



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA
Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SERPIENTE
MODULAR CON CONTROL DE TRAYECTORIA POR VISIÓN
ARTIFICIAL PARA EXPLORACIÓN Y MONITOREO EN UN ENTORNO
CONTROLADO.”**

AUTOR: JIMÉNEZ TORRES, LENIN EDUARDO

DIRECTOR: ING. CÓRDOVA CRUZATTY, ANDREA CONCEPCIÓN

LATACUNGA

2019



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SERPIENTE MODULAR CON CONTROL DE TRAYECTORIA POR VISIÓN ARTIFICIAL PARA EXPLORACIÓN Y MONITOREO EN UN ENTORNO CONTROLADO.” fue realizado por el señor *Jiménez Torres, Lenin Eduardo* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 25 de Abril del 2019

Firma:

Andrea Córdova
.....

Ing. Córdova Cruzatty, Andrea Concepción

C.C. : 1803797222



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Jiménez Torres, Lenin Eduardo*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SERPIENTE MODULAR CON CONTROL DE TRAYECTORIA POR VISIÓN ARTIFICIAL PARA EXPLORACIÓN Y MONITOREO EN UN ENTORNO CONTROLADO”*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 25 de Abril del 2019

Firma:

Jiménez Torres, Lenin Eduardo

C.C.: 1726371840



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN

Yo, *Jiménez Torres, Lenin Eduardo*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SERPIENTE MODULAR CON CONTROL DE TRAYECTORIA POR VISIÓN ARTIFICIAL PARA EXPLORACIÓN Y MONITOREO EN UN ENTORNO CONTROLADO”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 25 de Abril del 2019

Firma:

Jiménez Torres, Lenin Eduardo

C.C.: 1726371840

DEDICATORIA

El presente proyecto es una representación del progreso y evolución académica de su autor, cuyas metas fueron cumplidas gracias al apoyo, respaldo y motivación de su familia, núcleo donde encontró la base de su formación moral y ética. También como una insigne de los formadores académicos de quienes guardo un recuerdo perpetuo de respeto y admiración.

Como muestra de mis sentimiento y como motivo justo, dedico este trabajo a mi padre, a mi madre y a mis hermanos, quienes de formas diferentes me brindaron su apoyo, compañía, paciencia, amistad y afecto en este periodo de mi vida.

También a las personas en quienes encontré sosiego, amistad y afecto, semblantes de humanidad que me impulsaron día a día.

AGRADECIMIENTO

Durante estos años de mi vida he sido testigo la providencia del destino y del afecto sincero de quienes me rodean. Sin concernir de una cantidad opulenta pero si de su gran ayuda e influencia personal, deseo aludir mi sincera gratitud con temor de olvidar algo y disculpándome por ello.

Agradezco a mi padre su compañía y dedicación, tras lo agotador que fueron las circunstancias, por las horas en caminos, por su vigilia en mi salud, por su amistad, por el sacrificio personal e incluso por su colaboración en el desarrollo del presente proyecto.

A mi madre, quien me brindó su oído y palabra para liberarme de inseguridades y tomar impulso, por su ineludable apoyo en recursos y confianza en mi capacidad, quien sustentó este proyecto y alentó mis descisiones.

A mis hermanos, a quienes siempre he considerado como amigos incondicionales que tras las arduas circunstancias de vida, siempre hemos podido resguardar nuestra unión y afecto.

Agradezco a los docentes que apoyaron sincera y objetivamente mi formación, en los que he encontrado una amistad y un ideal profesional.

Finalmente quiero agradecer a quien permite la existencia del todo y me ha concedido apreciar esta peculiar escena.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICACIÓNi

AUTORÍA DE RESPONSABILIDADii

AUTORIZACIÓN iii

DEDICATORIAiv

AGRADECIMIENTO v

ÍNDICE DE CONTENIDOSvi

ÍNDICE DE TABLAS xiii

ÍNDICE DE FIGURASxv

RESUMENxx

ABSTRACT.....xxi

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Introducción..... 1

1.2 Antecedentes.....2

1.3 Formulación del problema.....5

1.4 Objetivos del proyecto.....5

1.5 Justificación e importancia.6

| | |
|--|---|
| 1.6 Hipótesis | 8 |
| 1.7 Variables de la investigación..... | 8 |
| 1.8 Alcances..... | 8 |

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

| | |
|---|----|
| 2.1 Locomoción de la serpiente | 9 |
| 2.1.1 La serpiente..... | 9 |
| 2.1.2 Anatomía de la serpiente | 9 |
| 2.1.3 Tipos de locomoción..... | 12 |
| 2.1.4 Limitaciones de la locomoción de serpiente..... | 14 |
| a. Grado de locomoción en desplazamiento | 14 |
| b. Locomoción horizontal en desplazamiento | 15 |
| c. Locomoción vertical en desplazamiento..... | 16 |
| d. Factor de Fricción..... | 17 |
| e. Factor de distribución de peso | 18 |
| 2.1.5 Principios Fundamentales de la Locomoción de serpiente..... | 20 |
| 2.2 Estado del arte..... | 20 |
| 2.2.1 Robots modulares | 20 |
| 2.2.2 Robots serpiente..... | 21 |
| 2.2.3 Clasificación de Robots serpiente..... | 21 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.2.4 | Sistemas de control para robots serpiente..... | 23 |
| 2.3 | Requerimientos y limitaciones del sistema..... | 24 |
| 2.3.1 | Requisitos del sistema mecánico. | 25 |
| 2.3.2 | Grados de libertad..... | 25 |
| 2.3.3 | Locomoción del sistema | 26 |
| 2.3.4 | Número de módulos..... | 27 |
| 2.3.5 | Parámetros de control del sistema | 27 |
| 2.3.6 | Requisitos Sensoriales | 27 |
| 2.3.7 | Comunicación del sistema | 28 |
| 2.4 | Selección de componentes..... | 28 |
| 2.4.1 | Sensores | 28 |
| a. | Sensor de imagen | 29 |
| b. | Sensor de distancia | 30 |
| c. | Sensor encoder | 32 |
| 2.4.2 | Actuadores | 33 |
| a. | Servomotor..... | 33 |
| b. | Línea de motor D.C. | 35 |
| c. | Línea de fuente de alimentación | 37 |
| 2.4.3 | Dispositivo de control..... | 38 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.5 | Método de manufactura | 39 |
| 2.5.1 | Impresión 3D – FDM..... | 41 |
| 2.6 | Material de la estructura | 41 |
| 2.6.1 | Criterios de selección del material..... | 42 |
| 2.7 | Lenguaje y plataforma de programación | 43 |
| 2.8 | Detección de objetos por visión artificial | 45 |
| 2.8.1 | Análisis por espacios de color | 46 |

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Arquitectura del sistema mecánico..... | 48 |
| 3.2 | Análisis dinámico | 49 |
| 3.3 | Diseño de estructuras | 51 |
| a. | Diseño de módulo articular..... | 51 |
| b. | Diseño de módulo de desplazamiento | 52 |
| c. | Diseño de módulo guía | 54 |
| 3.4 | Ensamble..... | 55 |
| 3.5 | Cálculo de potencia mecánica de motor | 56 |
| 3.6 | Análisis estructural | 58 |
| 3.7 | Volúmen de Trabajo | 61 |
| 3.8 | Manufactura del sistema mecánico..... | 63 |

| | | |
|-----|--|----|
| 3.8 | Diseño e implementación del entorno controlado | 64 |
|-----|--|----|

CAPÍTULO IV

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Sistema electrónico..... | 67 |
| 4.1.1 | Potencia de alimentación | 67 |
| 4.1.2 | Diagrama de Conexión del Sistema Electrónico | 69 |
| 4.1.3 | Implementación del Sistema Electrónico | 70 |
| 4.2 | Sistema de control..... | 71 |
| 4.2.1 | Variables del Sistema | 71 |
| 4.2.2 | Perturbaciones..... | 71 |
| 4.2.3 | Estructura del sistema de control..... | 72 |
| 4.2.4 | Sistema de Control de Locomoción..... | 72 |
| a. | Composición de la locomoción del robot | 73 |
| b. | Variables del sistema de locomoción | 73 |
| c. | Interpretación matemática de la planta. | 74 |
| d. | Estrategia de control | 75 |
| e. | Tipo de Sistema..... | 75 |
| f. | Selección del controlador | 76 |
| f.1 | Selección de controlador para locomoción horizontal | 76 |

| | | |
|-----------------------------|---|-----|
| f.2 | Selección de controlador para locomoción vertical | 79 |
| f.3 | Selección de controlador para locomoción torsional | 80 |
| f.4 | Selección de controlador para desplazamiento tangencial | 80 |
| g. | Diseño del Controlador..... | 80 |
| g.1 | Control de locomoción horizontal | 81 |
| g.2 | Control de locomoción Vertical..... | 89 |
| g.3 | Control de locomoción Torsional | 92 |
| g.4 | Desplazamiento Tangencial..... | 96 |
| 4.2.5 | Sistema de Visión Artificial..... | 96 |
| a. | Procesamiento de Imágenes..... | 97 |
| b. | Determinación de dirección de desplazamiento. | 102 |
| c. | Esquema del sistema de visión artificial..... | 104 |
| 4.2.6 | Sistema de Control de Trayectoria | 105 |
| 4.2.7 | Implementación del Sistema de Control..... | 109 |
| a. | Programación en Arduino | 109 |
| b. | Programación en Python..... | 110 |
| 4.2.8 | Interface de usuario y operación del sistema..... | 111 |
| CAPÍTULO V | | |
| PRUEBAS Y RESULTADOS | | |
| 5.1 | Pruebas de Funcionamiento..... | 113 |

