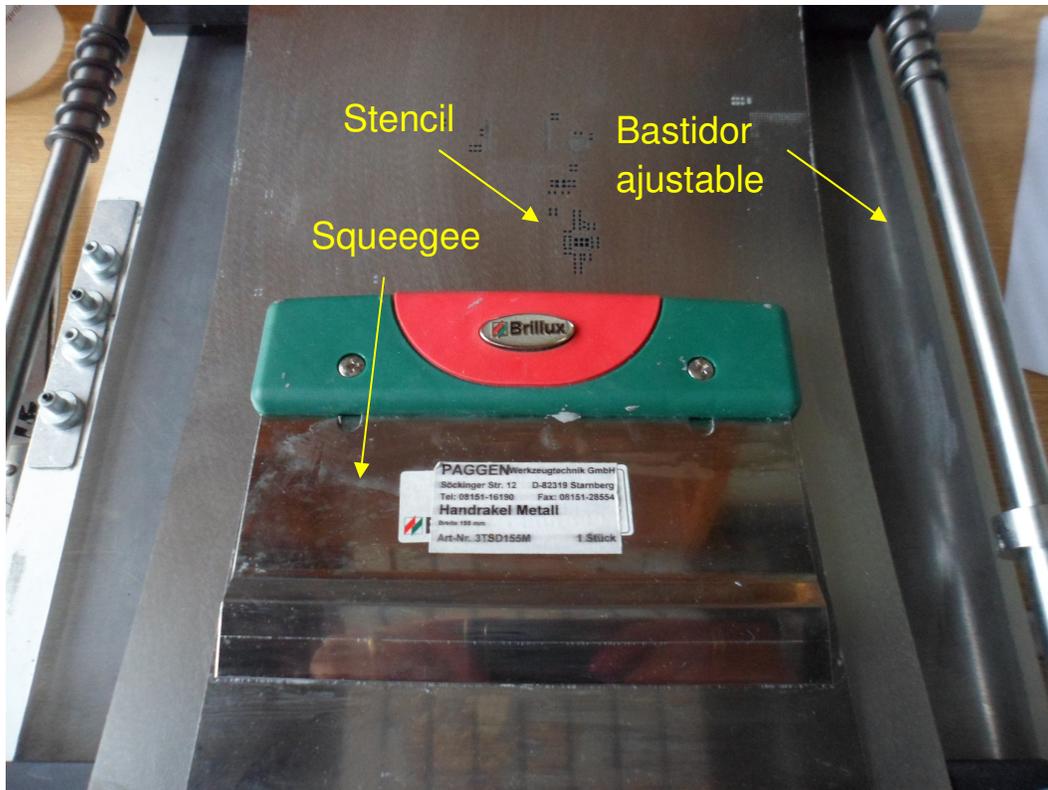


Figura 4.5.3. Utensilios para aplicación de la pasta de soldadura

3) Sujeción y posicionamiento de los componentes

En este paso se colocan los componentes en los repositorios provistos para este efecto en la máquina de ensamble modelo EXPERT marca ESSEMTEC mostrada en la figura 4.5.4. El componente de montaje superficial se toma con ayuda de un brazo mecánico en cuyo extremo se encuentra una boquilla succionadora, como se muestra en la figura 4.5.5. El brazo se dirige hacia el circuito impreso sobre la región donde debe colocarse el componente y en la cual se encuentra aplicada la pasta de soldadura. Como se muestra en la figura 4.5.6, con ayuda de una cámara acoplada en el brazo mecánico puede observarse la imagen ampliada de la región donde se debe conectar el componente. Una vez alineadas las patillas del componente con los pads con pasta de soldadura, se procede a bajar el componente y a suspender la succión, de forma que queda conectado. Esta operación se repite para cada componente a soldar.

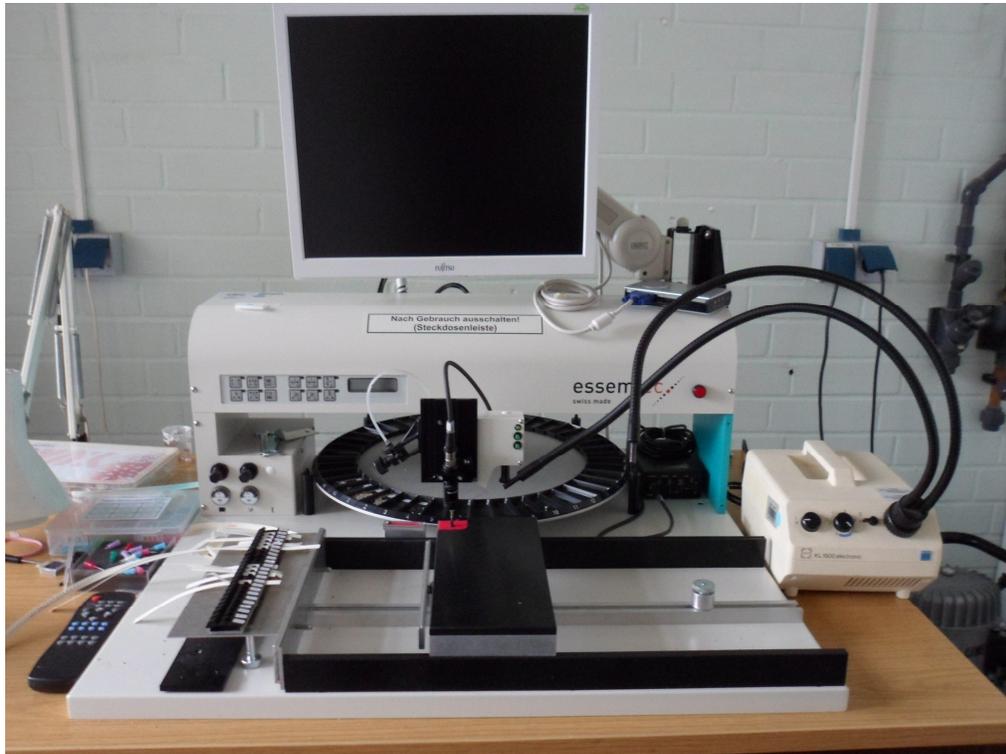


Figura 4.5.4. Máquina de ensamble

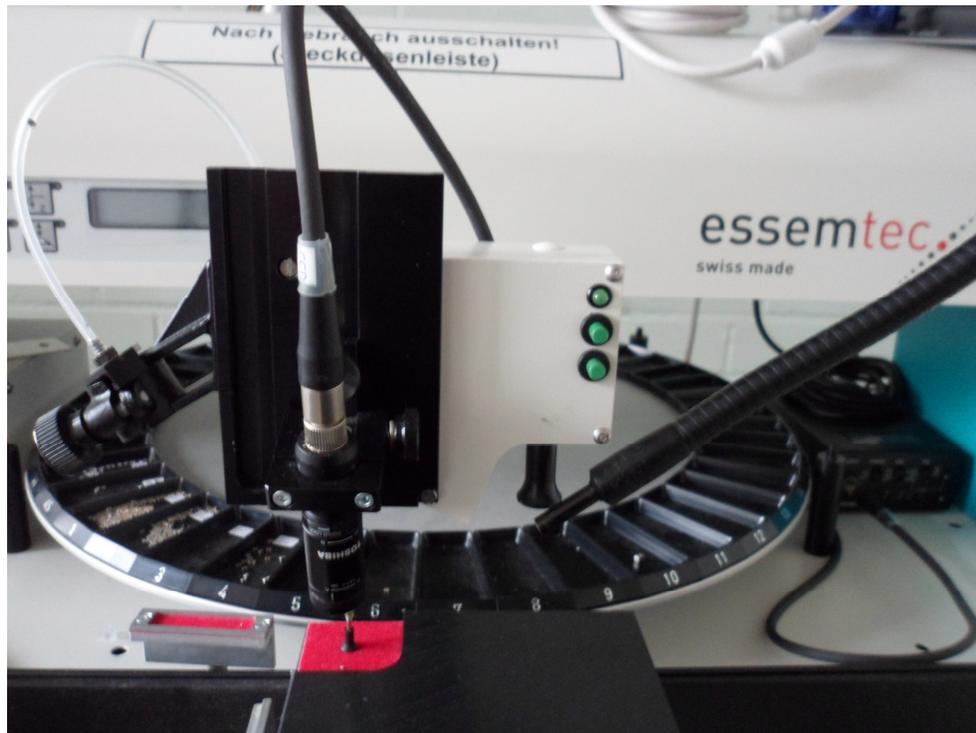


Figura 4.5.5. Repositorio de componentes y brazo de vacío de la máquina de ensamble

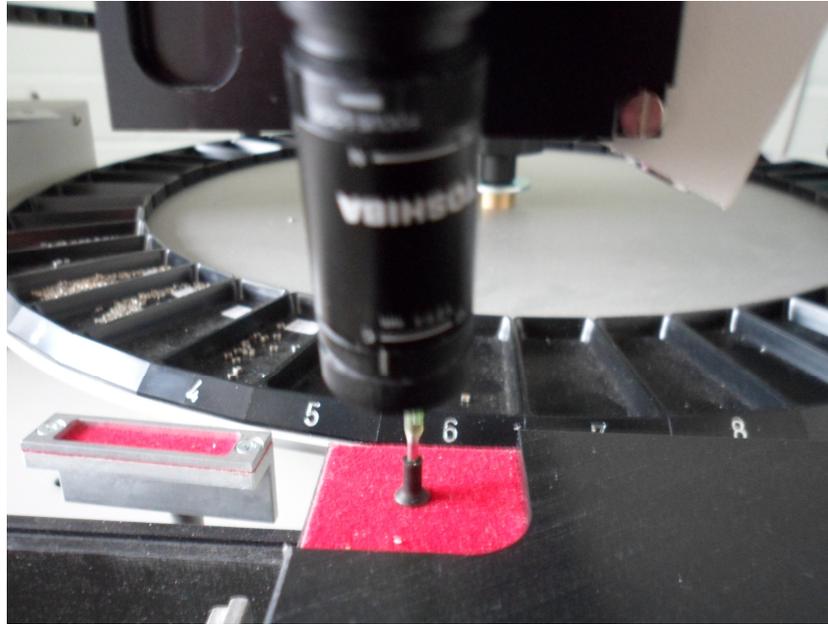


Figura 4.5.6. Acercamiento del brazo de vacío y la cámara de la máquina de ensamble

4) Curado de la soldadura

Al final de paso 3 la soldadura aún está suave. El proceso de soldado se completa con el curado de la soldadura. Luego de colocar los componentes con la máquina de ensamble, se enciende el horno de curado RO160BF Konvektions Reflow Ofen corriendo el programa de eliminación de humedad. Posteriormente se fija el circuito impreso soldado en una base que se introduce al horno, y el circuito con los componentes se hornea a 60°C durante 20 minutos para curar la soldadura y con ello volverla sólida. De esta forma se completa el proceso de conexión de los componentes al circuito impreso.

Las figuras 4.5.7 y 4.5.8 muestran el prototipo ensamblado, mientras que la Figura 4.5.9 muestra las funciones electrónicas incluídas en el mismo.