| | | | |
|---|--|-----|------------|
| 5.1.1 | Pruebas del sistema de visión artificial..... | 113 | |
| 5.1.2 | Pruebas de locomoción..... | 115 | |
| 5.1.3 | Pruebas de control de trayectoria por visión artificial..... | 117 | |
| 5.2 | Validación de la Hipótesis..... | 134 | |
| CAPÍTULO VI | | | |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | | 138 |
| 6.1 | Conclusiones..... | 138 | |
| 6.2 | Recomendaciones | 140 | |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | | | 142 |
| ANEXOS..... | | | 151 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|------------------|--|----|
| Tabla 1 | Grado de locomoción de las serpientes | 14 |
| Tabla 2. | Criterios selección para el sensor imagen..... | 29 |
| Tabla 3. | Selección de cámara | 30 |
| Tabla 4. | Criterios de selección para sensor de distancia | 30 |
| Tabla 5. | Selección de sensor de distancia..... | 31 |
| Tabla 6. | Criterios de selección para sensor encoder..... | 32 |
| Tabla 7. | Selección de encoder | 32 |
| Tabla 8. | Criterios de selección para servomotores | 33 |
| Tabla 9. | Selección de servomotor..... | 34 |
| Tabla 10. | Criterios de selección para línea de motor D.C..... | 35 |
| Tabla 11. | Selección de línea de motor..... | 36 |
| Tabla 12. | Criterios de selección para línea de fuente de alimentación..... | 37 |
| Tabla 13. | Selección de fuente de alimentación | 38 |
| Tabla 14. | Selección de dispositivo de control | 39 |
| Tabla 15. | Selección de material..... | 43 |
| Tabla 16. | Criterios de selección para el lenguaje y plataforma de programación..... | 43 |
| Tabla 17. | Análisis de lenguajes y entornos de programación | 44 |
| Tabla 18. | Variables en el análisis de la potencia mecánica de los motores..... | 57 |
| Tabla 19. | Valores resultantes de diseño para operación efectiva | 61 |
| Tabla 20. | Variables de los tipos de locomoción..... | 73 |
| Tabla 21. | Matriz de asociación borrosa para controlador difuso de locomoción horizontal... | 84 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 22. Resultados de controlador difuso para los actuadores Sci..... | 85 |
| Tabla 23. Matriz de asociación borrosa para controlador difuso de locomoción torsional. | 95 |
| Tabla 24. Resultados del controlador fuzzy de locomoción torsional..... | 95 |
| Tabla 25. Pruebas de funcionamiento en Posición 1 | 121 |
| Tabla 26. Pruebas de funcionamiento en Posición 2 | 123 |
| Tabla 27. Pruebas de funcionamiento en Posición 3 | 126 |
| Tabla 28. Pruebas de funcionamiento en Posición 4 | 128 |
| Tabla 29. Pruebas de funcionamiento en Posición 5 | 130 |
| Tabla 30. Pruebas de funcionamiento en Posición 6 | 132 |
| Tabla 31. Resultados de Repetibilidad y Evasión en pruebas de funcionamiento | 135 |
| Tabla 32. Variables de la hipótesis | 136 |
| Tabla 33. Frecuencias teóricas esperadas para las variables de la hipótesis | 136 |
| Tabla 34. Resultados de la Chi cuadrada..... | 137 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Serpiente robot Mamba..... | 2 |
| Figura 2. Locomoción del robot ReBIS | 3 |
| Figura 3. Operación del robot USAR..... | 3 |
| Figura 4. Robot ápodo funcional impreso en 3D | 4 |
| Figura 5. Locomoción en varios escenarios | 4 |
| Figura 6. Estructura anatómica de la serpiente..... | 11 |
| Figura 7. Tipos de serpientes..... | 12 |
| Figura 8. Tipos de locomoción de las serpientes..... | 13 |
| Figura 9. Curva de relación entre el peso-longitud con la locomoción de las serpientes..... | 15 |
| Figura 10. Movimiento horizontal de la víbora de maíz | 16 |
| Figura 11. Análisis del movimiento vertical durante el desplazamiento..... | 17 |
| Figura 12. Dirección de las escamas de una serpiente coral | 18 |
| Figura 13. Análisis de la fricción en puntos dinámicos de apoyo | 18 |
| Figura 14. Distribución dinámica del peso corporal de la serpiente, | 19 |
| Figura 15. Robot ápodo Cube Revolutions | 22 |
| Figura 16. Sistema de propulsión de Mamba | 22 |
| Figura 17. Kairo II - Sistema de propulsión por ruedas | 23 |
| Figura 18. Representación por el modelo HSV..... | 47 |
| Figura 19. Esquema de estructura del sistema mecánico | 48 |
| Figura 20. Diagrama de cuerpo libre del módulo de desplazamiento..... | 49 |
| Figura 21. Diagrama de fuerza de Avance del módulo de desplazamiento | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Módulo articular..... | 52 |
| Figura 23. Componentes del módulo articular | 52 |
| Figura 24. Módulo de Desplazamiento | 53 |
| Figura 25. Componentes del módulo de desplazamiento..... | 53 |
| Figura 26. Motricidad requerida para la cámara | 54 |
| Figura 27. Módulo guía | 55 |
| Figura 28. Ensamble sistema mecánico..... | 55 |
| Figura 29. Ejes de referencia sobre actuadores | 56 |
| Figura 30. Análisis de par del motor | 57 |
| Figura 31. Posiciones de análisis de mecanismo..... | 58 |
| Figura 32. Condiciones de frontera del análisis estático de la estructura mecánica..... | 59 |
| Figura 33. Análisis estático de estructura..... | 60 |
| Figura 34. Rangos de trabajo del mecanismo..... | 62 |
| Figura 35. Envolvente de trabajo del mecanismo | 62 |
| Figura 36. Manufactura de la estructura..... | 63 |
| Figura 37. Implementación del sistema mecánico | 63 |
| Figura 38. Diseño del entorno controlado | 64 |
| Figura 39. Implementación de entorno controlado..... | 65 |
| Figura 40. Adición de cámaras en Ip camera viewer | 65 |
| Figura 41. Monitoreo por cámaras del entorno controlado | 66 |
| Figura 42. Diagrama de conexión del Sistema electrónico | 69 |
| Figura 43. Implementación de sistema electrónico | 70 |
| Figura 44. Implementación de piel protectora..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 45. Composición del sistema de locomoción del robot | 73 |
| Figura 46. Variables de locomoción horizontal. | 77 |
| Figura 47. Esquema de relaciones entre variables del sistema de locomoción horizontal..... | 78 |
| Figura 48. Esquema del controlador difuso servomotor Sci. | 81 |
| Figura 49. Definición de conjuntos borrosos locomoción horizontal, variable estados..... | 82 |
| Figura 50. Definición de conjuntos borrosos variable distancia | 83 |
| Figura 51. Definición de conjuntos borrosos, variable variación angular permitida | 83 |
| Figura 52. Superficies de control de controlador difuso. | 85 |
| Figura 53. Esquema del sistema de control sin restricción lateral. | 87 |
| Figura 54. Esquema del sistema de control con control de colisiones | 88 |
| Figura 55. Rango de captura de imagen en posición horizontal..... | 89 |
| Figura 56. Rango de captura de imagen en posición de captura | 90 |
| Figura 57. Orientación de servomotores Sai en posición de captura | 90 |
| Figura 58. Secuencia de oscilación de reposicionamiento | 91 |
| Figura 59. Diagrama de flujo del control de oscilación de reposicionamiento | 91 |
| Figura 60. Estabilización de orientación de captura por locomoción torsional | 92 |
| Figura 61. Direccionamiento de servomotores captura de imagen | 93 |
| Figura 62. Esquema del controlador difuso para control de locomoción torsional..... | 93 |
| Figura 63. Funciones de membresía de variable de orientación de la cámara | 94 |
| Figura 64. Definición de conjuntos borrosos en variable de salida para posición de Sb1 | 94 |
| Figura 65. Curva de control del controlador fuzzy de locomoción torsional..... | 95 |
| Figura 66. Diagrama de flujo del control “todo-nada” para el desplazamiento | 96 |
| Figura 67. Captura panorámica | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 68. Captura de imagen | 98 |
| Figura 69. Conversión HSV | 98 |
| Figura 70. Separación por capas H-S-V | 99 |
| Figura 71. Rangos de espacios de color por capas saturación y brillo. | 100 |
| Figura 72. Filtros por espacios de colo..... | 100 |
| Figura 73. Extracción de objeto..... | 101 |
| Figura 74. Segmentación de imagen. | 101 |
| Figura 75. Secuencia de capturas de imágenes | 102 |
| Figura 76. Secuencia de resultados de análisis de detección de objetos | 103 |
| Figura 77. Agrupación panorámica de resultados | 103 |
| Figura 78. Análisis de direcciones libres en agrupación panorámica | 104 |
| Figura 79. Esquema de procesamiento de sistema de visión artificial..... | 105 |
| Figura 80. Condiciones de análisis en la trayectoria del robot..... | 106 |
| Figura 81. Secuencia de funcionamiento del control de la trayectoria..... | 106 |
| Figura 82. Análisis de direccionamiento de objetivo | 108 |
| Figura 83. Ventana de control y configuración del sistema. | 112 |
| Figura 84. Prueba 1 de sistema de visión artificial..... | 113 |
| Figura 85. Prueba 2 de sistema de visión artificial..... | 114 |
| Figura 86. Prueba 3 de sistema de visión artificial..... | 114 |
| Figura 87. Prueba 4 de sistema de visión artificial..... | 115 |
| Figura 88. Prueba 1 de locomoción – prueba de motricidad..... | 116 |
| Figura 89. Prueba 2 de locomoción – prueba de tunel | 116 |
| Figura 90. Prueba 3 de locomoción – restricción lateral | 117 |

| | |
|--|-----|
| Figura 91. Metodología de pruebas bajo ASTM E2802..... | 118 |
| Figura 92. Posición de elementos Posición 1 | 121 |
| Figura 93. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 1 | 122 |
| Figura 94. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 1 | 123 |
| Figura 95. Posición de elementos Posición 2 | 123 |
| Figura 96. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 2 | 124 |
| Figura 97. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 2 | 125 |
| Figura 98. Posición de elementos Posición 3 | 125 |
| Figura 99. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 3 | 127 |
| Figura 100. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 3 | 127 |
| Figura 101. Posición de elementos Posición 4 | 128 |
| Figura 102. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 4 | 129 |
| Figura 103. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 4 | 129 |
| Figura 104. Posición de elementos Posición 5 | 130 |
| Figura 105. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 5 | 131 |
| Figura 106. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 5 | 131 |
| Figura 107. Posición de elementos Posición 6 | 132 |
| Figura 108. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 6 | 133 |
| Figura 109. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 6 | 133 |

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó y construyó un robot modular de tipo serpiente que emplea un sistema de visión artificial para determinar una trayectoria óptima de desplazamiento, implementado en un entorno donde se manipula la luminosidad, el color y los obstáculos. El robot se estructura mediante tres tipos de módulos manufacturados con impresión 3D – FDM, cuya combinación permite adquirir la locomoción deseada además permitir la integración de sensores y actuadores. El operador puede determinar el destino de la trayectoria mediante una navegación libre con la cámara. El sistema de control, se conforma de dos subsistemas, el de visión artificial, el cual determina la dirección del desplazamiento en base a la identificación de obstáculos y al área de seguridad del robot, además de la compensación angular en caso de desviación en la dirección del destino seleccionado, controlando así la trayectoria del robot. El segundo subsistema es el de control de locomoción que determina la orientación de los eslabones y el desplazamiento del robot.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBOT MODULAR**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**
- **CONTROL DE LOCOMOCIÓN**
- **CONTROL DE TRAYECTORIA**

ABSTRACT

In the present project, a snake-type modular robot is designed and built using an artificial vision system to determine an optimal trajectory of displacement, implemented in an environment where light, color and obstacles are manipulated. The robot is structured by three types of modules manufactured with 3D printing - FDM; whose integration allows to acquire the desired locomotion also allow the integration of sensors and actuators. The operator can determine the destination of the trajectory through free navigation with the camera. The control system consists of two subsystems, the artificial vision subsystem, which determines the direction of displacement based on the identification of obstacles and the safety area of the robot, in addition to the angular compensation in case of deviation in the address of the selected destination, thus controlling the path of the robot. The second subsystem is the locomotion control that determines the orientation of the modules and the displacement of the robot.

KEYWORDS:

- **MODULAR ROBOT**
- **ARTIFICIAL VISION**
- **PATH CONTROL**
- **LOCOMOTION CONTROL**

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Introducción.

El campo de la robótica se ha sometido a cambios exponenciales en los últimos años dado el progreso evolutivo en la electrónica, logrando obtener sistemas robóticos cada vez más inteligentes. Así pues, el hombre se ha aventurado en la naturaleza misma intentando recrear las obras perennes que ésta nos presume. Desde robots insectos hasta los antropomórficos, son innovaciones constantes que se producen desde trabajos de clase hasta los más áduos trabajos de investigación.

Los dones del reino animal varían tan contrastadamente entre especies, desde una locomoción envidiable por una serpiente o el sistema de camuflaje de los cefalópodos o la capacidad visual de los camarones mantis de percibir el espectro electromagnético; son todas funciones complejas y objetivos actuales en la robótica puesto que las aplicaciones de habiliades como estas ayudarían en muchos campos.

Se toma a la locomoción como enfoque del proyecto dadas las actuales exigencias motrices en los robots en áreas como la exploración, búsqueda o rescate en situaciones de riesgo como es el caso de sismos, incendios, entornos con restricción de acceso, o incluso en entornos apacibles como los industriales, residenciales o domésticos, es decir, en todo lugar donde se requiere de un robot con locomoción adaptativa, lo cual es propio y facultativo de ofidios o serpientes comunmente conocidas.

Por ello a continuación se desarrolla el diseño y construcción de un robot modular con motricidad de serpiente que incorpora visión artificial para determinar su trayectoria de desplazamiento.

1.2 Antecedentes.

En el área de la robótica móvil se han desarrollado varios tipos de robots que incorporan o replican la locomoción de serpiente ya que son robots con un alto grado de adaptabilidad a diversos entornos, un ejemplo de ellos es “Mamba” por Liljeback, Stavdahl, Pettersen, & Gravdahl (2014), mostrado en la Figura 1. Es un robot serpiente impermeable con sensibilidad táctil donde su sistema de control determina las fuerzas externas en base a las fuerzas internas que se dan entre las conexiones de los eslabones, así su locomoción replica el movimiento ondulatorio en dos ejes debido a su modularidad y diseño bípedo.



Figura 1. Serpiente robot Mamba

Fuente: (InfoSerpientes, 2018)

La locomoción de una serpiente requiere que el diseño tenga varios grados de libertad para realizar movimientos ondulatorios progresivos, por lo que el robot “ReBiS”, Reconfigurable

Bipedal Snake por Thakker, Kamat, Bharambe, Chiddarwar, & Bhurchandi (2014). El cual es el mayor referente con su mecanismo modular biaxial, que puede tomar varias configuraciones de acuerdo a la motricidad deseada, como se ve en la Figura 2.



Figura 2. Locomoción del robot ReBIS

Fuente: (Thakker, Kamat, Bharambe, & Chiddarwar, 2014)

Otra de las necesidades es la capacidad de explorar en tiempo real como el caso de los robots UAR (Urban search and rescue), así tenemos a “HRR” por Wolf, Choset, Brown, & Casciola (2014), un robot hiper redundante, equipado con cámaras y sensor de audio, que provee al operador de imágenes y sonidos en tiempo real del entorno, además de poseer un miembro articular suspendido a su estructura, el cual le permite direccionar las cámaras por grietas y lugares no accesibles, como s muestra en la Figura 3.



Figura 3. Operación del robot USAR

Fuente: (Wolf, 2014)

Finalmente en cuestión de manufactura resaltan los robots modulares de prototipado rápido que incorporan tecnología de impresión 3D, como el “Printable flexible modular robot” por Krupke, Wasserfall, Hendrich, & Zhang (2015), cuyo diseño permite un ensamble fácil inmediatamente impreso el módulo, como se ve en la Figura 4.



Figura 4. Robot ápodo funcional impreso en 3D

Fuente: (Krupke, Wasserfall, Hendrich, & Zhang, 2015)

La funcionalidad de un robot serpiente quedó demostrada en el proyecto de titulación de Gonzáles Espín & Urrutia Goyes (2006), en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. En el mismo donde se diseñó y construyó un robot ápodo modular de tres módulos con un grado de libertad por cada uno, con locomoción tipo oruga, con un movimiento predeterminado por programación, logrando una locomoción funcional que permite el desplazamiento del robot en conjunto mediante oscilaciones sinusoidales, como se muestra en la Figura 5.

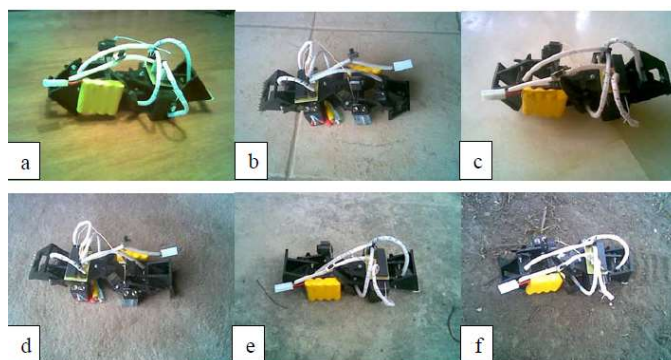


Figura 5. Locomoción en varios escenarios a) Madera, b) Baldosa, c) Mármol, d) Alfombra, e) Cemento, f) Arena, del robot ápodo por Gonzáles & Urrutia

Fuente: (Gonzáles Espín & Urrutia Goyes, 2006)

Así con los avances expuestos, los robots serpiente constituyen los mayores exponentes de la robótica móvil adaptativa y flexible.

1.3 Formulación del problema

Se requiere de un robot que incorpore la locomoción de serpiente cuya aplicación sea la exploración y monitoreo. A la vez éste debe poseer la cualidad de determinar una trayectoria segura para su desplazamiento, evitando colisiones con el medio y permitir adaptar su locomoción de acuerdo al espacio físico del entorno donde el operador establezca el destino del desplazamiento.

1.4 Objetivos del proyecto.

Objetivo General

Diseñar y construir un robot serpiente modular con control de trayectoria por visión artificial para exploración y monitoreo en un entorno controlado.

Objetivos Específicos

- Realizar un análisis de la locomoción de la serpiente, para determinar los requerimientos y limitaciones del sistema.
- Investigar y analizar el estado del arte sobre mecanismos y sistemas de control para robots que incorporen la locomoción de serpiente.

- Analizar y seleccionar componentes y materiales que cumplen con los requisitos para la finalidad del proyecto.
- En base a los requerimientos del sistema, diseñar y simular el sistema mecánico del robot al igual que su locomoción, mediante un software de diseño asistido por computador.
- Manufacturar e implementar el robot, con todos sus componentes.
- Diseñar e implementar el sistema de control, el cual incorpore un sistema de visión artificial para el control de su trayectoria y un control de locomoción de serpiente.
- Validar la hipótesis mediante el análisis de resultados de las pruebas de funcionamiento.

1.5 Justificación e importancia.

La exploración, búsqueda, monitoreo o rescate, son tareas complejas y aún más para ser ejecutadas por un robot, los cuales deben de solventar varias exigencias proporcionales a las mismas. Las diversas condiciones de los entornos son factores parametrizantes de los sistemas robóticos ya que su sistema mecánico y el de control se desarrollan en base a los mismos.

Si se trata de tareas de exploración o monitoreo se requiere de una motricidad dotada y de una locomoción adaptable en el robot. Dentro de las situaciones que requieren dichos robots se encuentran los sismos como el del 16 de Abril del 2016, el terremoto de 7.8 Mw que azotó al país, con grandes daños colaterales, donde era crucial emplear robots de búsqueda con locomoción adaptativa por en el riesgo de colapso estructural que pone en un vaivén la vida de los rescatistas.

Otro caso es la exploración riesgosa en un entorno apacible como es la de una alarma de bomba, como las 44 alertas ocurridas en las provincias de Guayaquil, Quito, Esmeraldas, Santo Domingo, durante el año 2018. (EcuadorTV, 2018).

También se los requiere en situaciones de riesgo biológico como el de erupción volcánica, apreciado en la reactivación del volcán Cotopaxi el pasado Agosto del 2015. (Jumbo, 2015).

Las aplicaciones no solo se dan en situaciones de riesgo, también en otras donde se requiera una locomoción superior, como a nivel industrial, en la medicina o incluso en la parte residencial.

Al presente el país requiere del desarrollo de investigación en esta área de la robótica, esto se lo manifiesta con los pocos trabajos desarrollados y de manera institucional se presenta solo un proyecto relacionado, bajo el título de “Diseño y construcción de un robot ápedo para tareas de exploración” por Gonzáles Espín & Urrutia Goyes (2006), en el mismo se desarrolla un robot ápedo de tipo oruga (oscilaciones verticales con un grado de libertad) de tres módulos, con una locomoción predeterminada por programación.

El presente proyecto da continuidad al desarrollo de robots de exploración articulados con locomoción de tipo serpiente con una mejora motriz mediante la incorporación de una estructura mecánica modular y multi articular. También se plantea el desarrollo de sistemas de control de locomoción en base a técnicas de control inteligente y a la vez colaborativo con visión artificial.

1.6 Hipótesis

Es posible la exploración y monitoreo en un entorno controlado mediante el control por visión artificial de la trayectoria de un robot modular con locomoción de serpiente.