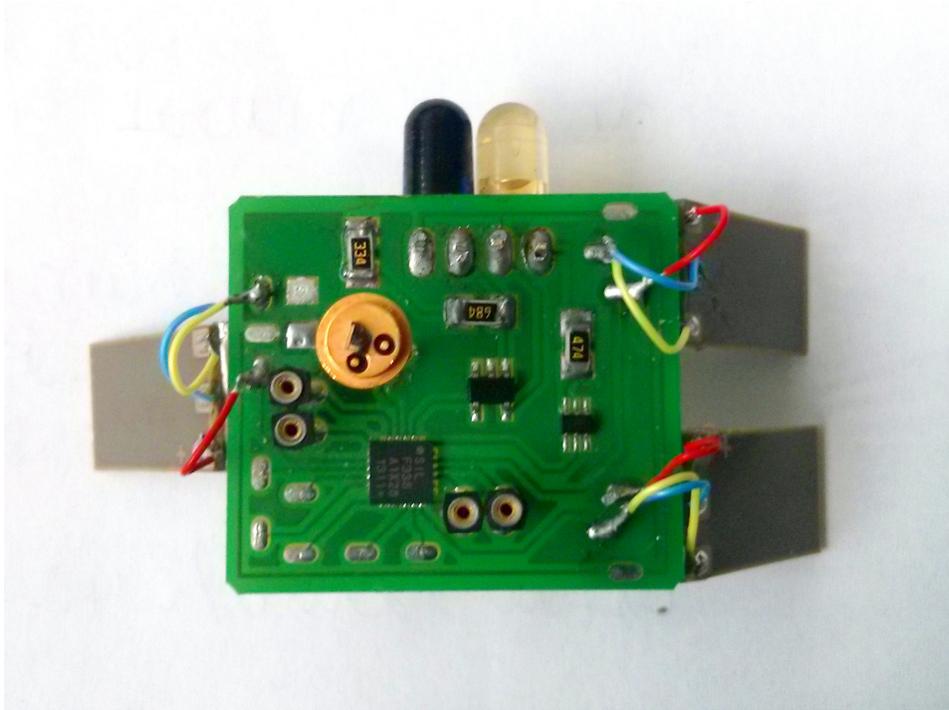


Figura 4.5.7. Vista superior del prototipo del minirobot

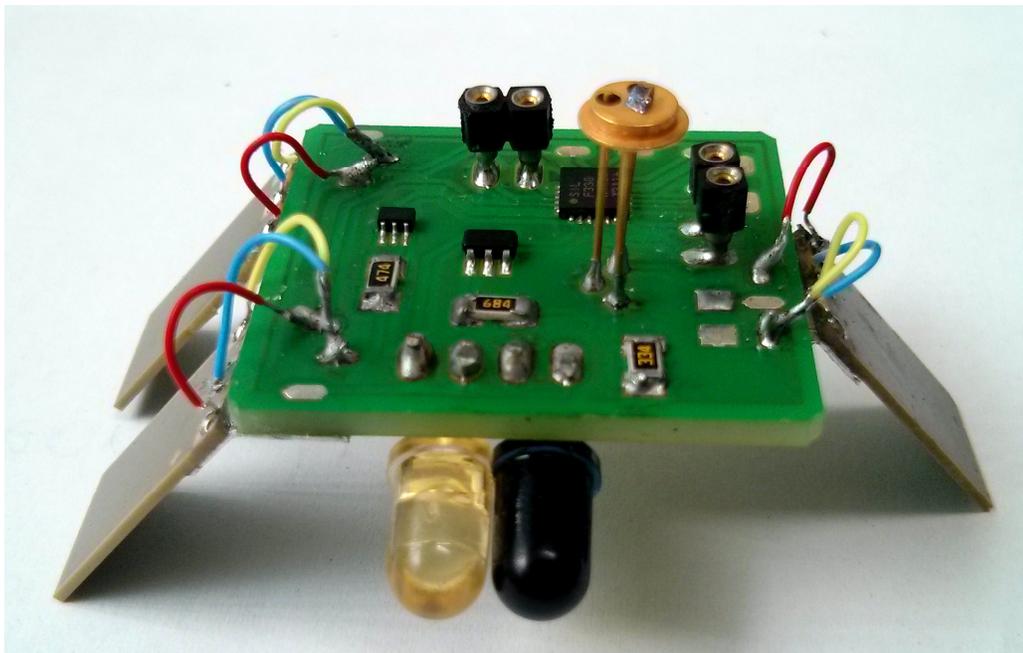


Figura 4.5.8. Vista frontal del prototipo del minirobot

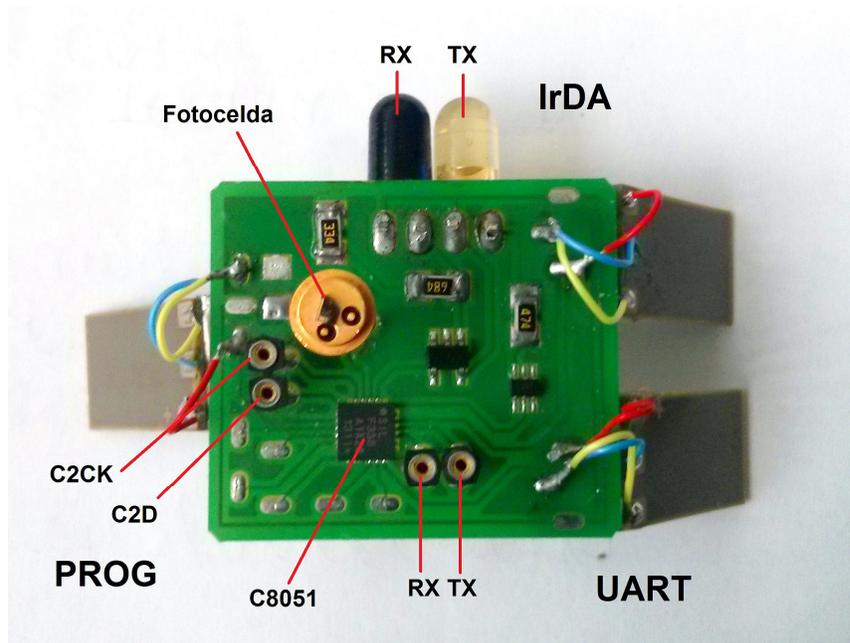


Figura 4.5.9. Distribución física de componentes y funciones electrónicas implementadas en el prototipo del minirobot

Para futuras pruebas del minirobot, el microcontrolador C8051F338 instalado en el robot se puede programar a través de los pines C2D y C2CK por medio del protocolo C2. Para este fin se debe utilizar el USB Debug Adapter de Silicon Laboratories Inc. y la herramienta de software Silicon Laboratories IDE. Las conexiones mínimas del programador se muestran en la Tabla 4.5.2. El robot debe estar alimentado de manera externa con +3.3V DC en el momento de la programación. El adaptador USB Debug Adapter no suministra la tensión de alimentación de manera interna. El pin 1 se utiliza como entrada de referencia.

Tabla 4.5.2. Conexiones del programador

| Pin | Función |
|-------|----------|
| 1 | +3.3 VDC |
| 2,3,9 | GND |
| 4 | C2D |
| 7 | C2CK |

Para obtener información de depuración en tiempo de ejecución es posible conectarse con el robot mediante una línea de comandos utilizando el puerto RS232. Esta comunicación

se logra a través de los pines designados como UART en la placa del robot. En las computadoras más modernas no se cuenta con un puerto RS232 y por ello se debe utilizar un cable especial o conector para conectarse con el dispositivo. En la figura 4.5.10 se muestra un conector basado en el circuito integrado CP2102 que permite conectarse mediante el puerto USB convencional.

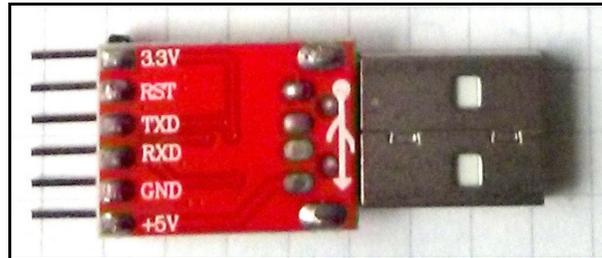


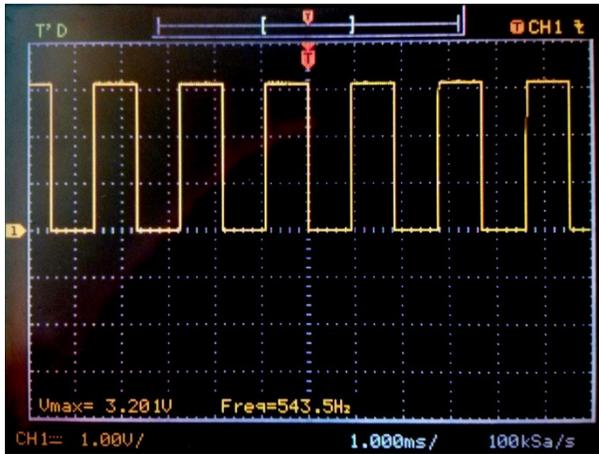
Figura 4.5.10. Conector de puerto USB-RS232 para depurar la programación con un computador

El minirobot utiliza comunicación inalámbrica para enviar y recibir comandos y datos por medio de señales infrarrojas. Este protocolo se conoce con el nombre de IrDA (Infrared Data Association) y permite transmitir datos e instrucciones. Una de las ventajas de este protocolo es que acepta tramas de longitud variable, de modo que se puede transferir cualquier número de bytes consecutivos para establecer los modos de operación del robot.

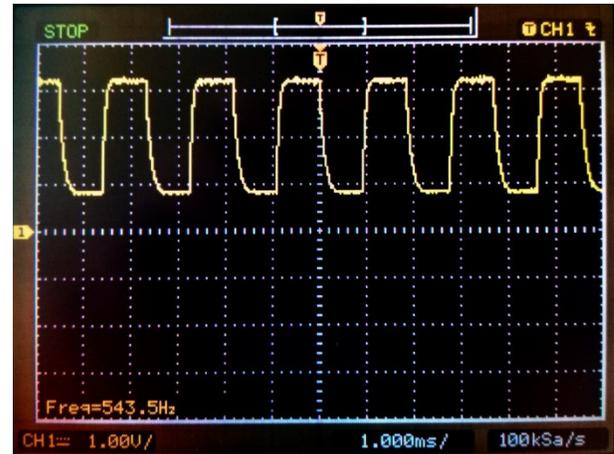
El minirobot puede alimentarse por conexión directa de una fuente de tensión externa de +3.3 V DC. Esta tensión se puede tomar directamente del adaptador mostrado en la Figura 4.5.10. También puede alimentarse por medio de una fotocelda personalizada que convierte en energía eléctrica la energía de un láser de alta potencia. Este láser debe seguir el robot para mantener el haz en la zona de captura de energía de la celda.

El sistema de locomoción se activa con la oscilación de los actuadores piezoeléctricos que sirven como patas al aplicar una frecuencia variable entre 545.0 y 551.3 Hz. Esta frecuencia se puede ajustar dentro del código fuente del robot, así como cualquier otra que no esté dentro del rango especificado. El microcontrolador determina cuál de las tres patas debe alimentar, y cuál es la frecuencia que le corresponde a cada una dependiendo de la función de movimiento que desee ejecutar, como por ejemplo, movimiento hacia adelante.

En la figura 4.5.11 se observa la medición de una señal de 543.5 Hz aplicada a una de las patas del robot. En la imagen de la izquierda se aprecia la señal de estímulo rectangular ideal, con la pata desconectada, y en la imagen de la derecha se muestra la deformación de la señal aplicada cuando la pata está conectada al pin correspondiente, debido a la carga mecánica y otras características eléctricas del microcontrolador. En los anexos digitales a este informe se muestran videos de pruebas de locomoción del minirobot.



(a) Señal de salida en el pin P2.2 (al aire).



(b) Señal de salida en el pin P2.2 (con piezoeléctrico).

Figura 4.5.11. Oscilogramas de prueba del sistema de locomoción

Debido al retraso sufrido en el ensamble del prototipo y por razones de conclusión del tiempo de ejecución del proyecto y la necesidad de completar el informe de lo realizado, se integraron las funciones más importantes, dejando solamente los manipuladores sin incluir en el ensamble. Sin embargo, los manipuladores pueden integrarse posteriormente y el prototipo puede continuar siendo caracterizado y probado. Los resultados de las pruebas completadas se adjuntan en el Apéndice 1 como tablas resumidas que sirven como hoja de datos del prototipo para futuras referencias y pruebas.

4.5.2. Software e interfaz humano-máquina

El desarrollo de software para este proyecto se dividió en 3 etapas: en primer lugar se trabajó en algoritmos para movimiento de patas que eventualmente se iban a emplear para mover el robot; en segundo lugar el seguimiento con una cámara del robot en el área de operación del minirobot cuyo radio es de 15 cm; por último, se implementó el software para el seguimiento del robot con una cámara de video.

4.5.2.1 Algoritmos de movimiento de las patas

Para determinar los primeros pasos en la construcción de los algoritmos de locomoción usando patas, se construyó un modelo aproximado, de acuerdo con las posibles formas de locomoción que podrían implementarse en el minirobot. Esto contempló el hecho de que para lograr la traslación las patas no se iban a levantar completamente y más bien,

eventualmente se utilizarían los movimientos individuales de cada pata alternando los lados y entre las frontales y traseras. La secuencia de la que se partió fue:

- Trasera izquierda
- Delantera derecha
- Delantera izquierda
- Trasera derecha

El problema obvio en el modelo era resolver el retroceso de la traslación, debido a que cada pata debe volver a su posición original, y por fricción el robot tiende a retroceder durante la etapa de tracción de cada pata. Dado que aún debían resolverse detalles de la locomoción, la investigación de software se concentró primero en evaluar únicamente los aspectos relacionados con los algoritmos, como por ejemplo la viabilidad de ser implementado por un microcontrolador considerando la baja frecuencia de excitación de las patas, la eficiencia y la memoria disponible para almacenamiento del programa.

Para realizar esta primera investigación, se implementó un modelo de locomoción a gran escala con actuadores térmicos. La escala para la construcción del primer modelo se determinó con base en la facilidad y costo de implementación y prueba en el laboratorio, ya que las dimensiones no se consideraron como variables de estado o relevantes para los aspectos a evaluar del algoritmo de movimiento. En la figura 4.5.12 se puede apreciar una vista superior del primer modelo.

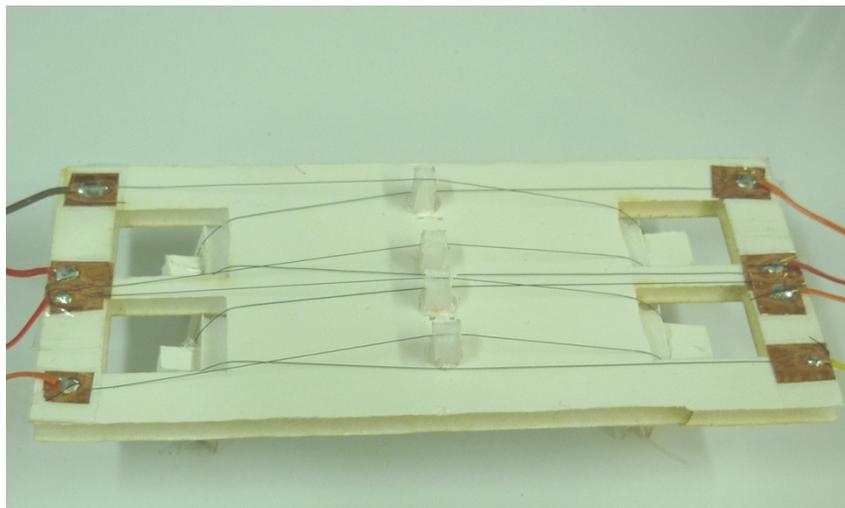


Figura 4.5.12. Vista superior del primer modelo para estudio de los algoritmos de locomoción

Como estructura se utilizó cartón foam en dimensiones de 0.5 cm x 6 cm x 16 cm. Cada pata de 1 cm² de area. Como actuadores térmicos se utilizaron cables de Flexinol, los cuales se contraen al alcanzar la temperatura de actuación. Para lograr el

calentamiento necesario se aplica corriente eléctrica durante el período de activación del actuador. Los cables de Flexinol se fijaron mecánicamente, es decir, sin soldarse, a unas terminales construidas de papel de cobre autoadhesivo, dado que las temperaturas del proceso de soldadura deterioran el Flexinol.

Los cables de Flexinol utilizados tienen un diámetro de $150\mu\text{m}$. Su temperatura de activación es de 70°C . La resistividad del Flexinol es de $50\ \Omega/\text{m}$, la corriente de activación correspondiente es de $400\ \text{mA}$ y una fuerza de recuperación de $330\ \text{g}$, aunque con una recuperación de la deformación que varía entre 3% y 5% .

Para lograr la retracción de las patas a su posición original se utilizó una fibra elástica translúcida fijada a pestañas que sobresalían $5\ \text{mm}$ de la superficie en ángulo de 90° grados para poder atarlas a ellas. En la figura 4.5.13 se pueden notar dichas pestañas, además de la perforaciones en la estructura para hacer pasar los hilos de retracción.

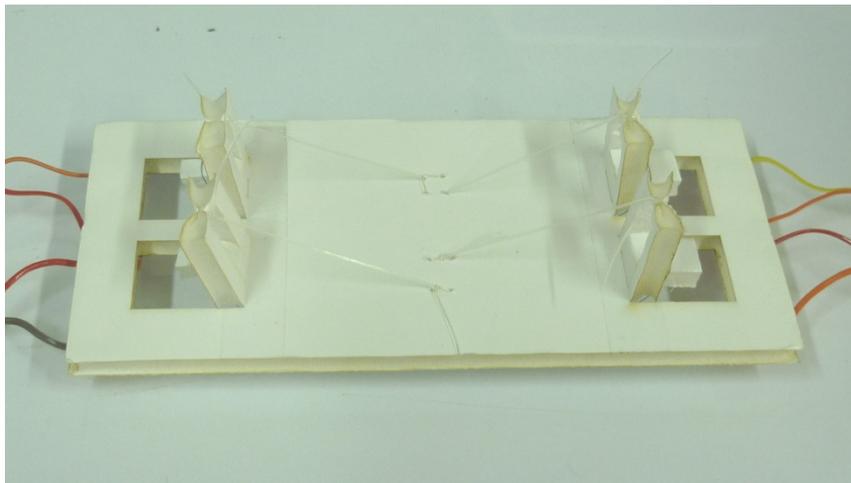


Figura 4.5.13. Vista inferior del primer modelo para estudio de los algoritmos de locomoción

El hilo elástico utilizado para retraer las patas funcionó adecuadamente. La primera capa de cartón foam hacía las veces de bisagra y no presentaba una fricción significativa que evitara que la pata volviera a su posición casi inmediatamente.

La siguiente variable a considerar entonces es la alimentación de los actuadores. Este primer modelo necesitó cuatro cables de alimentación a cada lado, para un total de ocho, como puede observarse en las figuras 4.5.12 y 4.5.13. Para estos cables de alimentación se utilizó cable flexible 22 AWG.

En este modelo el movimiento se volvió difícil por peso adicional de los cables con respecto a los $23.4\ \text{g}$ de peso de la estructura, sumado a la rigidez relativa de los mismos, que tendían a sacarlo de balance.

Para generar las señales de control se utilizó un microcontrolador Atmel ATTiny 26. Con este se generaron las señales en la secuencia deseada y con intervalos de tiempo de un segundo aproximadamente, definidos para permitir la retracción de la patas a su posición original. Las señales de salida se amplificaron a 9 V para lograr un mejor comportamiento del actuador térmico.

En el programa de locomoción se desarrollaron rutinas para contracción de cada pata, considerando la secuencia de activación, el tiempo de activación y el tiempo necesario para que cada pata volviera a su posición. Cada rutina se alojó en una posición de memoria relativa cuya dirección se almacenó en un vector. Para lograr los movimientos simplemente se invoca la dirección del vector de rutinas, se indica la secuencia de movimientos deseada y después se ejecuta la rutina.

El algoritmo para mover las patas se desarrollaron 10 rutinas: un monitor para ejecución de la secuencia, 8 secuencias de movimientos -2 secuencias por pata- y una de almacenamiento del vector de rutinas. La estructura de programa resultó fácil de mantener, simple de ejecutar y por lo tanto viable para utilizarla eventualmente en el microcontrolador.

Uno de los elementos considerados para mejorar el desempeño de los programas fue el uso de los saltos indirectos (ijump), que son mucho más rápidos y eficientes, ya que el número de evaluaciones es reducida en relación con las comparaciones (cmp), tal como lo establece Rodecker en [18]. Los llamados al vector de comportamiento descrito se hacen a través de llamadas indirectas y esto también se puede hacer en el microcontrolador, lo que hace que esta técnica de programación se pueda utilizar en el minirobot.

Cuando se contó con el kit de desarrollo del microcontrolador 8051 de Silicon Labs fue posible programar movimientos más complejos con cuatro servomotores parallax facilitados por el proyecto de investigación Krotic del laboratorio LuTec del ITCR. La decisión de utilizar servomotores para esta segunda prueba se debe a que para su funcionamiento se requieren del microcontrolador pulsos de entre 1.3 ms y 1.7 ms. Al utilizar pulsos más angostos y una mayor frecuencia de los mismos para programar movimientos hacia adelante y hacia atrás, además de trenes de pulsos para las diferentes velocidades, se crea una mayor carga de procesamiento con la que puede evaluarse más eficientemente el consumo de potencia del microcontrolador al ejecutar el algoritmo. Estos códigos se programaron en ensamblador, que resulta mucho más eficiente para la administración de memoria del microcontrolador.

Para esta evaluación se construyó el modelo mostrado en la figura 4.5.14. La cabeza de perro es mero ornato para atracción, con la intención de que este desarrollo pueda ser reutilizado en ferias vocacionales y actividades similares. Este modelo se construyó

a partir de dos módulos del proyecto Krotic conectados con algunos elementos adicionales para adaptarlos a las necesidades de prueba de los algoritmos de locomoción del minirobot.

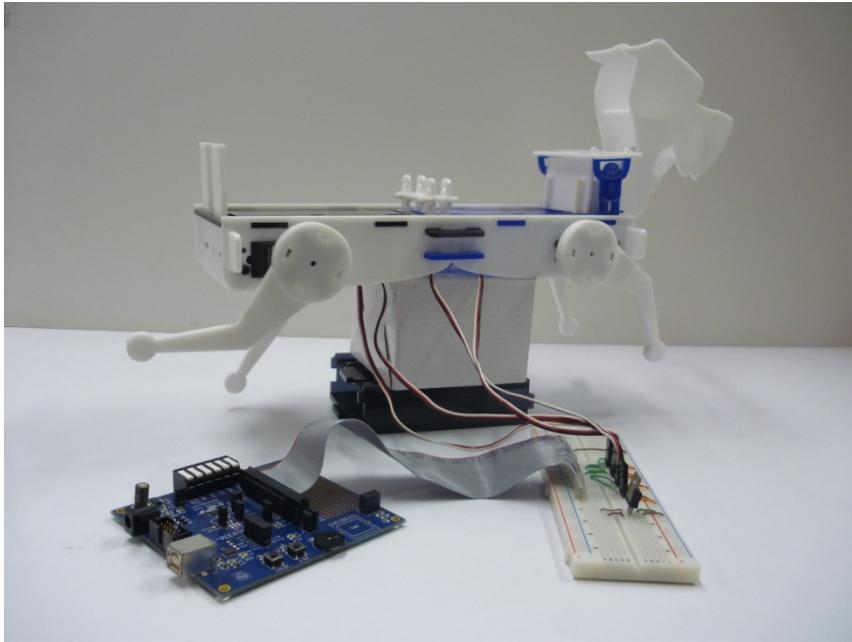


Figura 4.5.14. Kit de desarrollo conectado a los servomotores del segundo modelo para evaluación de los algoritmos de locomoción

En la figura 4.5.15 se pueden observar los límites de carrera para las patas, los cuales fueron ajustados conforme se estudiaban los movimientos de este segundo modelo para estudio de la locomoción, basándose en la información encontrada en la literatura referente al movimiento de cuadrúpedos. Con este segundo modelo será posible continuar el estudio de algoritmos de aprendizaje en el robot para la adaptación a diferentes situaciones de locomoción. De acuerdo con la literatura tradicional, el sistema de aprendizaje para movimientos de cuadrúpedos puede ser on-line y off-line. En el caso de este segundo modelo implementado se utilizó aprendizaje off-line, es decir, el programador aprende a sincronizar el paso o modo de andar del modelo y luego ajusta los movimientos.

En caso de aprendizaje on-line, los métodos tradicionales de aprendizaje son redes neurales, algoritmos genéticos o aprendizaje por refuerzo. Para el aprendizaje de un paso de gateo (“crawling”) o paso lento, la literatura reporta el uso de algoritmos genéticos, tal como se especifica en [19].

Con el segundo modelo se implementó una red neuronal sencilla que evalúa cada paso y los límites antes de los reajustes. Esta calibración consume 6 veces más tiempo que el movimiento de una pata individual.

Esta programación implica comunicación entre el dominio físico y los dominios funcionales y comportamental, tal como se describe en [20]. El estudio se centró en la interacción entre el funcional y comportamental mencionado por Vega et al. en [20].

Los parámetros de búsqueda se inicializan y después se ajustaban off-line en el microcontrolador. El ajuste off-line simplifica el cálculo de desempeño de los algoritmos. Los finales de carrera o límites para los movimientos en cada pata facilitaron los reajustes funcionales para recalibración en las rutinas de control de los servomotores en los movimientos hacia atrás y hacia adelante. Estos finales de carrera corresponden a las pestañas al lado de los ejes de la rotación en cada pata, como se puede apreciar en la figura 4.5.15. Dentro del microcontrolador se realizaron dos niveles de ajuste: uno funcional y otro comportamental.

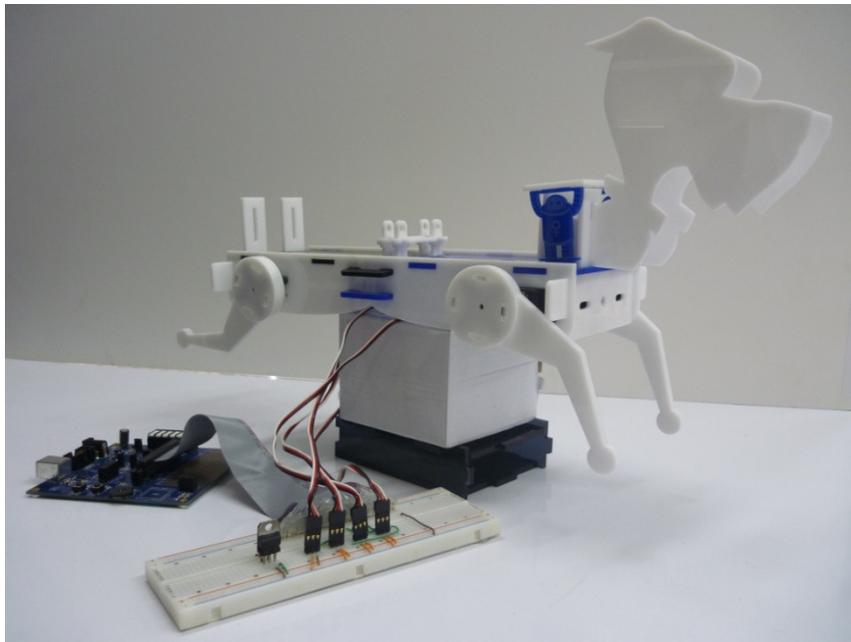


Figura 4.5.15. Modelo 2 ejecutando movimiento basado en la caminata de los conejos

Con base en las pruebas realizadas con este modelo, se determinó que las patas deben mostrar una rotación que oscila entre 36° y 40° . Con esta rotación de patas es suficiente para lograr la traslación del robot. Se probaron algoritmos de locomoción basados en la caminata de los conejos y en el trote. Las posiciones de las patas para estos algoritmos se muestran en las figuras 4.5.15 y 4.5.16, respectivamente.

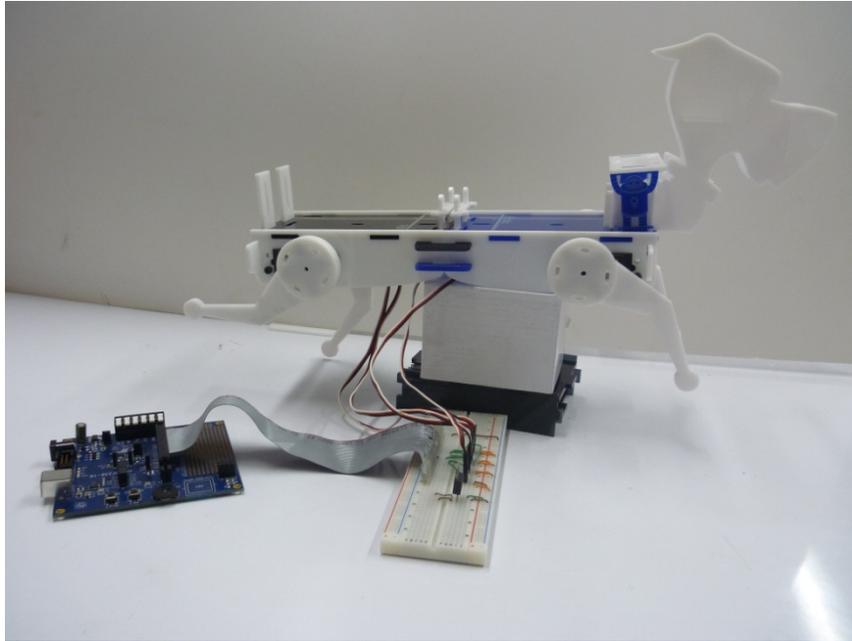


Figura 4.5.16. Modelo 2 ejecutando movimiento basado en el trote

Las medidas de tiempos en los experimentos, dieron como resultado que el algoritmo de movimiento de patas basado en la caminata de los conejos era mucho más rápido, disminuyendo el tiempo en 60 ns con respecto al movimiento basado en trote. La caminata basada en 36° de rotación tuvieron en mejor desempeño que la basada en 40° de rotación, puesto que el modelo podían desplazar durante 1 minuto 20 segundos sin recalibración.

Todos los movimientos y experimentos fueron simulados para evaluar la eficiencia del algoritmo. Dado que las patas no poseen articulaciones, la simulación del movimiento corresponde a los casos más sencillos de movimiento de cuadrúpedos. Para el futuro puede continuarse con el estudio de los algoritmos de aprendizaje, así como mejorar la estabilidad mecánica de este segundo modelo. No se evaluaron algoritmos de aprendizaje por refuerzo ni algoritmos genéticos, dado que finalmente se encontró un mecanismo alternativo basado en fricción asimétrica con tres patas para implementar el sistema de locomoción.

A pesar de esto, la evaluación del manejo de memoria, consumo y estrategias de programación fueron de utilidad para el mecanismo de locomoción de tres patas.

4.5.2.2 Rastreo y reconocimiento del minirobot

El rastreo y reconocimiento del robot estableciendo sus coordenadas iniciales y la historia del desplazamiento en un área de determinada, es una tarea de suma importancia para la alimentación inalámbrica del robot puesto que el rayo láser debe mantenerse apuntando a la celda fotovoltaica para proveer la energía necesaria para su funcionamiento en cualquier punto del área de operación. El rastreo involucra el seguimiento del minirobot con una cámara de video, así como la capacidad de distinguir el minirobot del fondo sobre el cual se desplaza, por ejemplo una oblea de silicio.

En los últimos años la detección y rastreo de objetos ha tomado importancia en el área de visión por computadora en aplicaciones como vigilancia (seguridad), estudio de tráfico, comportamiento animal, medicina y por supuesto robótica. Esto principalmente por las ventajas que conlleva tener un análisis computarizado de la región de operación. Por ejemplo, una red de amplia de vigilancia que requiera monitoreo constante como el análisis de flujo vehicular sobre una autopista, el análisis del flujo de personas en recinto utilizando las cámaras de seguridad o reconocer los posibles movimientos de un robot dentro de un sistema computacional, es una tarea difícil de realizar por una persona (“Object Tracking over Multiple Uncalibrated”).

Este incremento de interés en el área se ha visto reflejado en el desarrollo de diversas bibliotecas que permiten el desarrollo de proyectos de visión por computadora. Entre ellas se encuentra OpenCV, que surgió con la idea de universalizar el tema y brindar a muchos usuarios una base para la futura realización de proyectos.

Para implementar el rastreo y reconocimiento en este proyecto de investigación inicialmente se utilizó una cámara DFK 31PF03 de alta resolución de 1392x1040 pixeles con un objetivo MLH-10X. Con esto se logró ubicar un elemento oscuro sobre un fondo uniforme amarillo [21]. Como una alternativa de menor costo se evaluó el cambio a una cámara web convencional de 1.2 Mpixel. Para el software se decidió utilizar una biblioteca abierta Open CV. Esta biblioteca se mostraba promisoría para lograr resultados de mejor calidad, pues se logra reconocimiento sobre fondos no uniformes y el procesamiento más rápido que el software base ya desarrollado.