1.7 Variables de la investigación.

Variables Independientes

- Estructura modular
- Sistema de visión artificial
- Sistema de control de locomoción

Variables Dependientes

- Locomoción adaptable al entorno
- Exploración mediante el robot serpiente en un entorno controlado

1.8 Alcances

Con el presente trabajo se proyecta el aporte al campo de la robótica móvil con:

- Un sistema de control de locomoción en base a técnicas de control inteligente para robots modulares con prevención de colisiones.
- Sistema de navegación e identificación de trayectoria en base a técnicas convencionales de visión artificial.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Locomoción de la serpiente

2.1.1 La serpiente

La serpiente, perteneciente a la familia de los reptiles, de la clase Ophidia, término por el cual se les llama ofidios los cuales se caracterizan por carecer de miembros. Sin embargo, algunas especies como la pitón mantienen pequeñas patas vestigiales, por lo que se cuestiona el porqué perdieron sus miembros. Esta pregunta trivial puede ser respondida bajo diferentes criterios evolutivos por herpetólogos (especialistas en reptiles y anfibios).

A costa de sus miembros las serpientes obtuvieron una locomoción privilegiada, con una capacidad adaptativa dada una basta gamma de entornos, razón por la cual es de gran ambición el emplear esta locomoción para diversas aplicaciones en la robótica móvil.

Existen varios tipos de serpientes y por ende varios tipos de locomoción, los cuales dependen de la anatomía del ofidio y de su hábitat.

2.1.2 Anatomía de la serpiente

- *Sistema muscular especializado:* Sus músculos son muy flexibles y fuertes, los cuales efectúan la locomoción en sí. Además, en especies como boas y pitones proporcionan una fuerza de estrangulamiento capaz de matar a sus víctimas.

- *Esqueleto flexible:* Posee una elevada cantidad de vértebras siendo esta una de las características principales para la locomoción. La cantidad de vértebras se incrementa de acuerdo al tamaño de la serpiente, teniendo una vívora un promedio de 100 vértebras y una anaconda más de 400.
- *Piel:* La piel de las serpientes es muy peculiar, ya que ésta le permite obtener la fricción necesaria para su desplazamiento gracias a las escamas que la componen. Poseen escamas ventrales, las cuales se fijan al suelo en contra de la dirección de desplazamiento permitiéndoles obtener la propulsión y restricción necesarias para su locomoción. La piel es el factor clave en la locomoción puesto que si presenta fallas el reptil tiende a patinar sin opción de controlar su desplazamiento. Cabe resaltar que su piel es muy elástica tanto como su esqueleto y sufre de mudas de piel cada cierto tiempo precisamente para recomponer los daños que ha sufrido por el desgaste.
- *Órganos:* Como todo ser vivo se compone de órganos funcionales indispensables para su vida, como el corazón , un par de pulmones, estómago extendido, un sistema digestivo que se atrofia despues de cada procesamiento de alimentos razón por la cual las serpientes no tienen la necesidad de comer tan frecuente como un mamífero.
- *Sistema sensorial:* Su sistema sensorial se basa en la sinergia de sentidos, de los que integra su lengua que le permite captar las partículas de los olores que se encuentran en el ambiente y dirigir las a su olfato denominado órgano de Jacobson. Sus oídos son poco sensibles dada la estructura auditiva. Adicionalmente algunas especies determinan la temperatura de superficies.

El sentido de la vista es muy rústico ya que al reptar pierden alcance de visión y por ello no han desarrollado este sentido.

El sentido del tacto de una serpiente es imprescindible, ya que poseen múltiples receptores táctiles, los cuales “les permiten detectar mínimos cambios del suelo y del entorno, además de la capacidad de ejecutar cambios rápidos en el movimiento muscular durante su locomoción.” (Infoserpientes, 2019). En otras palabras, las serpientes adaptan su locomoción a través del tacto con el entorno e incluso sin el contacto con las superficies, tal es el caso de las serpientes marinas con su sentido de tacto a distancia provisto por unas escamas especiales en los laterales de su cabeza llamadas sensilas que según la dr. Jenna Crowe-Riddell, investigadora en la Universidad de Adelaida, es un “sentido táctil hidrodinámico que las hace capaces de sentir las vibraciones en todas direcciones”.

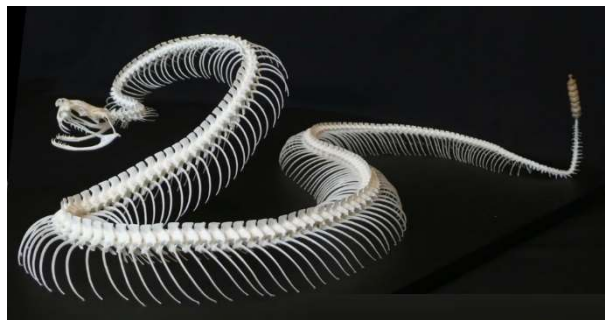


Figura 6. Estructura anatómica de la serpiente

Fuente: (Ramos, 2015)

2.1.3 Tipos de locomoción

La locomoción de la serpiente depende de su especie, habiendo más de 3000 especies reconocidas como se ilustran las más conocidas en la Figura 7. Escencialmente se clasifican en: Boas, Pitones, Víboras y Culebras.



Figura 7. Tipos de serpientes

Fuente: (Ramos, 2015)

Dependiendo de las especies se tiene los siguientes tipos de locomoción y características de acuerdo a su aplicación dado el hábitat, como se muestra en la Figura 8:

1) Locomoción en golpe lateral:

- La que poseen las víboras de desierto, las más veloces del mundo con 28 Km/h.
- Aprovechable en terrenos amplios, sin embargo la superficie siempre es arenosa por lo cual los golpes se amortiguan.

2) Locomoción serpentina:

- Movimiento seguidor de la oscilación de la cabeza de la serpiente, razón por la cual en la robótica se denomina locomoción de seguimiento de eslabón guía.

- Brinda una mayor libertad de desplazamiento y en mayor cantidad de terrenos.
- Su desarrollo es secuencial y sincronizado.
- Esta locomoción posee la mamba.

3) Locomoción en acordeón:

- Este tipo de locomoción es propia de serpientes grandes como anacondas y pitones, ya que su gran peso y tamaño impide que se muevan de otra forma.
- Su ejecución demanda de un gran consumo energético dada la fuerza requerida.
- Serpientes como la mamba también adoptan esta locomoción para posicionar su cuerpo y en condición de ataque para impulsarse.

4) Locomoción rectilínea:

- Propia de serpientes pequeñas.
- Es muy limitante ya que se aplica esencialmente en terrenos planos.

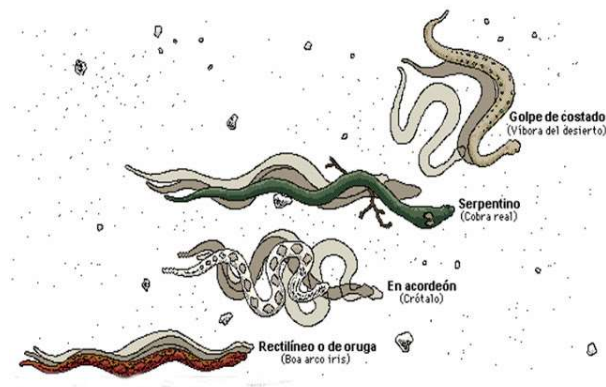


Figura 8. Tipos de locomoción de las serpientes

Fuente: (Pérez, 2012)

De lo anterior se decide emplear la locomoción serpentina para el robot ya que el cuerpo sigue el desplazamiento realizado por la cabeza, la misma que establece la dirección del destino.

2.1.4 Limitaciones de la locomoción de serpiente

a. Grado de locomoción en desplazamiento

Mientras mayor es su tamaño más restringida es su locomoción. Esta es una regla imperativa en las serpientes, lo cual se aprecia por ejemplo con las víboras y culebras, las cuales poseen una mayor libertad de movimiento y por ende velocidad, mientras que las boas y pitones menor libertad y son más lentas. De hecho, las anacondas mayores, las cuales pertenecen a la familia de las boas, mueren exhaustas siendo incapaces de desplazar su pesado cuerpo. Esto se produce cuando alcanzan un peso de 230 kg con una longitud mayor a los 8 m. (De la Rosa , 2018).

Para establecer la capacidad de locomoción de la serpiente dada su estructura anatómica, se analiza a los mayores exponentes de cada especie. Se determinan el grado de locomoción tomando como indicador a su velocidad de desplazamiento máxima y la relación entre peso – longitud, como se muestra en la Tabla 1. Adicionalmente se establece el grado de locomoción ideal, es decir, del 100% al de la víbora del desierto, ya que es la más velóz.

Tabla 1
Grado de locomoción de las serpientes

| Serpiente | Peso (Kg) | Longitud (m) | Longitud/peso | Velocidad (Km/h) | Grado locomoción (%) |
|-------------|------------------------------|--------------|---------------|------------------|----------------------|
| Mamba Negra | 1.6 InfoSerpientes (2018) | 4.00 | 2.50 | 20 | 236.22 |
| Anaconda | 230 | 8.45 | 0.04 | 8 | 3.47 |

CONTINÚA 

| | reference.org (2019) | | | | |
|---------------------|---------------------------|------|------|-----|------|
| Pitón reticulada | 158 | 7.67 | 0.05 | 1.6 | 4.59 |
| | Sandiegozoo (2019) | | | | |
| Víbora del desierto | 1.2 | 1.27 | 1.06 | 28 | 100 |
| | smithsonianchannel (2019) | | | | |

De la Figura 9, se deduce que la relación entre Longitud/peso es proporcional al grado de libre locomoción, dato que será esencial para determinar la capacidad física real del robot. También se aprecia que la serpiente con un mayor grado de locomoción es la mamba negra pese a ser más lenta que la víbora del desierto, debido a su relación de longitud / peso.

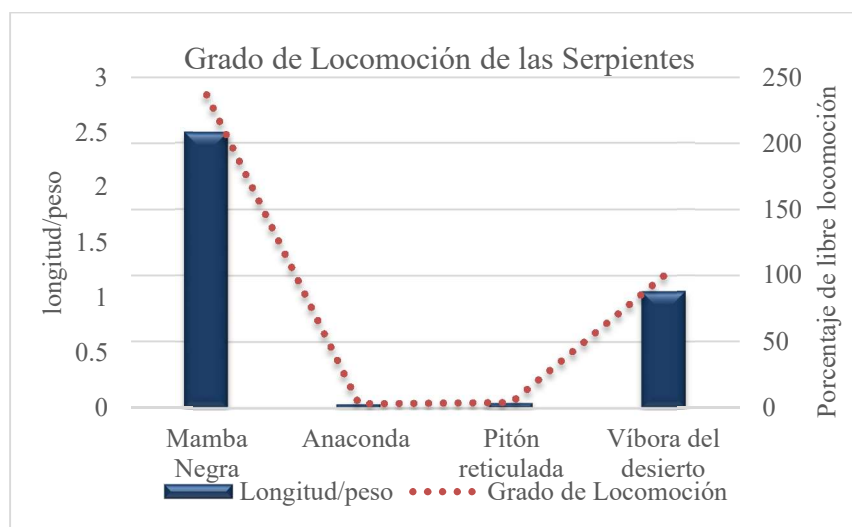


Figura 9. Curva de relación entre el peso-longitud con la locomoción de las serpientes

b. Locomoción horizontal en desplazamiento

Este es el movimiento más importante que permite el desplazamiento mediante el reposicionamiento del cuerpo efectuando oscilaciones paralelas a la superficie de desplazamiento.