La decisión de utilizar esta biblioteca se basó en el hecho de ser software libre y de poseer más de 500 funciones que abarcan diferentes áreas de la visión por computadora y permite el desarrollo de algoritmos más complejos a partir de ellas.

4.5.2.2.1.Rastreo de Objetos

El rastreo de objetos puede definirse como la acción de estimar la trayectoria de un objeto conforme se mueve en una escena [22]. El rastreo de un objeto ha sido tema de múltiples estudios y diferentes enfoques, ya que la forma de detección de un objeto puede verse afectada por aspectos como poca resolución en las imágenes, tipo de movimiento, forma y tamaño del objeto, iluminación y los requerimientos del procesamiento de videos en tiempo real [23]. Este último aspecto se ha visto mejorado en los últimos años, gracias a la mejora en la capacidad de procesamiento de datos y a los formatos de video disponibles.

La tarea de rastreo se puede dividir en tres sub-tareas:

- Detección del objeto: consiste en detectar y separar el objeto que se quiere rastrear ya sea en cada cuadro o en el primero que aparece.
- Rastreo del objeto, cuyo objetivo es mantener un historial de los movimientos o cambios que haya sufrido el objeto.
- Aplicar los resultados obtenidos.

Para la detección del objeto existen diferentes métodos que se escogen tomando en cuenta aspectos como forma de representación del objeto y sus características, además de sus condiciones de movimiento, del entorno y de la cámara [23].

Los métodos de detección más comunes son:

- Detección de puntos de interés
- Segmentación
- Modelado del fondo
- Aprendizaje supervisado

Para mostrar el funcionamiento del robot, se construyeron modelos en papel, primeramente en escala milimétrica, con áreas desde los 0.5 mm^2 hasta los 5 mm^2 .

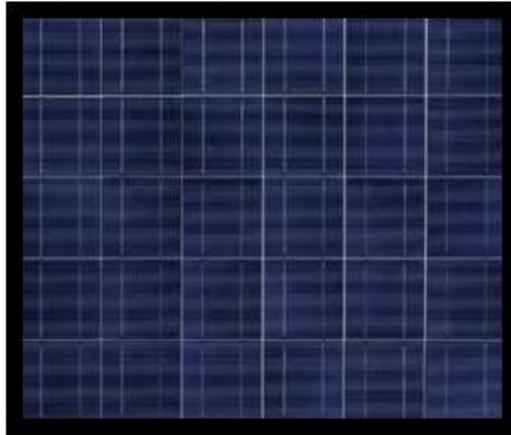


Figura 4.5.17. Modelo de robot impreso en papel para probar los algoritmos de seguimiento

Para las pruebas también se imprimió un modelo de oblea de silicio de 12 cm de diámetro para tener un fondo con tonalidades de fondo aproximadas al real.

El objetivo de estas pruebas fue realizar el rastreo de la manera más eficiente con una cámara web convencional de 1.2 Mpixel. Para ello se compara la eficacia y eficiencia de varios algoritmos de rastreo implementados utilizando funciones de OpenCV. Para lograrlo, se simuló el movimiento del robot tratando de replicar los problemas que podrían afectar o dificultar el rastreo del robot, tales como apertura del objetivo, distancia máxima de detección (30 cm) y ángulo de inclinación de la cámara, la cual en algunos casos está a 30° con respecto a la normal de la oblea.

Para los experimentos se asumió que es posible poner una marca o etiqueta sobre el minirobot para facilitar su reconocimiento con la cámara. Esto se muestra en la figura 4.5.18. Con esto se logra además determinar el ángulo que causa pérdida de foco.



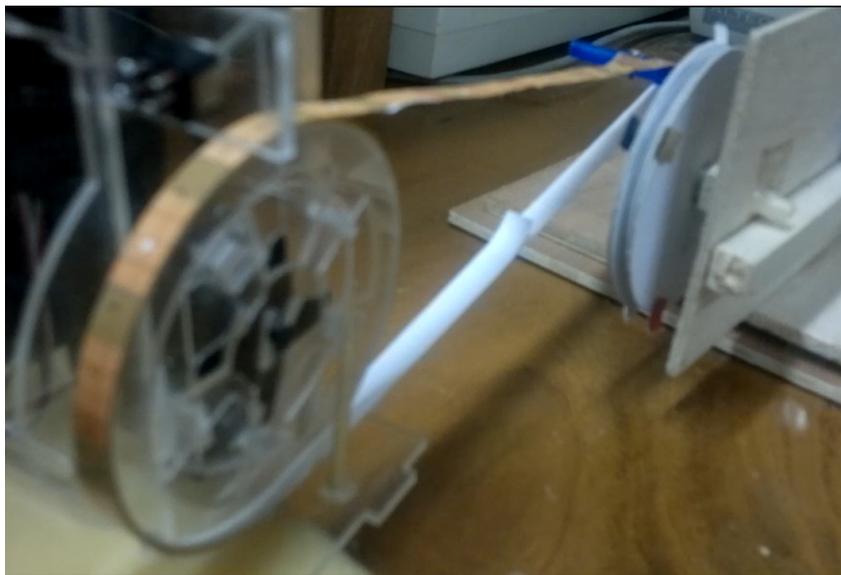
Figura 4.5.18. Marcas con diferentes fondos reconocidas por el sistema de seguimiento del robot

Para reconocer y seguir al minirobot la cámara necesita acercamiento y movimiento para mantener enfocado el objeto y así poder suministrar su ubicación del objeto en

una región bidimensional. Para conseguir este objetivo, la cámara se instaló sobre una rótula.

Para esta aplicación particular, aspectos como claridad de la imagen, forma y tamaño del objeto toman mucha relevancia, determinando la selección de la cámara que realiza la detección. Para las especificaciones finales de tamaño del minirobot, la cámara debe ser capaz de captar objetos del orden de los milímetros o incluso centenas de micrómetros en caso de querer visualizar los actuadores. Además se debe tomar en cuenta la cámara debe distinguir el robot teniendo como fondo una oblea con circuitos integrados, por lo que se requiere buena calidad de imagen.

Para simular el movimiento del robot se tomaron los modelos de papel y se colocaron sobre una banda sin fin con el mismo color del fondo de pruebas, como se muestra en la figura 4.5.19. El tamaño de los modelos varió entre 0.5mm^2 y 5mm^2 . Para cada tamaño se colocaron dos modelos, uno de color negro y otro de color blanco, como se muestra en la figura 4.5.20. El movimiento de la faja sin fin y la transición de negro a blanco de los modelos permite simular una situación similar a la que se tendría si el robot se traslada de un punto a otro sobre el área de operación.



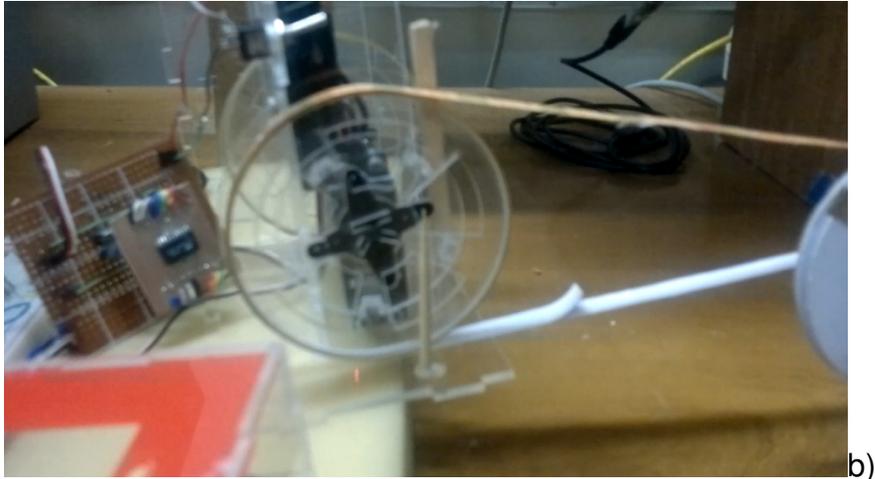


Figura 4.5.19. a) Faja sin fin para simular el movimiento del minirobot en los experimentos de detección de imagen, b) servomotores para el movimiento de la faja



Figura 4.5.20. Alternancia de modelos de papel blancos y negros para simulación del movimiento del minirobot

Para escoger el algoritmo primero se determinaron las siguientes condiciones de operación:

- a) máxima velocidad a la que el robot puede desplazarse para ser detectado por la cámara
- b) el algoritmo debe poder implementarse utilizando funciones de OpenCV
- c) la apertura del objetivo de la cámara

De la Figura 4.5.21 se puede determinar que la apertura da una lectura de 24mm x 181 mm. En la figura 4.5.22 se puede ver la apertura al utilizar la ampliación máxima de imagen que la cámara puede reconocer.

La cámara influye en la selección del método de detección. Por ejemplo, los métodos de sustracción de fondo o por color se ven alterados por el brillo o saturación de la imagen y los de detección por plantillas necesitan una clara distinción entre el objeto y el fondo.

En busca de un procesamiento de imágenes más eficiente, también se debe tomar en cuenta la comunicación entre la cámara y el computador. El software se implementó con QTCreator 2.2.1 de junio de 2011.

Los máximos valores de velocidad a los que se pudo detectar el robot con la cámara fueron 0.16 cm/s para etiquetas negras y 0.4 cm/s para etiquetas blancas. Esto delimita el límite superior de velocidad de desplazamiento del minirobot, a pesar de que el sistema de locomoción sea capaz de lograr mayores velocidades. Estas velocidades son adecuadas para la aplicación del minirobot, por lo que se consideraron exitosas y suficientes a pesar de la baja resolución de la cámara web con respecto a la primera cámara utilizada. La banda se desplazó a 9 cm de la cámara.

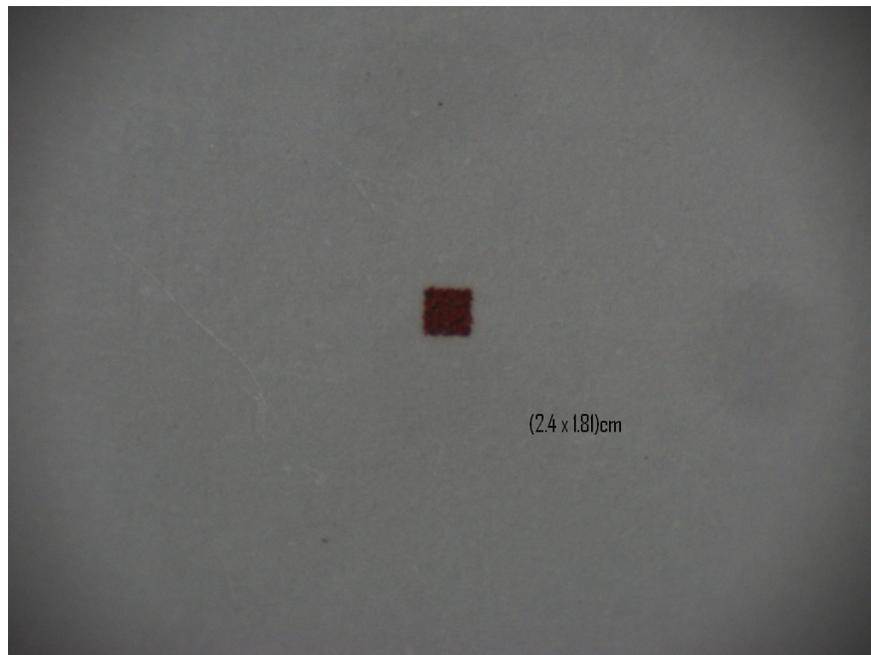


Figura 4.5.21. Apertura del objetivo de la cámara para reconocimiento del minirobot

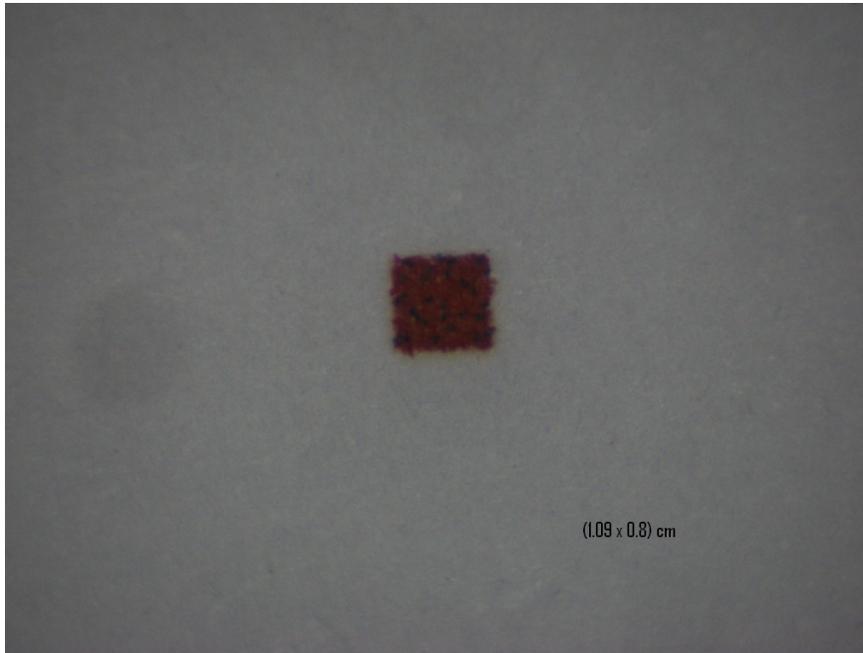


Figura 4.5.22. Apertura máxima al aplicar el máximo zoom disponible

4.5.2.2.2 Integración con el sistema de alimentación inalámbrica

Los módulos de reconocimiento y rastreo para la cámara desarrollados usando QT 2.2.1 con OpenCV se integraron al sistema de seguimiento descritos en la sección 4.2.

De acuerdo con la arquitectura de software definida en el proyecto “Dispositivo miniaturizado para el análisis de fallas de circuitos integrados submicrométricos” , la integración de cualquier módulo, independientemente del sistema operativo en que se haya desarrollado, debe realizarse a través de un protocolo estándar. Para ello se escogió XML como estándar de intercomunicación.

Para simular el movimiento del minirobot sobre la oblea se construyó un robot que se desplaza por vibración de un motor con una carga excéntrica. Utilizando un Basic Stamp se programó al robot para que se moviera cada vez que una fotorresistencia incorporada al robot recibiera luz. Con un potenciómetro se puede calibrar para que sea la luz de un apuntador láser la que provoque el movimiento, de forma que el desarrollo del sistema integrado se pueda realizar sin requerir el equipo de protección necesario para el láser de alta potencia que suministra energía al minirobot. El robot se desplaza un poco cada vez debido a la vibración sobre la superficie de prueba. En la figura 4.5.23 muestra el robot auxiliar para la integración de la cámara y el sistema de seguimiento, mientras que la figura 4.5.24 muestra la maqueta utilizada para probar esta integración.

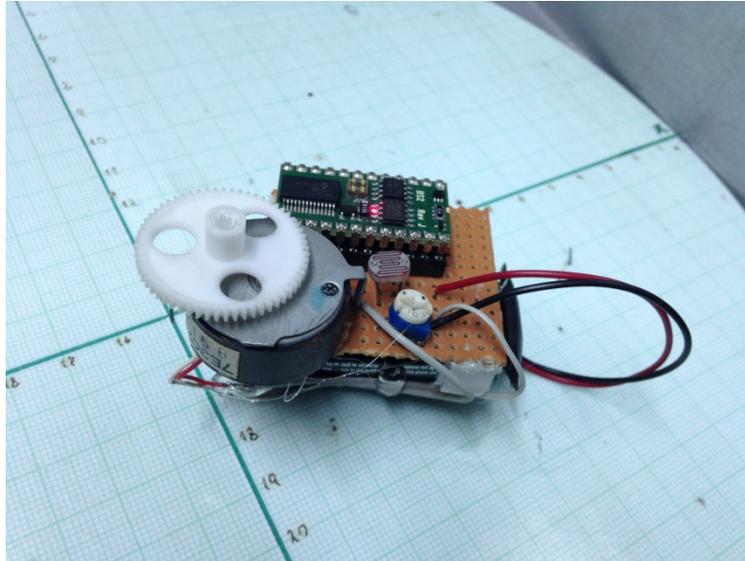


Figura 4.5.23. Robot auxiliar para las pruebas de integración de los sistemas de seguimiento y captura de imagen

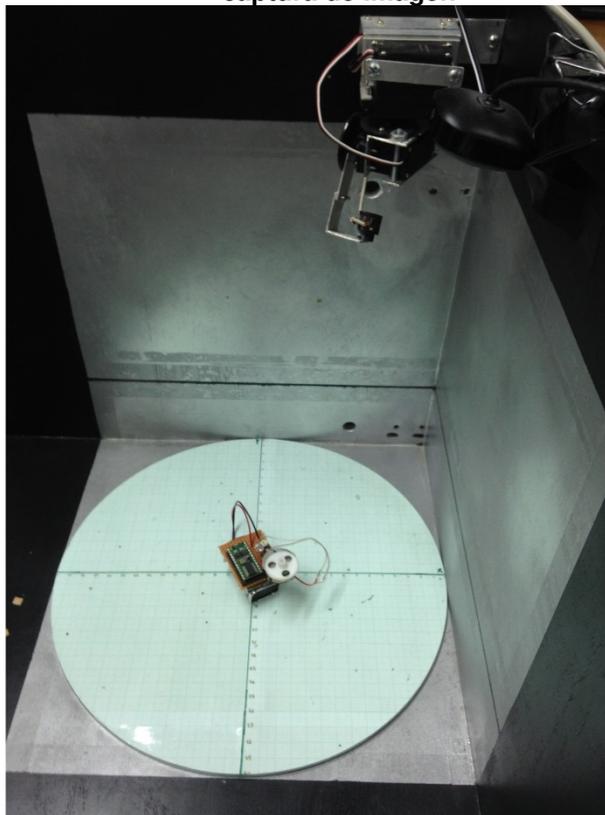


Figura 4.5.24. Maqueta para la prueba del sistema de seguimiento y captura de imagen

El software de integración de las funciones de detección y rastreo realiza las siguientes funciones:

En un computador con cámara:

1. Se ejecuta la aplicación TrackingV1, que localiza un objeto en la pantalla, genera sus coordenadas y las transmite a través de una conexión socket. Esto se logra con las siguientes acciones de parte del usuario:
 - a. En los botones de la esquina superior izquierda se selecciona “Template Matching”
 - b. Se ejecuta el paso 1 la sección “Sistema computacional con láser”
 - c. Se selecciona la figura que desea rastrear en la pantalla.

En un computador con el láser disponible:

1. Se ejecuta la aplicación cliente TCPClient, que establece la conexión con el servidor y recibe sus coordenadas para transmitir las a la aplicación láser.
2. Se ejecuta la aplicación ControlLaser, que lee las coordenadas y apunta el láser a ese punto. Para esto el usuario debe realizar los siguientes pasos:
 - a. Seleccionar el número de puerto de conector USB-Serial de conexión con el láser.
 - b. Conectar.
 - c. Seleccionar Activar PWM.
 - d. Seleccionar Read XML

Con estos pasos el apuntador láser (o el láser de alta potencia para suministrar energía) debe seguir el objeto señalado en la aplicación TrackingV1, tal y como se muestra en el video en los apéndices digitales de este informe. Las ventanas de la aplicación con y sin conexión establecida se muestran en las figuras 4.5.25 y 4.5.26. La figura 4.5.27 muestra la interfaz para la prueba del seguimiento del minirobot con el láser. La figura 4.5.28 muestra la aplicación durante la ejecución de la detección y el seguimiento, mientras que la figura 4.5.29 muestra la aplicación cliente recibiendo las coordenadas del robot durante el proceso de detección y rastreo.

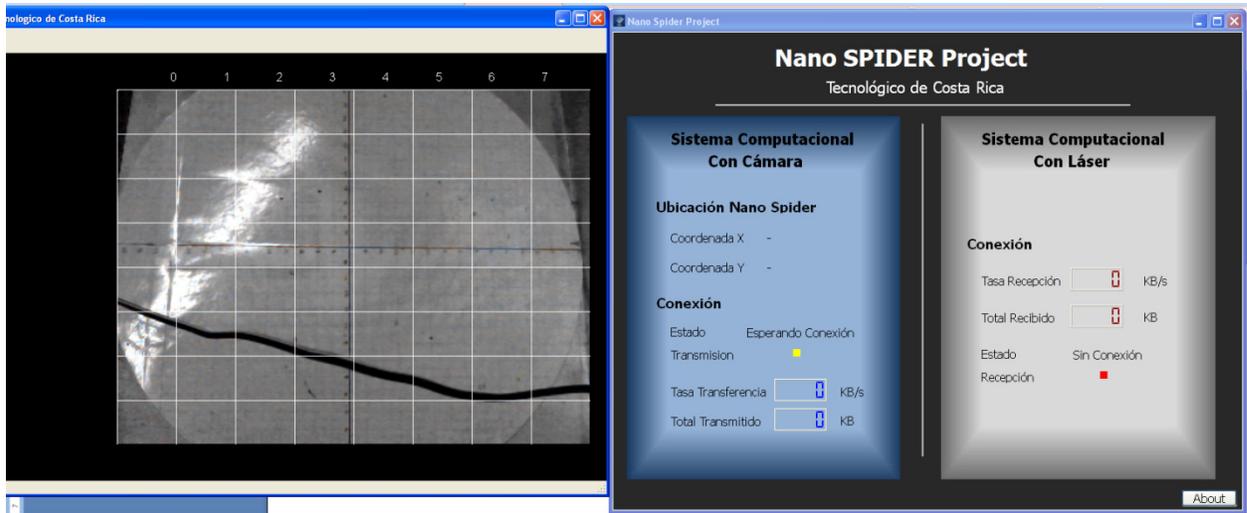


Figura 4.5.25. Ventanas de la aplicación integradora de detección y rastreo del minirobot sin conexión establecida

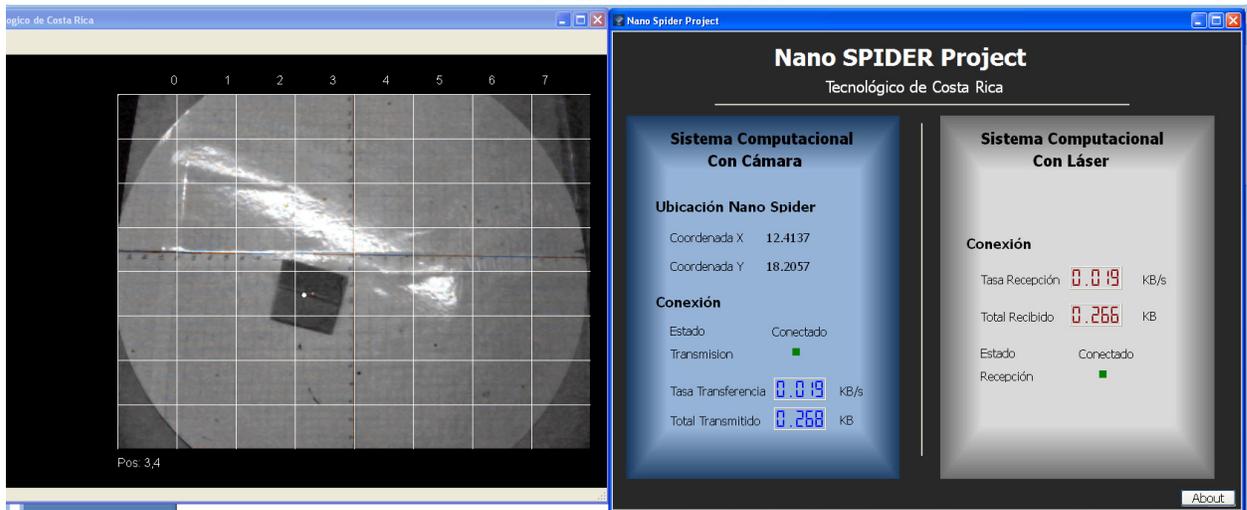


Figura 4.5.26. Ventanas de la aplicación integradora de detección y rastreo del minirobot con conexión establecida

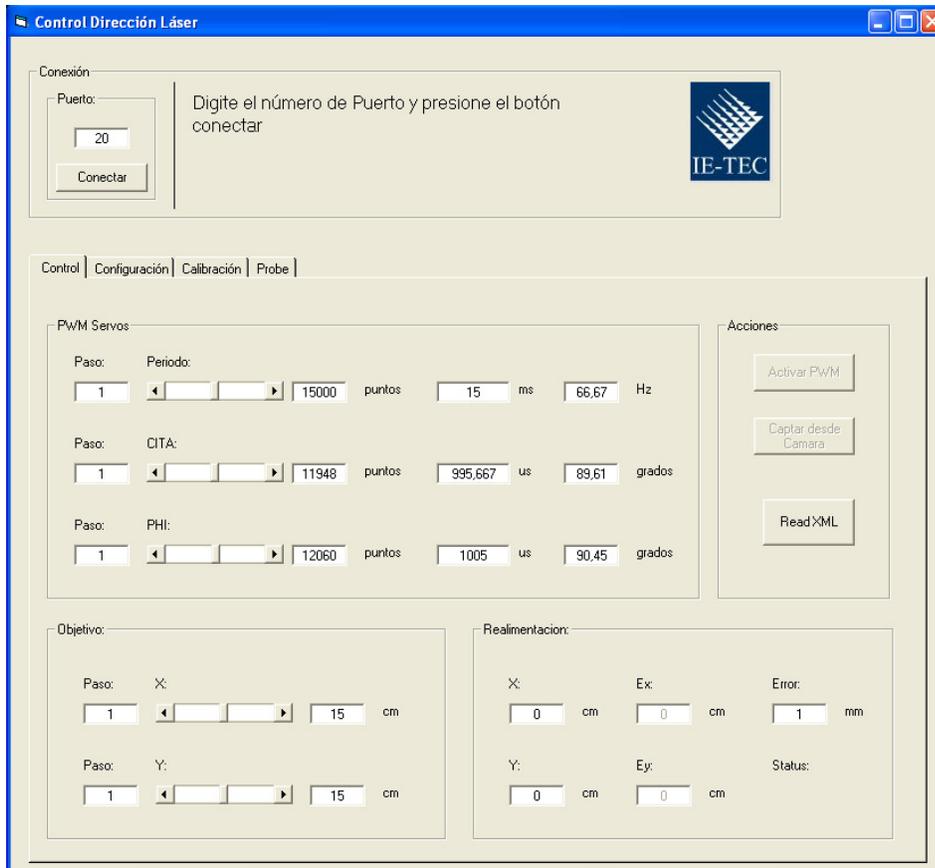


Figura 4.5.27. Interfaz de prueba del sistema de seguimiento [24]

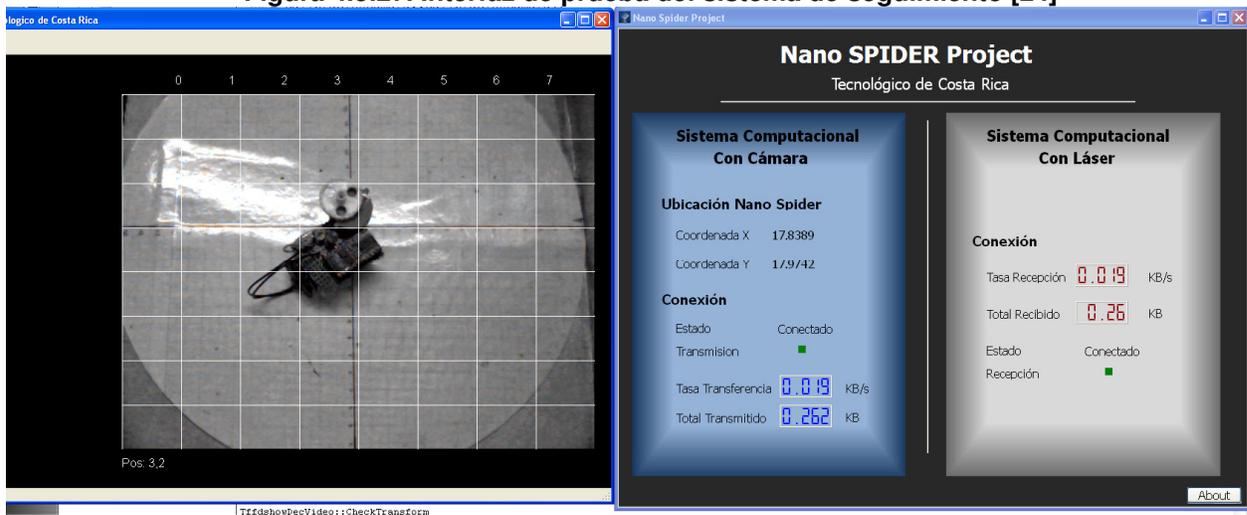


Figura 4.5.28. Aplicación de detección y seguimiento en plena ejecución

```
F:\TCPClient\debug\TCPClient.exe
>> X=18.616201 Y=14.223901
>> X=18.616201 Y=14.223901
>> X=18.616201 Y=14.223901
>> X=13.893600 Y=13.760900
>> X=17.530500 Y=7.464100
```

Figura 4.5.29. Aplicación cliente recibiendo las coordenadas de ubicación del robot

El usuario debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones al utilizar el sistema de detección y seguimiento.