Dicho movimiento se puede observar en el desplazamiento de cualquier serpiente como la víbora de maíz en la Figura 10, donde se aprecia que la locomoción horizontal se adapta de acuerdo a las condiciones de espacio del entorno, es decir, que se puede impulsar el cuerpo mediante el contacto.



Figura 10. Movimiento horizontal de la víbora de maíz

Fuente: (Lab, 2015)

c. Locomoción vertical en desplazamiento

Es la capacidad de elevar las secciones de su cuerpo que se repositionan para poder desplazarse, es decir, la capacidad de levantar partes su cuerpo de manera perpendicular al plano de apoyo durante la acción de desplazamiento. Para analizar esta locomoción se cita el estudio de la locomoción de la víbora cornuda por Smithsonian (2019), donde se identifica la elevación vertical aplicada en la cabeza y el cuello de la serpiente para poder reacomodar su dirección.

En la Figura 11 se observa la secuencia de movimientos de la locomoción de la víbora cornuda. En las secciones a) y b) de la imagen, la serpiente toma el impulso para elevar el cuerpo. En la sección c) se produce una elevación perpendicular al plano comprendida entre 2 a 5 cm. En la sección d) se produce la rotación en la dirección de desplazamiento. Smithsonian (2019), destaca

que la elevación permite el reposicionamiento del cuerpo para la locomoción y el desplazamiento, por lo tanto se considera un requerimiento del sistema.

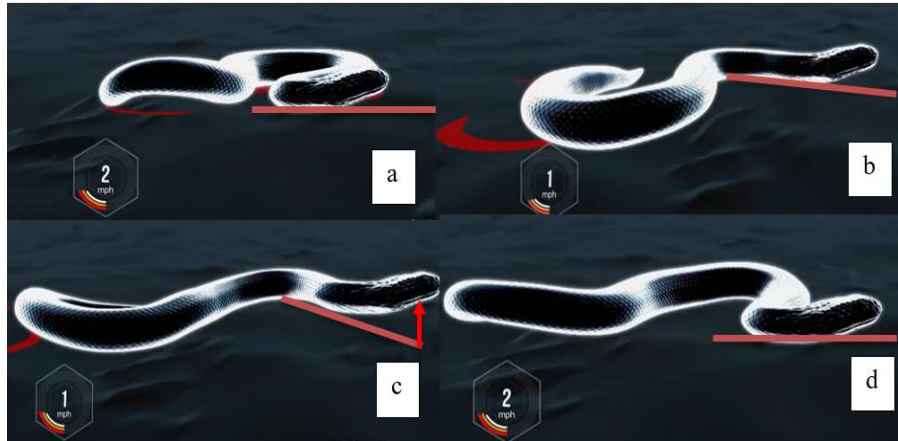


Figura 11. Análisis del movimiento vertical durante el desplazamiento

Fuente: (smithsonianchannel, 2019)

d. Factor de Fricción

La fricción es fundamental para el desplazamiento de toda serpiente ya que en caso de que ésta sea muy baja la serpiente patina sin control. Para la producción de fricción es imprescindible la acción de las escamas ventrales, las cuales se encuentran en contacto con la superficie de desplazamiento y dispuestas en contra de la dirección de avance para adquirir sujeción necesario con la superficie y restringir el desplazamiento en direcciones no deseadas, permitiéndole el control de su locomoción.

En la Figura 12, se observa la distribución de las escamas en la piel de una serpiente coral, las cuales son pequeñas y dispuestas una sobre otra en dirección contrario al desplazamiento.



Figura 12. Dirección de las escamas de una serpiente coral

Fuente: (Wei, 2014)

e. Factor de distribución de peso

La distribución del peso es otro punto clave en el desplazamiento de la serpiente puesto que no todo su cuerpo está en contacto con la superficie durante la operación de desplazamiento. El ofidio distribuye su peso mediante puntos dinámicos de apoyo donde actúan las escamas ventrales para originar la propulsión y restricción necesaria para el desplazamiento.

La acción de contorsión del cuerpo de la serpiente provee un reajuste de la posición de las escamas en los puntos de apoyo originando anisotropía friccional, término que se refiere a la resistencia al deslizamiento en determinadas direcciones.



Figura 13. Análisis de la fricción en puntos dinámicos de apoyo

Fuente: (Wei, 2014)

En la Figura 13, se pueden observar los puntos de apoyo en los cuales actúan las escamas para la fricción necesaria en su desplazamiento. Es importante establecer cuántos puntos de apoyo requiere una serpiente para lograr distribuir su peso y dado que su comportamiento varía de acuerdo al tiempo y a la acción de fuerzas de acuerdo a su masa, es necesario emplear un análisis dinámico. El análisis dinámico de un cuerpo tan complejo como el de una serpiente requiere de mucho ingenio debido a la dificultad de modelar matemáticamente el sistema y en caso de deducirlo existirían muchas variaciones respecto a la planta real. Por lo que se opta por el análisis expuesto en la investigación experimental “La mecánica de la locomoción deslizante” por David L. Hu (2009), investigación en la cual se analizó la distribución dinámica del peso corporal del reptil, de tal forma como se muestra en la Figura 14. En estos resultados, sección b), se evidencia que en la locomoción, una serpiente genera al menos tres puntos de apoyo, los mismos que se trasladan a lo largo de su cuerpo, cuyas posiciones varían entre la región inicial, media y final de su cuerpo. Además no todo su cuerpo permanece en contacto con el suelo, lo que indica que a la vez los puntos de apoyo son centros de acumulación de carga o peso corporal.

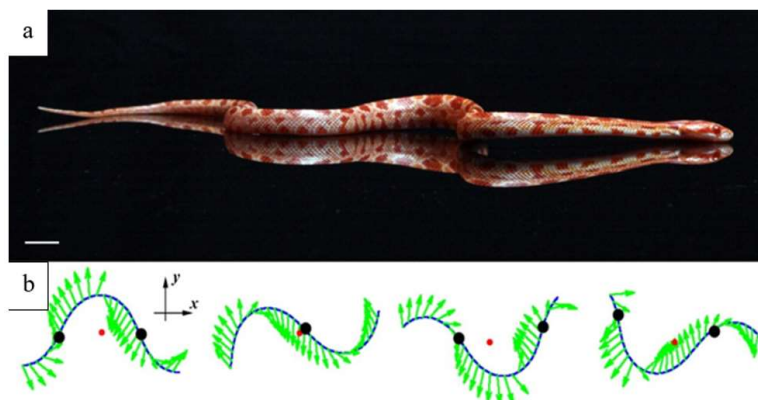


Figura 14. Distribución dinámica del peso corporal de la serpiente, donde a) Captura de la locomoción de la serpiente, b) Puntos de distribución de peso y fuerzas propulsoras

Fuente: (David L. Hu, 2009)

Otro factor en consideración es que su centro de masa (puntero rojo), que permanece siempre en la parte media del cuerpo, procurando guardar una relación rectilínea con los puntos de carga.

2.1.5 Principios Fundamentales de la Locomoción de serpiente

En base al análisis realizado, se establece los principios fundamentales locomoción de una serpiente:

- a) El grado de locomoción de una serpiente depende de la relación entre su peso y su tamaño.
- b) Su estructura ósea con múltiples vértebras les permiten adquirir destreza motriz.
- c) Adaptan su locomoción en base al sentido del tacto con el entorno.
- d) En la parte ventral se produce la fricción necesaria para su desplazamiento, además de la propulsión y restricción necesaria para efectuar el desplazamiento.
- e) Existe concentración de la carga del peso corporal en tres puntos de su cuerpo, al inicio, mitad y final.
- f) Durante el desplazamiento reposicionan su cuerpo mediante una elevación entre 2 y 5 cm de los segmentos de su cuerpo en cuestión.

2.2 Estado del arte

2.2.1 Robots modulares

Los robots pueden estructurarse en varios tipos de configuraciones dependiendo de su propósito y de su creador. En la robótica modular se estudian los robots de configuración modular, término

que se refiere a un robot cuyo cuerpo se compone de uno o más módulos, siendo estos los que le otorgan su funcionalidad. Los robots modulares fueron concebidos bajo el propósito de la locomoción y la manipulación, una variante a la estructura predefinida de los robots clásicos, donde la incapacidad de su modificación física los limitaba para adaptarse y cumplir nuevas funciones.

La versatilidad es la principal ventaja del robot modular ya que pueden incorporar nuevas funcionalidades tal es el caso de añadir sensores o actuadores.

2.2.2 Robots serpiente

Se denominan así a los robots que imitan o emplean la locomoción de una serpiente para efectuar diversas actividades. Su estructura puede ser de tipo continua o modular, en partes semejantes debido a la naturaleza de la serpiente. Su estructura se dispone en serie y puede ser de tipo suave o rígida, contando con la capacidad de moverse en el espacio, es decir con tres grados de libertad, ya sea por módulo o por la asociación de dos o más.

2.2.3 Clasificación de Robots serpiente

- Robot serpiente ápodo

Los robots serpiente ápodos son aquellos que no poseen elementos de propulsión externos a su cuerpo, es decir, emplean únicamente su cuerpo para desplazarse, como ejemplo se expone a “Hyper Cube”, una reconfiguración del robot “Cube Revolutions” por el Phd. Juan González Gómez (2008). Dicho robot cuenta con una estructura modular biaxial, con capacidad para desplazarse en un plano gracias a que los módulos pueden ser reposicionados para darle motricidad en dos ejes perpendiculares, como se muestra en la Figura 15.