1. La cámara debe calibrarse en conjunto con el sistema de seguimiento.
2. La altura del robot de prueba es 22mm sobre la oblea, lo cual influye en la calibración del laser, ya que este apunta en diagonal.
3. El área de la celda fotovoltaica es de 4 mm².
4. Deben seguirse las instrucciones del manual de usuario de control del láser para su calibración.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El escalamiento de efectos físicos es un aspecto primordial en la escogencia de un actuador para implementar el minirobot en su tamaño final requerido por la aplicación. Efectos que normalmente se utilizan en la actuación en la macroescala podrían no ser realizables en el caso de sistemas microelectromecánicos. Un ejemplo de esto es la inducción magnética. Las características del ambiente de operación también son un factor de gran importancia para la selección de materiales y efectos de actuación. En ambientes de vacío, el consumo de potencia del actuador es un factor crítico debido a la imposibilidad de utilizar mecanismos de convencionales de convección para el enfriamiento de los componentes del minirobot. Todo esto conllevó a continuar explorando la implementación de los actuadores del minirobot utilizando materiales piezoeléctricos.

Desde el punto de vista mecánico, el diseño de robots miniaturizados se enfrenta con un compromiso entre funcionalidad y tamaño. El uso de sistemas microelectromecánicos con mayor cantidad de grados de libertad conlleva un incremento en volumen, consumo de potencia, tensión de alimentación, corriente de actuación y complejidad. Además de esto, el diseñador debe manejar el compromiso entre alta precisión y gran desplazamiento necesario para cumplir las especificaciones de operación de la aplicación.

También deben considerarse aspectos de fabricación, en especial el costo y equipamiento necesarios para la deposición, decapado y formación de estructuras, así como los ambientes de cuarto limpio necesarios para implementar una geometría específica con los materiales requeridos. En general, los procesos de fabricación multiproyecto para prototipado de diseños industriales y académicos son una opción de menor costo con respecto a la producción en laboratorios propios. Sin embargo, estos procesos tienen limitaciones inherentes a la necesidad de cumplir con las necesidades de una gran cantidad de usuarios y la necesidad de bajo costo, que se ubica en unos 3400 euros como rango inferior de precios por la producción de un prototipo. Entre estas medidas, el tipo de materiales disponibles es muy restringido, y está más dirigido a la creación de componentes pasivos y ciertos tipos de sensores, pero no a actuadores, dado que se concentran en variaciones de los procesos de fabricación CMOS existentes en la microelectrónica. Al costo de prototipado debe añadirse el costo anual de las licencias de software para utilizar los archivos con información tecnológica del fabricante y diseñar el prototipo que se desea fabricar y la membresía anual al consorcio de microfabricación multiproyecto.

Debido a las necesidades del proyecto con respecto a los materiales necesarios para lograr su funcionalidad y especificaciones, no fue posible encontrar un proceso de fabricación de prototipos que involucrara los materiales y características de fabricación necesarios para crear un prototipo de escala micrométrica. Ninguno de los procesos disponibles incorporaba materiales piezoeléctricos. La única solución es desarrollar un proceso de fabricación personalizado para los actuadores.

El primer proceso de fabricación multiproyecto que incluye materiales piezoeléctricos es de MEMSCap, que introdujo en 2013 por primera vez al mercado este proceso, conocido comercialmente como PiezoMUMPS [25]. Sin embargo, es importante recalcar que este proceso incluye solamente una capa de nitruro de aluminio como material piezoeléctrico, de manera que no es posible implementar actuadores de pila, con lo que el actuador de pila piezoeléctrica no es implementable con este proceso, ni podrían utilizarse múltiples capas de piezoeléctrico para implementar el manipulador. Por otra parte, es posible que no se alcancen las especificaciones de desplazamiento necesarias para los actuadores, debido a que los valores de las constantes piezoeléctricas del nitruro de aluminio son menores que las de las cerámicas PZT y los polímeros PVDF utilizados en el prototipo.

Además de estas limitaciones del proceso PiezoMUMPs, el proceso estuvo disponible comercialmente después de haber concluido el tiempo de ejecución de este proyecto de investigación, por lo que no se contaba con presupuesto para pagar una eventual microfabricación de los microactuadores, ni con el tiempo para hacer el diseño de actuadores con base en las características específicas del piezoeléctrico disponible en PiezoMUMPs. Tampoco se contaba con el software necesario para realizar el diseño del layout de los mismos. Por otra parte, el costo mínimo de fabricación de un prototipo de la familia tecnológica MUPMS en Europractice ronda los 3400 euros, más el costo del software necesario para dar soporte al kit de tecnología de MUMPs.

El proceso PiezoMUMPs podría accesarse por medio del consorcio de microfabricación Europractice, si para futuros proyectos el ITCR paga la membresía correspondiente así como el costo anual del software necesario. Sin embargo, como se mencionó antes, con este proceso no se podría implementar el actuador debido a la utilización de una única capa de piezoeléctrico en el proceso de fabricación. Un proceso personalizado es mucho más costoso que el accesible vía Europractice debido a que, a diferencia de las obleas multiproyecto, no se compartirían costos de máscaras, material ni personal para la fabricación, además de que no se estaría contratando fabricación de alto volumen. Un dato exacto del costo de un proceso personalizado no puede darse en este momento, puesto que requeriría el análisis del diseño final por parte de un fabricante específico. Dado que en este proyecto se trata de implementar prototipos, a falta de opciones para implementarlos a un costo razonable en escalas micrométricas, tiene entonces más sentido implementarlos a mayor escala, de forma que puedan utilizarse alternativas de

bajo costo para estudiar el principio de funcionamiento antes de considerar su miniaturización al tamaño final requerido.

La ausencia de suplidores nacionales, los precios de material piezoeléctrico en las condiciones necesarias para el prototipado, la cantidad mínima necesaria para colocar una orden de compra de los piezoeléctricos necesarios para pruebas en prototipos de menor tamaño o prescindiendo de adhesivos, fueron factores determinantes para dificultar la reducción del tamaño de los prototipos de los actuadores estudiados. A esto se suma la ausencia de procesos de microfabricación multiproyecto que incluyeran materiales piezoeléctricos. Esto impidió realizar la fabricación de prototipos de actuadores con escala micrométrica y milimétrica, afectando la implementación de los manipuladores (el actuador para el manipulador con 2 grados de libertad) y la pila piezoeléctrica, por lo que debió recurrirse a componentes y materiales para implementar prototipos de mayor escala para probar los principios de funcionamiento de minirobot.

En el caso del microposicionador, tal como se indicó en la sección de resultados correspondiente, se implementó un prototipo de dos grados de libertad para el posicionamiento preciso en x e y . En comparación con otros actuadores presentados en la literatura [26,27], el microposicionador diseñado es muy simple, fácil de fabricar, opera a bajo voltaje y con ello tiene un consumo de potencia aceptable para la aplicación, además de que puede operar en ambientes de vacío, tal como se requiere en este caso. El desplazamiento puede aumentarse utilizando bimorfos más largos, de ser necesario. Un microposicionador delgado logra mayores desplazamientos pero menos precisión y robustez mecánica que el microposicionador grueso. Este compromiso entre precisión y desplazamiento debe tomarse en cuenta al fabricar la versión final del mismo, a escala micrométrica.

El estudio de las frecuencias de resonancia de los actuadores constituye información valiosa para evitar la resonancia durante microposicionamiento, así como para operar en resonancia o cerca de ella en el caso del sistema de locomoción. Además, con el análisis de von Mises pudieron verificarse las zonas de mayor tensión mecánica, de forma que puedan considerarse en el diseño para asegurar operación continua.

En caso de utilizarse el minirobot para caracterización eléctrica, como en el análisis de fallas de circuitos integrados, la literatura no reporta ningún minirobot para mediciones eléctricas o aplicación de estímulos eléctricos, sea esto en proyectos de investigación o comerciales. Se ha encontrado documentación sobre propuestas de sistemas Lab-in-SEM en las cuales se pretende integrar manipuladores de puntas de prueba con parte de la unidad fuente-medidor, pero no son sistemas robóticos.

Sin embargo, los prototipos de estas propuestas tienen un tamaño en la escala de varias decenas centímetros cúbicos y además no pueden moverse, sino que operan desde posiciones fijas [28]. En ese aspecto, el prototipo implementado en este proyecto, aún siendo de mayor escala que la meta de tamaño, muestra que hay un gran potencial para reducir el volumen necesario para implementar estas funciones en sistemas de medición que no requieran de un robot tan pequeño como el caso particular de Intel. Por otra parte, el desplazamiento del robot reduce aún más el volumen necesario para implementar la caracterización, dado que con los prototipos de manipuladores de la literatura se necesitaría un manipulador por cada terminal del dispositivo en prueba, aumentando grandemente el volumen ocupado en las cámaras de SEM. Con el robot, por otra parte, se integrarían los manipuladores en un sistema de menor tamaño. La incorporación de las unidades fuente medidor se podría realizar en otro proyecto, dado que está fuera de los alcances del proyecto descrito en este informe, que se enfocaba en el estudio de los componentes básicos del robot, junto con dos actuadores.

Para realizar un análisis más completo del manipulador puede incluirse un análisis de fatiga. Para esto debe considerarse el límite de elasticidad del material para implementar el actuador. Este debe obtenerse de las hojas de datos del material o bien debe determinarse experimentalmente. Este parámetro permitirá además determinar el máximo peso de la carga que puede soportar el microactuador, y compararla con la tensión de von Mises para asegurar que la tensión mecánica se encuentre dentro del rango aceptable para este material. Para ello también debe considerarse el peso del actuador de pila.

Un actuador de pila piezoeléctrico permitiría implementar el tercer grado de libertad del manipulador. Se implementó un prototipo de mayor escala del actuador de pila partiendo de los discos piezoeléctricos de menor diámetro y espesor disponibles en el mercado. Sin embargo, aún en estas condiciones el prototipo de actuador de pila resultó ser muy pesado para incorporarlo al prototipo de manipulador, por lo que se decidió dejar el prototipo de manipulador sólo con dos grados de libertad. Para realizar pruebas con los tres grados de libertad, debe recurrirse entonces a un proceso de microfabricación personalizada para fabricar las tres piezas juntas, pues esta capacidad de microfabricación sobrepasa las de las tecnologías para prototipado en obleas multiproyecto.

Con respecto a la herramienta de corte, debe considerarse en primer lugar que el software COMSOL Multiphysics presenta limitaciones para la simulación de cortes, dado que la representación de un corte necesariamente implica una ruptura del mallado de simulación. Esta es una limitante que es común a los métodos de elementos finitos, y en general a cualquier método de simulación numérica que utilice mallado de la geometría para el cálculo de las variables físicas. Sin embargo, puede verse de las simulaciones si el material entra en la zona de estricción, que es la zona de la curva tensión-deformación inmediatamente anterior al corte, el cual se da a la tensión

llamada en inglés “ultimate tensile stress” (límite de resistencia a la tracción). Para el cobre, el límite elástico es de 33.3MPa, y el límite de resistencia a la tracción es de 220MPa.

También se observa que un solo golpe de la herramienta es insuficiente para llegar al fondo de la interconexión. Las simulaciones sucesivas tomando en cuenta la deformación anterior permitió obtener una primera aproximación del número de golpes necesarios para lograr el corte. Se determinó que se requieren 7 golpes para lograr el corte. Puesto que la simulación es una aproximación, es posible que en un sistema real se requiera un poco más pero esto solamente podría determinarse experimentalmente con el sistema micrométrico.

Una limitación importante de la herramienta de corte es el límite de resistencia a la tracción del material de la pila piezoeléctrica que provee la fuerza para efectuar el corte. Para el material del prototipo de la pila, se especifica un límite de resistencia a la tracción estático de 75.8MPa y un límite de resistencia a la tracción dinámico de 27.58MPa.

Estos valores tienen una importante implicación para la herramienta de corte, pues se puede ver que ambos son menores que el límite de resistencia a la tracción del cobre. De esta forma, en la simulación la herramienta de corte estaría en capacidad de deformar la interconexión, pero los resultados muestran también que si ese fuera el caso, la herramienta no podría proporcionar la tensión necesaria para cortarla sin experimentar fracturas en el piezoeléctrico del actuador de pila, es decir, la pila piezoeléctrica utilizada como actuador se fracturaría antes de lograr cortar la interconexión de cobre. Dicho de otra manera, el piezoeléctrico es un material frágil, mientras que el cobre es un material dúctil, y por ello requiere de una tensión mayor para ser cortado.

Esto significa que debe buscarse otra forma de actuación para ejercer la fuerza necesaria para el corte. Por otra parte, las condiciones de operación requeridas para la aplicación original de Intel impiden el uso de otro mecanismo de actuación, de forma que puede concluirse que no es posible implementar la herramienta de corte para esta aplicación específica. Si esto es realizable para otros casos, dependería del material y geometría a cortar de la aplicación en particular.

Ya sea con punta de tungsteno o de diamante, los límites de resistencia a la tracción del piezoeléctrico con respecto a los del cobre indican que la pila piezoeléctrica podría utilizarse solamente para otorgar un tercer grado de libertad a la herramienta de manipulación y no para implementar la actuación de la herramienta de corte. Este es un nuevo resultado con respecto al proyecto anterior, pues no se contaba con estos datos

de los materiales (cobre y piezoeléctrico) ni con las simulaciones del análisis de von Mises realizadas en este proyecto que permitieron esclarecer que no es posible realizar el corte utilizando este actuador.

De esta forma, no tendría sentido implementar la herramienta de corte en tamaño micrométrico aún cuando se contara con los procesos de fabricación requeridos, pues es claro que la herramienta propuesta no funcionaría. Tampoco se implementó un prototipo de mayor escala aunque se contara con una forma para implementar la punta de la herramienta de corte, dado que los resultados obtenidos en la simulación son suficientemente concluyentes para descartar la factibilidad del diseño de la herramienta sin necesidad de experimentar con un prototipo, por lo que se excluye de los actuadores por integrar en el prototipo del minirobot.

De acuerdo con las condiciones de operación, la opción viable para implementar comunicación inalámbrica con el robot es por medios ópticos. La comunicación infrarroja permite evitar la interferencia magnética del haz de electrones, así como lograr comunicación a una distancia relativamente grande en comparación con el tamaño del robot. Se logró implementar un anillo de transceptores con traslape de patrones de radiación que permite cobertura de comunicación bidireccional de la región de operación completa, siendo esta un círculo de 30cm de diámetro.

El seguimiento del robot implementado permite determinar las coordenadas del robot y con ello obtener información para calcular la cantidad y dirección de los pasos necesarios obtener el desplazamiento deseado. Esta solución es también útil para aplicaciones fuera de la cámara del SEM. Se mejoró el reconocimiento del minirobot y el sistema de seguimiento.