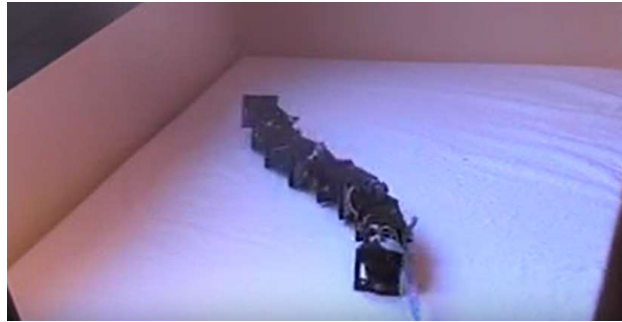


Figura 15. Robot ápodo Cube Revolutions

Fuente: (González, 2008)

- Robot serpiente propulsado

Son robots serpiente que emplean un mecanismo externo para su propulsión y restricción de movimiento, además se resalta que poseen un mejor control de desplazamiento y locomoción, lo cual es corroborado por Tanaka, Kon, & Kazuo (2015), en su exposición InfoSerpientes, donde explican sobre la necesidad de incorporar “ruedas pasivas que causan una fuerza de restricción lateral y permiten desplazamientos controlados”. Un fuerte exponente de robots serpiente con propulsión es “Mamba” por Liljeback, Pettersen, & Gravdahl (2014), el cual plantea la incorporación de varios tipos de sistemas de propulsión, como se muestra en la Figura 16.

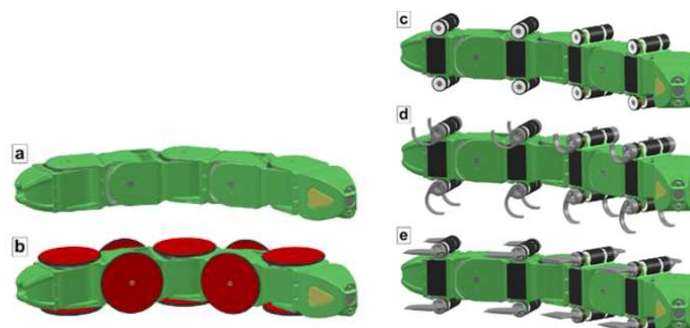


Figura 16. Sistema de propulsión de Mamba, a) sin propulsión, b) por ruedas pasivas, c) por ruedas activas, d) por patas rotativas e) por aletas para operar en agua

Fuente: (Tanaka, Kon, & Kazuo, 2015)

Otro ejemplo de robots serpiente con propulsión por ruedas es el robot “Kairo II”, Figura 17, que posee dos tipos de módulos, uno con llantas que le permite reducir el factor de fricción y otro con motricidad biaxial con el cual cambia de trayectoria.

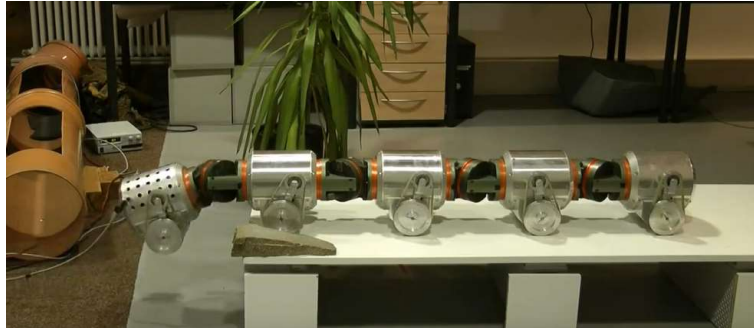


Figura 17. Kairo II - Sistema de propulsión por ruedas

Fuente: (FZICHanel, 2015)

2.2.4 Sistemas de control para robots serpiente

Existen varias técnicas de control desarrolladas recientemente para los robots serpiente, todas ellas son modelos experimentales, ya que esta rama de la robótica móvil continúa en desarrollo por la complejidad de la naturaleza de la locomoción de las serpientes. A continuación se menciona varias propuestas de control:

- Inhibición Lateral por Hirose, Cave, & Goulden (1993), en la cual se adapta la posición de la estructura al contacto con los obstáculos.
- Inhibición lateral inversa extendida durante el contacto por Kamegawa, Kuroki, Travers, & Choset (2012). En la cual se oscila de forma inversa al contacto para poder desplazar el cuerpo.

- Control por derivada de la curva por Date & Takita (2007), donde se determina la dirección tangente de la curva en la que se desea desplazar el robot.
- Modelo híbrido de dinámica del robot y fuerza de contacto por Transeth, Leine, Glocker, Pet, & Liljebäck (2008).
- Curvas sinusoidales por González (2008), donde se aplican oscilaciones continuas al cuerpo del robot para generar desplazamientos en un plano.
- Restricciones de conmutación por Tanaka & Matsuno (2014), en la cual la oscilación y desplazamiento de un robot serpiente de tipo propulsado, se modifica en base a detección de obstáculos laterales por sensores de rango.
- Adaptación de patrones por lógica difusa, por Hasanzadeh & Akbarzadeh (2008), en la cual se realiza un ajuste de la estructura dado un generador central de patrones en base a lógica difusa.

Los métodos mencionados son aportaciones muy importantes ya que tienen diferentes principios de control y aplicaciones. Además las técnicas mencionadas se orientan al control de la locomoción horizontal. Es imperativo analizar la metodología de control bajo la formulación de las variables y características del sistema a controlar, razón por la cual se retoma este inciso en el Capítulo IV de diseño del sistema de control.

2.3 Requerimientos y limitaciones del sistema.

Del análisis de la locomoción de serpiente, se establecen los siguientes requisitos para que el sistema robótico tenga éxito en su función:

2.3.1 Requisitos del sistema mecánico.

- a) El sistema mecánico tiene que ser capaz de aceptar la integración de diferentes componentes de acción independiente, razón por la cual el sistema ha de basarse en arquitectura modular.
- b) Dado el análisis de locomoción se tiene dos cualidades independientes y fundamentales para la locomoción de la serpiente:
 - Motricidad en tres ejes perpendiculares entre sí
 - Distribución de su peso y propulsión
- c) Los módulos han de procurar el menor peso y ser compactos, con el fin de disminuir la carga y la inercia para que los actuadores puedan funcionar correctamente.
- d) La estructura del cuerpo total tiene que ser lineal y simétrica con el fin de tener un único eje de acción sin que genere momentos ni cargas indeseadas.

2.3.2 Grados de libertad

La motricidad de una serpiente es de tipo articular - rotativa alrededor de tres ejes ortogonales, por cada región de su cuerpo entre los puntos de apoyo o de distribución de peso, por lo que se han de emplear tres grados de libertad para la locomoción articular.

En base al análisis de la distribución de peso y del factor de la propulsión, se opta por emplear ruedas activas, es decir, un actuador rotacional cuyo efecto es el desplazamiento del robot, considerando con ello un grado de libertad más por cada módulo de distribución de peso. Se resalta que los grados de libertad que posea el robot se incrementarán acorde a la cantidad de actuadores de los módulos incorporados.

2.3.3 Locomoción del sistema

El robot empleará la locomoción de serpiente en la cual la relación longitud – peso ha de limitar el grado de locomoción. Se resalta que pese a no conocer dichos parámetros, se debe orientar la locomoción en base al estudio de las limitaciones de la locomoción de serpiente y acorde a los objetivos del proyecto, estableciendo así las siguientes características para la locomoción del robot:

- Se empleará la locomoción serpentina, debido a que su cuerpo se desplaza paulatinamente a la posición de su cabeza evitando colisiones involuntarias.
- Ya que la propulsión es uno de los factores que determinan el control de la locomoción y con ello la funcionalidad del robot, se selecciona al robot serpiente de propulsión por ruedas activas.
- La locomoción se llevará a cabo en un entorno controlando variables como superficie, disposición de luz y de obstáculos.
- La locomoción horizontal se basará en el seguimiento de un módulo guía, a la vez que el módulo guía se direcciona de acuerdo al destino establecido por el control de visión artificial.
- La locomoción vertical debe ser capaz de elevar al menos 2 cm al módulo en cuestión para efectuar la locomoción horizontal, evitando con ello posibles rozamientos o colisiones inesperadas.
- La locomoción torsional ha de precautelar la estabilidad del robot durante la locomoción.
- Se requiere que el robot evite las colisiones durante el desplazamiento, adaptando su locomoción de acuerdo al entorno.

2.3.4 Número de módulos

Dado el segundo principio fundamental de locomoción de serpiente, para el sistema robótico se necesitan tres puntos para la distribución de la carga corporal, es decir, tres módulos de desplazamiento. A la vez, los módulos de desplazamiento deben estar interconectados mediante una motricidad libre, es decir, se requiere de dos módulos articulares.

2.3.5 Parámetros de control del sistema

- Locomoción basada en seguimiento de eslabón guía
- Locomoción con prevención de colisiones por proximidad
- Identificación de obstáculos por visión artificial
- Determinación de ruta despejada de desplazamiento

2.3.6 Requisitos Sensoriales

De acuerdo al análisis del sistema sensorial de la anatomía de la serpiente, se establecen los siguientes requerimientos sensoriales para el robot:

- Sensor de imagen: que permita la navegación y el monitoreo del entorno, además de la información para el sistema de visión artificial. Para el efecto se dispondrá de un sensor de imagen sobre la cabeza del robot.
- Sensores de distancia: los cuales efectúen la función del sentido del tacto de una serpiente el cual es indispensable para adaptar la locomoción de acuerdo al entorno. Se dispondrán dos sensores laterales para cada módulo de apoyo.

- Sensor de desplazamiento: con los cuales se mida el desplazamiento el robot, dispuestos uno por cada motor.

2.3.7 Comunicación del sistema

El sistema tiene que ser capaz de comunicar información tanto del estado y comandos acción de los actuadores de cada módulo y de los sensores que incorporan. Además se busca la mayor velocidad de comunicación, para optimizar la respuesta del sistema.

2.4 Selección de componentes

Es imprescindible para el diseño mecánico del presente robot se tenga que emplear la metodología de ingeniería inversa, es decir, retroceder desde los resultados finales esperados, para poder cumplir los objetivos. En esta cuestión se resalta la necesidad de conocer los componentes del sistema a emplear, para poder hacer una estructura en la cual se puedan desempeñar de la forma correcta.

Para seleccionar de manera objetiva los componentes se emplea una ponderación de acuerdo a las características técnicas de cada elemento, disponibles en los anexos D. La valoración va de acuerdo a una comparación entre las mismas cualidades de los componentes y en base a lo que se busca dados los criterios de selección correspondientes. Se califica con: 1 a bajo, 2 a medio y 3 a bueno, el elemento seleccionado será el que tenga la mayor valoración.

2.4.1 Sensores

Los sensores que el sistema incorporará son:

- Cámara digital, como sensor para el sistema de visión artificial.
- Encoder, como sensor de control de desplazamiento
- Sensor de distancia, para detectar obstáculos.

a. Sensor de imagen

En base a la selección del tipo de cámara (Anexo D-1), se seleccionará una cámara web bajo los criterios de selección de la Tabla 2.

Tabla 2.
Criterios selección para el sensor imagen

| Criterio | Descripción |
|------------------------------|---|
| Calidad de imagen | La calidad de imagen no debe ser muy elevada, debido a los costos computacionales de procesamiento. También debe ser lo suficientemente buena para no recibir información poco legible. En base a las recomendaciones de procesamiento por Maza (2017), la calidad de imagen se ha delimitado entre 320 y 720 pixeles |
| Protocolo de comunicación | Disponibilidad de la protocolo USB tipo A para compatibilidad con características de ordenador del proyecto. |
| Driver de PC | Debe ser genérico y compatible con Windows 64bits. |
| Tamaño-Peso | Deben de ser los menores posibles para disminuir la carga y esfuerzos por inercia. |
| Velocidad de transmisión | Se aceptan unos 24 frames por segundo, como velocidad mínima y óptima de transmisión |
| Disponibilidad en el mercado | Tiene que encontrarse fácilmente para una intercambiabilidad inmediata en caso de averías. |

De acuerdo a las características técnicas de los elementos (Anexo D-1) y dada la mayor puntuación en la Tabla 3, se selecciona a PC-Cámara como sensor para el sistema de visión artificial.

Tabla 3.
Selección de cámara

| Criterio de Selección | PC-Camera | | Klip Xtreme 101 | | E-Cam 8000 | |
|---------------------------|-------------|------------|-----------------|------------|-------------|------------|
| | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación |
| Calidad de imagen | 640x480 mpx | 2 | 720x540 mpx | 3 | 640x480 mpx | 2 |
| Protocolo de comunicación | USB 2.0 A | 3 | USB 2.0 C | 1 | USB 3.0 C | 1 |
| Driver de PC | Generic | 3 | XC101 | 1 | At-205 | 2 |
| Tamaño | 4x5 cm | 3 | 6x8cm | 2 | 7x4cm | 1 |
| Peso | 50g | 3 | 80g | 2 | 95g | 1 |
| Velocidad | 24 fps | 3 | 24 fps | 3 | 24 fps | 3 |
| Disponible | Local | 3 | Local | 3 | Pedido | 1 |
| Total | | 20 | | 15 | | 11 |

b. Sensor de distancia

En base a la selección del tipo de sensor de distancia (Anexo D-2.1), se seleccionará un sensor de tipo infrarrojo Sharp bajo los criterios de selección de la Tabla 4.

Tabla 4.
Criterios de selección para sensor de distancia

| Criterios | Descripción |
|-----------------------|--|
| Rangos de medición | Ya que se busca detectar objetos muy próximos al robot se establece un rango de medición entre 2 y 30 cm |
| Precisión de medición | Se establecerá un ángulo efectivo de medición menor a 5 grados |

CONTINÚA 

| | |
|------------------------------|--|
| Tipo de señal entregada | Se prefiere una señal analógica para poder escalar y tener menor error de lectura |
| Consumo de corriente | El de menor consumo en corriente. |
| Tamaño - peso | Deben de ser los menores posibles para disminuir la carga y esfuerzos por inercia. |
| Disponibilidad en el mercado | Tiene que encontrarse fácilmente para una intercambiabilidad inmediata en caso de averías. |

De acuerdo a las características técnicas de los elementos (Anexo D-2.2) y dada la mayor puntuación en la Tabla 5, se selecciona al sensor Sharp GP2Y0A41SK-F como sensor de distancia

Tabla 5.
Selección de sensor de distancia

| Criterio de Selección | GP2Y0A21 | | GP2Y0A41SK | | GP2Y0A710 | |
|-------------------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación |
| Rangos de medición | 10-80 cm | 2 | 4-30 cm | 3 | 100-550 cm | 1 |
| Precisión de medición | 0.1 cm | 3 | 0.1cm | 3 | 0.1cm | 3 |
| Tipo de señal entregada | Análoga | 3 | Análoga | 3 | Análoga | 3 |
| Corriente | 40 mA | 2 | 22 mA | 3 | 50Ma | 1 |
| Tamaño | 37x13mm | 3 | 37x13mm | 3 | 58x17.6mm | 1 |
| Peso | 45 gr | 2 | 30 gr | 3 | 65 gr | 1 |
| Disponibilidad | Local | 3 | Local | 3 | Local | 3 |
| Total | | 18 | | 21 | | 13 |

c. Sensor encoder

Para determinar la rotación de las ruedas, se va a emplear un sensor encoder óptico, dada la selección del tipo de encoder (Anexo D-3.1), se establece los criterios de selección en la Tabla 6.

Tabla 6.
Criterios de selección para sensor encoder

| Criterio | Descripción |
|------------------------------|--|
| Resolución de medición | La más baja en base a los pulsos por revolución |
| Número de fases | Que sea de dos fases para determinar el sentido de giro de la rueda |
| Consumo de corriente | El de menor consumo de corriente. |
| Tipo de acople | Se requiere que tenga un fácil acople al rotor y de forma externa. |
| Peso-Tamaño | El menor posible |
| Disponibilidad en el mercado | Tiene que encontrarse fácilmente para una intercambiabilidad inmediata en caso de averías. |

De acuerdo a las características técnicas de los elementos (Anexo D-3.2) y dada la mayor puntuación en la Tabla 7, se selecciona al encóder Chihai Motor Encoder CHR-GM25.

Tabla 7.
Selección de encoder

| Criterio Selección | de | Chihai Motor Encoder CHR-GM25 | | Pololu magnetic Encoder 12CPR | | Encoder Lm393 IR | |
|---------------------------|-----------|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|-------------------------|------------|
| | | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación |
| Resolución | | 11ppr | 2 | 128ppr | 3 | 8ppr | 1 |
| Número de fases | | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| Corriente | | 15 mA | 2 | 30 mA | 3 | 15mA | 2 |

CONTINÚA 

| | | | | | | |
|----------------|---------|----|-------------------|----|-------------------|----|
| Acople | Presión | 3 | Presión | 3 | Tornillo | 2 |
| Tamaño | 1.7 cm | 3 | 2.9x4.8 x3.5cm | 1 | 3.2x1.4 x0.7cm | 2 |
| Peso | 8 g | 3 | 68 g 1.7x1.7cm | 1 | 8 g 3.2x1.4cm | 3 |
| Disponibilidad | Local | 3 | Local | 3 | Pedido | 1 |
| Total | | 19 | | 17 | | 12 |

2.4.2 Actuadores

Dada la descripción de la locomoción del sistema, se requiere emplear dos tipos actuadores rotacionales, uno que controle la posición angular de las articulaciones y otro de rotación continua para el desplazamiento, para efecto se emplea:

- Servomotores, en los módulos biaxiales
- Motor dc, en los módulos de apoyo

a. Servomotor

La selección de los servomotores se basará principalmente en la potencia mecánica y sus propiedades físicas, ya que se debe seleccionar la mayor potencia en relación con el menor tamaño posible. Adicionalmente se tiene los criterios de selección mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8.
Criterios de selección para servomotores

| Criterio | Descripción |
|-----------------|---|
| Par mecánico | Ya que no se conoce la carga real a la que estará sometido los servomotores, se emplea un criterio orientado a aplicaciones de la robótica bajo condiciones de carga por Pompa, P. (2019), el cual recomienda un torque entre 9 y 24 kg. Por lo |

CONTINÚA 

| | |
|-------------------------------|--|
| | tanto se establece como par mínimo al valor medio comercial de 15 kgf. |
| Rango de rotación | Ya que el robot emplea articulaciones de acuerdo a la anatomía de serpiente, se requiere de un rango entre 0° y 180° |
| Modulación | De tipo PWM, para control digital desde un microcontrolador. |
| Consumo de corriente | Debe requerir la menor corriente de arranque. |
| Material de la caja reductora | Se requiere que sea metálica ya que de ser de plástico, las cargas fluctuantes podrían romper los engranes. |
| Peso | El menor posible |
| Disponibilidad en el mercado | Tiene que encontrarse fácilmente para una intercambiabilidad inmediata en caso de averías. |
| Costo | Contraste respecto a homónimos |

De acuerdo a las características técnicas de los elementos (Anexo D-4) y dada la mayor puntuación en la Tabla 9, se selecciona al servomotor Tower pro MG-996R.

Tabla 9.
Selección de servomotor

| Criterio de Selección | TowerPro MG-996R | | HS-7940TH Servo | | Futaba BLS371SV | |
|-----------------------|------------------|-----------|-----------------|---------|-----------------|-----------|
| | Puntuación | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación | Valor |
| Par mecánico | 1 | 15.1kg.cm | 3 | 17kg.cm | 2 | 15.8kg.cm |
| Rango de rotación | 3 | 0-180° | 3 | 0-180° | 3 | 0-180° |
| Modulación | 3 | PWM | 3 | PWM | 3 | PWM |
| Material de caja | 3 | Metal | 3 | Metal | 3 | Plástico |
| Corriente Arranque | 3 | 2.5A | 1 | 4.8A | 2 | 3.6A |
| Peso | 3 | 55g | 1 | 68g | 2 | 63g |

CONTINÚA 

| | | | | | | |
|----------------|----|-------|----|-------|----|--------|
| Disponibilidad | 3 | Local | 3 | Local | 1 | Pedido |
| Costos | 3 | \$15 | 1 | \$45 | 2 | \$32 |
| Total | 22 | | 18 | | 18 | |

b. Línea de motor D.C.

Se establece una selección de la línea de los motores de dc más no el modelo del motor ya que para ello se debe establecer la potencia mecánica necesaria para poder desplazar a toda la estructura, para lo cual se ha de realizar un análisis dinámico con el fin de establecer la carga real una vez diseñada la estructura y establecido las cargas parciales, lo que se realiza en el Capítulo III.

Se aclara que la línea del motor debe mantener las mismas condiciones geométricas para todos los modelos de motor, puesto que el diseño de la estructura se realizará en base a las medidas geométricas de la misma y con ello se evitará conflictos en la etapa de implementación. En tal virtud se establecen los criterios de selección en la Tabla 10.

Tabla 10.

Criterios de selección para línea de motor D.C.

| Criterio | Descripción |
|------------------------------|---|
| Variedad en par mecánico | Ya que la carga se basa en la capacidad del servomotor, la cual es de 15 kgf.cm (sin carga), la línea ha de disponer de un rango cercano. |
| Potencia eléctrica | Ya que no se conoce el modelo específico, se ha de evaluar la potencia de consumo mínima de la línea |
| Material de la caja reductor | Se requiere que sea metálica ya que de ser de plástico, las cargas fluctuantes podrían romper los engranes. |
| Tamaño-peso | De menor valor possible. |

CONTINÚA 

| | |
|------------------------------|--|
| Disponibilidad en el Mercado | Tiene que encontrarse fácilmente para una intercambiabilidad inmediata en caso de averías. |
| Costo | Contraste respecto a homónimos |

De acuerdo a las características técnicas de los elementos (Anexo D-5) y dada la mayor puntuación en la Tabla 11, se selecciona la línea de motores Chihai CHR-GM25-370

Durante el Capítulo III, Diseño y Construcción del Sistema Mecánico, se analizará el par necesario para el motor de esta línea.