Con respecto al ensamble del prototipo del miniobot, una vez solucionados una serie de inconvenientes con el circuito impreso y la programación del microcontrolador, el minirobot pudo ensamblarse exitosamente, faltando únicamente de incorporar en el circuito impreso los actuadores de manipulación. Aunque debido al gran retraso causado por la falla en el circuito impreso aún quedaron por completar las pruebas con los actuadores de manipulación, fue posible incorporar las otras funciones del minirobot y realizar pruebas básicas de las mismas para observar la reacción de las partes, con lo cual pudo comprobarse que las partes ensambladas eran funcionales y el conjunto en sí era también funcional. El prototipo implementado permitirá continuar realizando pruebas en el futuro, dado que el circuito impreso ya contempla las terminales necesarias para los actuadores de manipulación y para modificaciones en la programación del minirobot, necesarias para continuar pruebas más complejas del minirobot. Cabe destacar que el minirobot ensamblado aún podría reducirse un poco más en sus dimensiones, sin embargo esto

hubiera significado prescindir de estos pines adicionales que son necesarios para la etapa de pruebas.

Las pruebas de software realizadas mostraron que la integración de funciones fue exitosa y permitirá continuar realizando pruebas del minirobot; se optimizó tanto el costo del sistema de detección y rastreo del minirobot como la comunicación entre módulos de software y la implementación de rutinas en el microcontrolador del minirobot, considerando también un eficiente uso de la memoria disponible.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se resumen las conclusiones y recomendaciones de este proyecto.

Se analizó el comportamiento del sistema real de locomoción, además de los requerimientos y limitantes que este presentó:

- Los adhesivos utilizados introducen variaciones importantes en el rendimiento mecánico, al variar la capacidad de flexión de los bimorfos.
- Para un ensamble micrométrico de prototipos se requiere realizar un prototipo con capas delgadas depositadas en lugar de adheridas, sin embargo los equipos necesarios no están disponibles actualmente en el país. El ITCR requiere al menos la adquisición del siguiente equipo para la construcción del prototipo en la microescala: un spin coater, un sistema de deposición de descarga de arco, un sistema de deposición de máscaras de fotorresistencias, un alineador de máscaras y un sistema de exposición fotolitográfica para la microfabricación.
- Durante la ejecución del proyecto no se encontró un proceso de microfabricación para prototipado a bajo costo que incluyera materiales piezoeléctricos y con el cual se pudiera fabricar un prototipo micrométrico.
- Por todo lo anterior si bien el sistema vibra a las frecuencias adecuadas, requiere mayores pruebas para la optimización para lograr seguir trayectorias complejas como lo requiere la aplicación final. Para esto debe analizarse el diseño de la estructura como un todo y no solo de las extremidades. Se plantea la hipótesis de revisar la estructura del sistema planteado por Edqvist y Snis, estudiándolo para el caso de dimensiones reducidas del minirobot utilizando microfabricación. Con esto se reduce el peso y puede optimizarse el sistema de locomoción, pero requiere un presupuesto adecuado para el acceso a tecnologías de fabricación personalizadas.
- Las pruebas de los piezoeléctricos con una fuente de frecuencia variable demostraron que el minirobot puede desplazarse al aplicar una frecuencia de 545 Hz.

Con respecto a los actuadores de posicionamiento (manipulador) y corte, se concluye lo siguiente:

- Se implementó un prototipo de mayor escala del actuador de posicionamiento como prueba de concepto del principio de posicionamiento.
- El prototipo del actuador de posicionamiento resonó a una frecuencia de 20Hz y mostró un desplazamiento de 25nm/mV.

- Para realizar un análisis más completo del posicionador y la herramienta de corte puede incluirse un análisis de fatiga en las simulaciones.
- La ausencia de suplidores nacionales y las limitaciones de los procesos de microfabricación disponibles en el mercado fueron factores determinantes para dificultar la reducción del tamaño de los prototipos de los actuadores estudiados
- Debido a limitaciones en los procesos de microfabricación disponibles en el mercado, no fue posible implementar un prototipo de pila piezoeléctrica de tamaño micrométrico para acoplarla al prototipo de manipulador.
- Se realizó una serie de simulaciones sucesivas para intentar aproximar simplificada la simulación del corte, puesto que no es posible simular un corte con COMSOL.
- En las simulaciones se obtuvo la fuerza máxima que se puede aplicar con la herramienta de corte antes de obtener divergencia, junto con el correspondiente desplazamiento de la herramienta en el cobre en el espesor de la interconexión.
- Se determinó la tensión mecánica obtenida al aplicar la fuerza máxima posible mencionada en la conclusión anterior.
- Aunque en las simulaciones no puede simularse el corte, sí es posible observar que se alcanza la zona de estricción en la curva tensión-deformación según los valores de tensión simulados en el análisis de von Mises.
- La herramienta de corte no puede implementarse en la escala requerida por el minirobot debido a que la pila piezoeléctrica utilizada como actuador se fracturaría antes de cortar la interconexión de cobre.
- Debido al ambiente de vacío en la cámara del SEM en que el robot operaría, tampoco pueden utilizarse otras formas de actuación, al menos para la aplicación de prueba de circuitos integrados. En el caso de otras aplicaciones, debe estudiarse cada caso particular.
- La herramienta de corte micrométrica no es factible, al menos para la aplicación inicialmente prevista (corte de interconexiones de cobre). El estudio del corte de materiales para otras aplicaciones está fuera del alcance del proyecto de investigación reportado en este informe.

Con respecto al sistema de comunicación, se concluye que:

- Fue posible implementar la comunicación bidireccional entre el minirobot y el computador de control utilizando protocolo IrDA.
- A partir de las pruebas de patrón de radiación, se encontró que el ángulo de apertura de los diodos transmisores es de aproximadamente 40°.

- El arreglo de transceptores implementado permite cobertura completa en el área de operación.

Del ensamble del robot y la integración de sus partes, se concluye que:

- Fue posible reducir el tamaño del código fuente para programar el microcontrolador del minirobot cumpliendo los requerimientos de espacio en memoria.
- Se diseñó e implementó un prototipo del minirobot que mide 2.3 cm x 2.6 cm x 1.78 cm, para un volumen total de 10.78 cm³. Aunque no se logró la meta de tamaño, pudo comprobarse el principio de funcionamiento del minirobot con este prototipo construido a una escala mayor y pueden continuar realizándose pruebas para tomar decisiones sobre formas de reducción de tamaño para un futuro robot de menor escala.
- Si en el futuro se logra reducir el tamaño de los actuadores de locomoción, el tamaño de este prototipo puede reducirse eliminando el área y pines necesarios para los componentes de prueba, así como utilizando circuitos impresos de doble cara y conexiones “through via”.
- Según nuestro conocimiento actual del estado del arte no hay ningún robot con características o funciones similares a las del robot de este proyecto.
- Se determinó que el robot, en general, es factible bajo las condiciones necesarias de microfabricación, con excepción de la herramienta de corte.
- Las estrategias de programación en ensamblador del microcontrolador resultaron particularmente eficientes desde el punto de vista del uso de memoria y velocidad de ejecución con respecto a programación en lenguaje C .
- Debe optimizarse el seguimiento del minirobot en los bordes de la región de operación.
- Se recomienda optimizar la calibración del rastreo para hacerla más intuitiva para el usuario.
- La transmisión de datos entre aplicaciones vía XML fue una práctica exitosa para la integración de los módulos de software necesarios operar el minirobot.
- El prototipo llegó a un grado de implementación y pruebas básicas que permitió determinar que todas las partes son funcionales, sentando la base para continuar su optimización y pruebas más detalladas.
- A pesar de que el proyecto actual no podría extenderse más, se recomienda continuar con las pruebas en otro proyecto u actividad de fortalecimiento,

considerando que hubo diversos motivos que retrasaron el proyecto y redujeron el tiempo disponible para esto.

Considerando los sistemas desarrollados, así como la viabilidad de utilizar partes del robot para la automatización de procedimientos en la industria y en la investigación, se recomienda desarrollar sistemas robóticos de igual o mayor escala tomando como base este proyecto para obtener un mayor beneficio a corto plazo de los resultados obtenidos. Esto por cuanto existen aplicaciones en las cuales los actuadores podrían implementarse a mayor escala para disminuir los costos de fabricación, o bien pueden implementarse integrando partes existentes en el mercado, para los cuales podrían reutilizarse los componentes, sistemas y arquitecturas desarrollados en este proyecto. La continuación de las pruebas del minirobot permitirá valorar opciones de reducción de tamaño si desea construirse un prototipo más pequeño en el futuro.

7. APORTES Y ALCANCES

Hasta el día de hoy, no tenemos conocimiento de ningún proyecto de investigación en el país abarcando temas relacionados con minirobots, ni la implementación de uno. Sin duda uno de los aportes de este proyecto es la experiencia ganada por los investigadores al abrir camino en este tema en el país, tanto en el campo de la simulación como en las primeras implementaciones, así como en la consolidación del equipo de trabajo conjunto para abarcar las diferentes disciplinas involucradas. El prototipo implementado en el marco de este proyecto permite continuar las pruebas del minirobot y con ello abre la puerta para futuras aplicaciones del conocimiento obtenido.

En el marco de este proyecto se publicaron los siguientes artículos:

- Simulation of translational piezoelectric microactuators with application in miniaturized robots. Marta Vílchez Monge, Estuardo Herrera Muñoz, Natalia Rodríguez Rodríguez, Paola Vega Castillo. Tecnología en Marcha, Vol. 25, N° 5, Pág124-130. Número Especial 2012.
- Simulation of laminar bimorph piezoelectric microactuators with application in miniaturized robots. Juan A. Alfaro-Barrantes, Paola Vega-Castillo, Marta Vílchez-Monge, Marco Rodríguez-Montero. Vol. 25, N° 5. Pág 116-123.

En el marco del proyecto se desarrollaron los siguientes proyectos de graduación:

- Prototipo de Piezoeléctrico Resonante con Fricción Asimétrica, de Allan Granados Jiménez.
- Diseño de Sistema de Locomoción del Proyecto Spiderbot basado en la Fricción Asimétrica, de Juan Andrés Alfaro Barrantes.
- Suministro de energía óptico mediante láser a un robot móvil milimétrico, de Stanley Hernández.
- Sistema de control para dirigir un láser como suministro de energía a un robot milimétrico móvil, de Juan Carlos Rivera Elizondo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.cmicro.com/products/probe-stations/150mm-wafer/pm5/pm5-150mm-manual-probe-system>
- [2] http://www.ruhr-uni-bochum.de/exogeol/zrem_web/page10/page10.html
- [3] http://www.kammrath-weiss.com/ic-test/fotos/f_1-4ag.jpg
- [4] Castro Vargas, L. “Nanospider: la siguiente generación de multímetros”. Seminario INTEL-CENAT-Universidades, setiembre 2006.
- [5] <http://www.cmicro.com/products/accessories-and-upgrades/probeheads/ph600/ph600-automated-submicron-probehead->
- [6] <https://www.keithley.com/products/semiconductor/parametricanalyzer/4200scs/?path=4200-SCS/Documents#3>
- [7] <http://www.i-swarm.org/>
- [8] Novikov, Y. , Rakov, A. and Filippov, M. “Beam current dependence of SEM electron probe diameter linear and angular measurements”, *Measurement Techniques*, Vol. 47, No. 5, 2004, 438-442
- [9] E. Edqvist, “Polymer actuators for Micro Robotic Applications,” Uppsala University, 2007.
- [10] “Researchers Hope to Mass-Produce Tiny Robots,” *PHYSorg.com*, no. 1, pp. 1–2, 2009.

- [11] A. J. Fleming and R. Moheimani, Piezoelectric Transducers for Vibration control and Damping. Berlin, Germany, 2005.
- [12] T. R. Dargaville, M. C. Celina, J. M. Elliott, P. M. Chaplya, G. D. Jones, D. M. Mowery, R. A. Assink, R. L. Clough, and J. W. Martin, "Characterization , Performance and Optimization of PVDF as a Piezoelectric Film for Advanced Space Mirror Concepts," SAND2005-6846, 2005.
- [13] N. Snis, "Actuators for autonomous microrobots," Uppsala University, 2008.
- [14] A. Granados, "Prototipo de Piezoeléctrico Resonante con Fricción Asimétrica," Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2010.
- [15] Physik Instrumente. "PICMA ® Bender Piezo Actuator – PL112", PL112_Datasheet. /Consulta en Agosto de 2012.
- [16] W. C. Young and R. G. Budynas, Roark's Formulas for Stress and Strain - 7th edition: McGraw-Hill, International Edition 2002
- [17] CTS Electronic Components. Piezoelectric Constants for 3203HD. CTS Electronic Components, Inc. January 24, 2005.
- [18] Rodecker, C. Jumps,calls and the stack. Assembler tutorial. <http://www.avrbeginners.net> Ver 1.0.2.
- [19] Oliveira, M., Santo, C.,; Costa, L., Ferreira, M. Quadruped Robot Locomotion using a Global Optimization Stochastic Algoritm. AIP Conf. Proc. 1389, 500.(2012).
- [20] Vega-Castillo, P., Vílchez-Monge, M., Villegas-Lemus, M., Alvarado-Moya, P. "Consideraciones de diseño para robots miniaturizados". Tecnología en Marcha. Vol 23 No. 5, Número Especial 2010. pp 60-66.
- [21] Córdoba Meneses, A. "Identificación y rastreo visual de un robot por medio de secuencias de imágenes digitales". Instituto Tecnológico de Costa Rica, Junio 2010.
- [22] Watada, J., Musa, Z., Jain, L., & Fulcher, J. (2010). "Human tracking: A state-of-art survey". In R. Setchi, I. Jordanov, R. Howlett & L. Jain (Eds.), Knowledge-based and intelligent information and engineering systems (pp. 454-463) Springer Berlin / Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-15390-7_47
- [23] Yilmaz, A., Javed, O., and Shah, M. 2006. Object tracking: A survey. ACM Comput. Surv. 38, 4, Article 13 (Dec. 2006), 45 pages. DOI = 10.1145/1177352.1177355
- [24] Rivera Elizondo, J. Sistema de Control para Dirigir un Láser como Suministro de Energía a un Robot milimétrico Móvil. Trabajo de Graduación ITCR Licenciatura Ingeniería Electrónica, Noviembre 2011.

[25] <http://www.memscap.com/products/mumps/piezomups>

[26] Gorman, J.J. et al. "Design of an On-Chip Micro-Scale Nanoassembly System", Proceedings of the 4th International Symposium on Nanomanufacturing, pp. 160-162, 2006.

[27] Jensen, Kimberly A. "Analysis And Design of Surface Micromachined Micromanipulators for Out-of-Plane Micropositioning". Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, 2003.

[28] A. Kortschack et al. "Development of mobile versatile nanohandling microrobots: design, driving principles, haptic control". Robotica, Vol. 23, Issue 04, July 2005.

[29]

[http://www.channelproducts.com/ includes/Piezoelectric%20Ceramic%20Properties.pdf](http://www.channelproducts.com/includes/Piezoelectric%20Ceramic%20Properties.pdf)

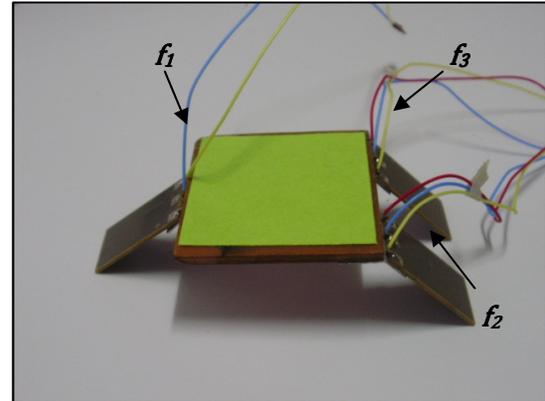
Anexo 1 - Hoja de Datos

Acuatores del Minirobot

a) Sistema de Locomoción

Descripción General

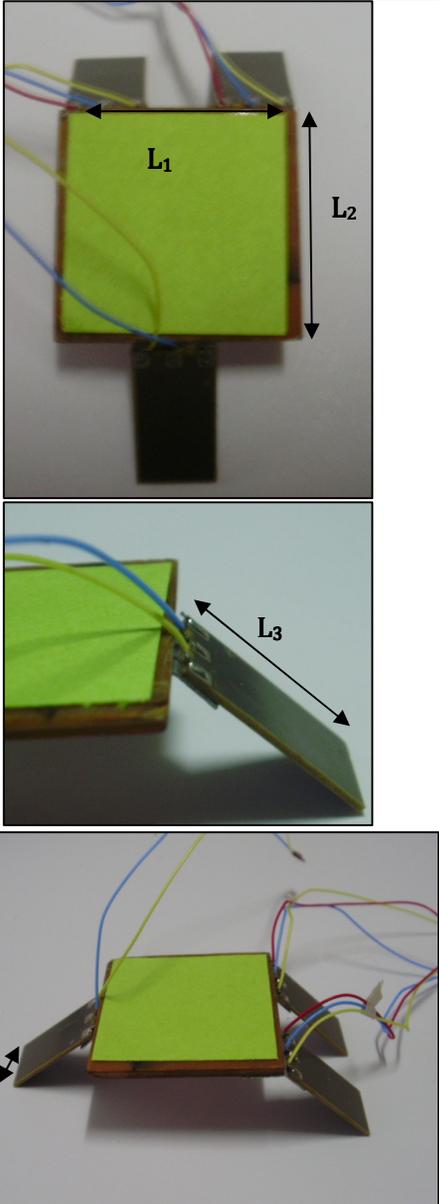
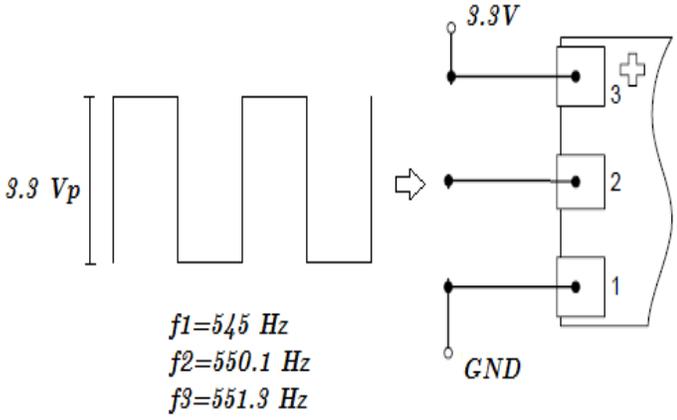
El sistema de locomoción del minirobot corresponde al bloque cuya función es brindar el movimiento al cuerpo del robot mediante el uso de un principio de actuación piezoeléctrico.



Sistema de Locomoción del minirobot

Características

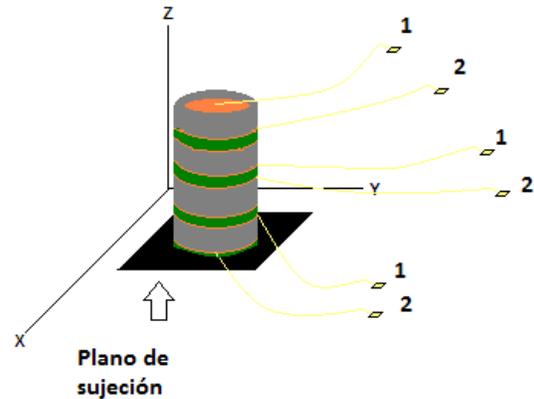
| | |
|---------------------------------|---|
| Materiales | <p>Los materiales utilizados para el desarrollo del sistema de locomoción del minirobot comprenden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Actuador piezoeléctrico cerámico PL112 de Physik Instrumente. • Viga de Aluminio. • Kapton • Adhesivo de alto desempeño (Epoxy) • Acetona • Lámina de cobre • Placa de circuito impreso |
| Frecuencias de operación | $f_1 = 545 \text{ Hz}$ $f_2 = 550 \text{ Hz}$ $f_3 = 551 \text{ Hz}$ |
| Tensión de operación | 3.3 V |
| Corriente de operación | 1.22 mA |
| Potencia consumida | 4 mW |

| | |
|---|--|
| <p>Diagrama Dimensional del Sistema de Locomoción</p> <p>$L_1 = 2.3 \text{ cm}$ $L_2 = 2.6 \text{ cm}$ $L_3 = 1.78 \text{ cm}$ $L_4 = 0.96 \text{ cm}$</p> |  |
| <p>Diagrama de Conexión</p> <p>Para cada uno de los actuadores de los elementos de locomoción, el diagrama de conexión adecuado corresponde al mostrado, donde f_1, f_2 y f_3 corresponden a las frecuencias de resonancia de los actuadores.</p> |  <p>$f_1 = 54.5 \text{ Hz}$ $f_2 = 550.1 \text{ Hz}$ $f_3 = 551.3 \text{ Hz}$</p> |
| <p>Velocidad de traslación</p> | <p>1 cm/s</p> |

b) Pila Piezoeléctrica

Descripción General

La pila piezoeléctrica comprende otro de los actuadores desarrollados para el minirobot con el fin de tener un mecanismo de movimiento vertical disponible en el robot.



Pila Piezoeléctrica del minirobot

Características

| | |
|--|--|
| <p style="text-align: center;">Materiales</p> | <p>Los materiales utilizados para el desarrollo del manipulador XY del minirobot comprenden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Discos de material piezoeléctrico (PSI-5A4E, Piezo Systems Inc) • Kapton • Adhesivo reposicionable • Epoxy conductor • Acetona • Lámina de cobre • Cable de cobre (40 μm de diámetro) |
| <p>Frecuencia de operación</p> | <p style="text-align: center;">$f = 300 \text{ Hz}$</p> |
| <p>Tensión de operación</p> | <p style="text-align: center;">10 V (3.3V cuando se alimenta desde el microcontrolador)</p> |
| <p>Corriente de operación</p> | <p style="text-align: center;">74 μA a 10V</p> |
| <p>Potencia consumida</p> | <p style="text-align: center;">0.7 mW a 10V</p> |
| <p>Desplazamiento aproximado</p> | <p style="text-align: center;">2nm /V</p> |
| <p>Diagrama Dimensional de la Pila Piezoeléctrica</p> | |

$$L_1 = 1.5 \text{ cm}$$

$$L_2 = 1.5 \text{ cm}$$

$$L_3 = 0.5 \text{ cm}$$

$$L_4 = 3.2 \text{ mm}$$

$$L_5 = 5 \text{ mm}$$

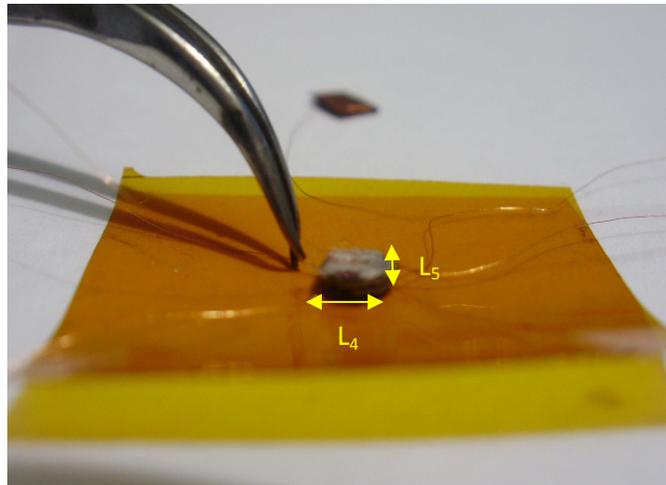
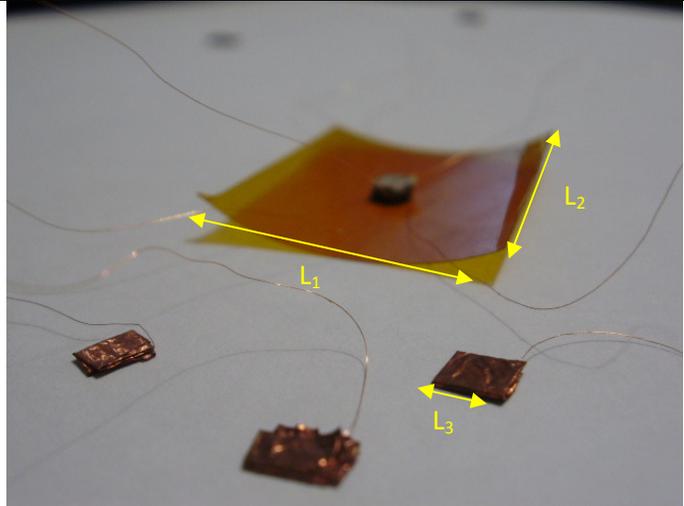
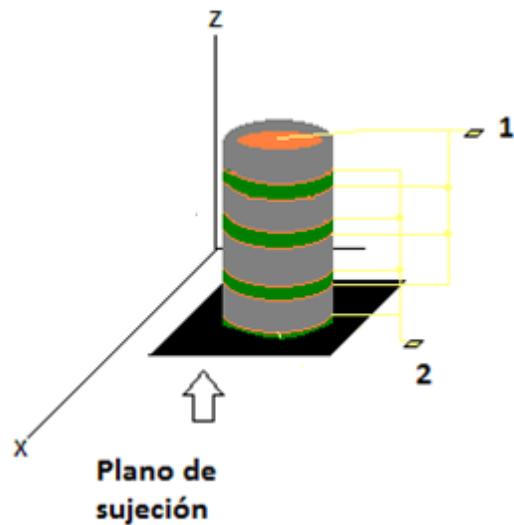


Diagrama de Conexión

Las terminales de conexión de la pila piezoeléctrica son denotadas como 1 y 2 para cada elemento del actuador y su conexión se realiza de acuerdo con la figura mostrada a la derecha.

1: Tensión de alimentación

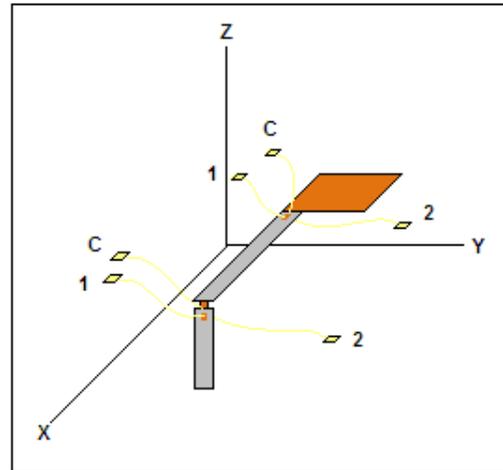
2: Común o tierra



c) **Manipulador XY**

Descripción General

El manipulador XY de actuación por efecto piezoeléctrico comprende uno de los sistemas de actuación del minirobot para el posicionamiento de objetos.



Micromanipulador XY del minirobot

Características

| | |
|---|--|
| Materiales | <p>Los materiales utilizados para el desarrollo del manipulador XY del minirobot comprenden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material piezoeléctrico laminado Polivinilidenofluoruro (PVDF) recubierto con níquel como electrodo • Kapton • Adhesivo reposicionable • Epoxy conductor • Acetona • Lámina de cobre • Cable de cobre (40 μm de diámetro) |
| Frecuencias de operación | $f = 15 \text{ Hz}$ |
| Tensión de operación | 20 V (hasta 3.3V cuando se alimenta desde el microcontrolador) |
| Corriente de operación | 74 μA a 20V |
| Potencia consumida | 1.4 mW a 20V |
| Desplazamiento aproximado | 25 nm/mV (500 μm a 20V) |
| <p>Diagrama Dimensional del Micromanipulador XY</p> <p>$L_1 = 1 \text{ cm}$</p> | |

Anexo 1- Robots miniaturizados: diseño, implementación y aplicaciones

$$L_2 = 2 \text{ cm}$$

$$L_3 = 1 \text{ cm}$$

$$L_4 = 1.3 \text{ cm}$$

$$L_5 = 0.6 \text{ cm}$$

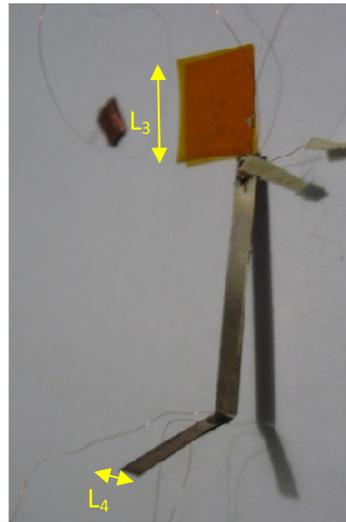
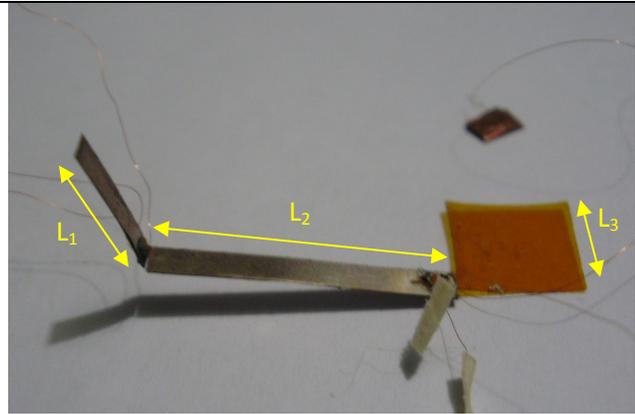


Diagrama de Conexión

Las terminales de conexión del manipulador XY son denotadas como C, 1 y 2 para cada elemento del actuador. La conexión adecuada del actuador se muestra en la figura de la derecha.

C: Común o tierra

1: Tensión de alimentación

2: Tensión de alimentación