Tabla 11.

Selección de línea de motor

| Criterio de Selección | Chihai CHR-GM25-370 | | CNMAWAY GB37HR | | DME 44-50G | |
|--------------------------|---------------------|------------|----------------|------------|--------------|------------|
| | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación |
| Variedad en Par mecánico | 0.3-10 kg.cm | 3 | 0.1-10 kg.cm | 3 | 1.8-10 kg.cm | 3 |
| Tamaño | 6.5x1.7cm | 3 | 6.4x3.7 cm | 2 | 8.7x4.4 Cm | 1 |
| Peso | 70 g | 2 | 90 g | 1 | 50 g | 3 |
| Material | Metal | 3 | Metal | 3 | Metal | 3 |
| Potencia eléctrica mín | 4.8w | 2 | 1.2w | 3 | 9.2w | 1 |
| Disponibilidad | Local | 3 | Pedido | 2 | Pedido | 2 |
| Costo | \$16 | 3 | \$18 | 2 | \$32 | 1 |
| Total | | 19 | | 16 | | 14 |

c. Línea de fuente de alimentación

Al igual que en el caso de los motores, se establece una línea de fuentes de alimentación para la selección posterior del modelo en base a la potencia de consumo del sistema ya que la misma se determinará en base a los elementos del sistema que faltan por establecer, análisis correspondiente al Capítulo IV.

Primero se establece que el tipo de fuente a emplear debe alimentar en una tensión admisible para los actuadores, siendo en el caso de los servomotores de 5 voltios y un rango de 12 a 24 voltios para los motores.

Dadas las características anteriores, el tipo de fuente que se requiere es una fuente conmutada AC-DC, debido a que existen varias cargas de variación de corriente de consumo con una potencia de consumo es moderada. Se tiene los criterios de selección en la Tabla 12

Tabla 12.

Criterios de selección para línea de fuente de alimentación

| Criterio | Descripción |
|------------------------------|---|
| Variedad de potencia | La línea de fuente debe brindar una variedad en la potencia con el fin de seleccionar la adecuada para el sistema una vez establecida la potencia de consumo en el Capítulo IV. |
| Tensión de salida | Debe disponer de una línea en 5v para los servomotores y otra de 12v para los motores |
| Disponibilidad en el mercado | Tiene que encontrarse fácilmente para una intercambiabilidad inmediata en caso de averías. |
| Costo | Contraste con homónimos |

De acuerdo a las características técnicas de los elementos (Anexo D-6) y dada la mayor puntuación en la Tabla 13, se selecciona la línea de fuentes Winstar WS-ATX

Tabla 13.
Selección de fuente de alimentación

| Criterio de Selección | Winstar WS-ATX | | INS P4 | | Quasad ATX | |
|------------------------|----------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación |
| Variedad potencia | 500-1200W | 3 | 600-1200w | 3 | 400-1000w | 2 |
| Disponibilidad Salidas | 5, 12 v | 2 | 12, 24 v | 1 | 3, 5, 12 v | 3 |
| Costos | \$15 | 3 | \$18 | 2 | \$22 | 1 |
| Total | | 8 | | 6 | | 6 |

2.4.3 Dispositivo de control

El dispositivo de control es aquel que efectúa las órdenes físicas provenientes del controlador, sobre los actuadores y sensores del sistema. Para determinar el tipo de dispositivo de control se debe establecer las señales de control y procesamiento que posee el sistema ya establecida la selección de componentes, los cuales son:

- Mínimo 6 salidas PWM para el servocontrol, ya que se dispondrá de dos articulaciones con tres grados de libertad cada una.
- Al menos 6 salidas digitales para el control de los motores, ya que se cuenta con tres puntos de apoyo sobre los cuales se dispondrá un motor y cada motor requiere de dos señales digitales de control.
- 7 entradas análogas, para los sensores de proximidad
- 3 entradas para interrupciones, para los sensores encóder
- Comunicación serial

- Velocidad de transmisión superior a 9600 baudios

De acuerdo a las características técnicas de los elementos (Anexo D-8) y dada la mayor puntuación en la Tabla 14, se selecciona a la tarjeta Arduino Mega 2560.

Tabla 14.
Selección de dispositivo de control

| Criterio de Selección | Arduino Mega | | STM32F407 | | Arduino Due | |
|--------------------------|--------------|------------|-----------|------------|-------------|------------|
| | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación | Valor | Puntuación |
| Salidas PWM (>7) | 15 | 3 | 18 | 3 | 12 | 3 |
| Salidas Digitales (>6) | 39 | 3 | 55 | 3 | 42 | 3 |
| Entradas Análogas (>7) | 16 | 3 | 15 | 3 | 12 | 2 |
| Interrupciones (>=3) | 4 | 3 | 7 | 3 | 4 | 3 |
| Comunicación Serial | Si | 3 | Si | 3 | Si | 3 |
| Velocidad de transmisión | >9600 | 3 | >9600 | 3 | >9600 | 3 |
| Costo | \$38 | 3 | \$47 | 1 | \$41 | 2 |
| Total | | 21 | | 19 | | 19 |

2.5 Método de manufactura

Uno de los requisitos establecidos para el sistema mecánico es que su estructura sea modular, es decir, que se componga de varios módulos independientes para conformar el cuerpo del robot. En base a esto se tiene que establecer el sistema o método de manufactura más óptimo.

Se considera al presente robot como un prototipo, es decir, un primer ejemplar bajo sus características estructurales y/o de control. Como tal, se ha de emplear técnicas de prototipado para

su concepción final ya que permite la corrección o aserción del diseño. Las técnicas comunes de prototipado son:

- Esterolitografía –SLA
- Sinterización selectiva láser – SLS
- Corte y laminado
- Deposición de hilo fundido – FDM
- Inyección en molde
- Mecanizado CNC

Como diserción inicial se establecerá las técnicas disponibles a nivel nacional, en las cuales se encuentra el corte láser, impresión 3D (FDM), en menor medida la inyección por molde y el mecanizado CNC. Si bien se desconoce el diseño de los módulos, se conoce que las piezas se diseñarán de acuerdo a la geometría de los componentes seleccionados, razón por la cual su estructura no será regular y aún más con la condición de disminuir el peso.

El corte láser es poco viable con formas irregulares por lo que se descarta. De igual forma se descarta el mecanizado CNC, debido a que éste es efectivo con materiales metálicos o de alta densidad, además es muy costoso y poco disponible a nivel nacional. La situación es semejante con la inyección por molde, dado que la fabricación de moldes es muy costosa y requiere de un modelo inicial lo que la orienta en aplicaciones de producción en masa.

Evidentemente la impresión 3D a tomado un espacio importante en el prototipado a nivel general, siendo la más disponible, de bajos costos y eficiente cuando se trata de estructuras modulares.

2.5.1 Impresión 3D – FDM

Actualmente la impresión 3D es la más común entre las técnicas de prototipado en todas las áreas de conocimiento, a nivel laboral e industrial. Consiste en una máquina de tipo CNC que dispone de un filamento previamente fundido por un extrusor, con el que forma la estructura de los cuerpos diseñados por programas de tipo CAD. Existen variaciones en su configuración estructural, pero el resultado es semejante.

2.6 Material de la estructura

Mediante impresión por FDM, se pueden emplear varios tipos de filamentos, lo que da propiedades mecánicas diversas a los cuerpos resultantes. Así se tiene a:

- ABS: Brinda mayor resistencia al calor, también un menor desgaste a la abrasión, sin embargo su resistencia a cargas de tracción e impacto es menor que estructuras que emplean PLA, demostrado en los experimentos por el ingeniero César Galera en Control 3D (2018).
- PLA: Abreviatura para ácido poli-láctico, el cual es un filamento biodegradable, basado en fibras de maíz, trigo u otros materiales con abundancia en almidón. Obtiene propiedades mecánicas semejantes a los plásticos sin el daño ambiental (Alleyn, 2019)
- Fibra flexible: Es una variación del PLA, recientemente incorporado para la creación de cuerpos con capacidad elástica, tal es el caso de llantas robóticas y miembros flexibles.
- Otros experimentales: Se está realizando modificaciones al filamento para aplicaciones en diversas áreas tal es el caso de la repostería donde se crean creativos diseños decorativos para postres. En la parte científica se intenta imprimir órganos funcionales

para los humanos. En el estudio de materiales se están creando fibras experimentales para materiales compuestos.

2.6.1 Criterios de selección del material

Considerando el tipo de locomoción que efectuará el robot, con cargas fluctuantes y esfuerzos combinados, las propiedades mecánicas a analizar para el material de la estructura son:

- Resistencia a la tracción – compression
- Resistencia a la flexión
- Resistencia a impacto

El ABS brinda mayor resistencia al calor que el PLA, debido a un mayor punto de fusión y un menor desgaste por abrasión, sin embargo, su resistencia a cargas de tracción e impacto es menor que estructuras que emplean PLA. Esto fue demostrado en los experimentos realizados por el ingeniero César Galera (Control 3D, 2018), donde realizan ensayos de impacto, abrasión, temperatura y esfuerzos flexionantes. Corroborando este análisis, en la Tabla 15 se exponen las propiedades mecánicas de interés en base a las características técnicas de los filamentos ABS y PLA (Anexo D-8), bajo el mismo fabricante, documento cortesía por la empresa ecuatoriana SAIS 3D.

Como se observa en la Tabla 15, el material ABS posee una mayor resistencia a impacto, sin embargo, el PLA posee una mejor resistencia a esfuerzos de tracción y de flexión, es decir, es más resistente a esfuerzos combinados. Por lo tanto, se selecciona al PLA como material de la estructura del robot.

Tabla 15.
Selección de material

| Propiedad | PLA | ABS |
|---|------------|------------|
| Resistencia a la tracción en deformación | 49.5Mpa | 39.0 Mpa |
| Resistencia a la tracción en rotura | 45.6Mpa | 33.9 Mpa |
| Resistencia a la flexión | 103 Mpa | 70.5 Mpa |
| Resistencia a impacto Izod con mella a 23°C | 5.1 KJ/m | 10.7 KJ/m |

Fuente: (SAIS 3D, 2019)

2.7 Lenguaje y plataforma de programación

Existen varias plataformas de programación que integran los lenguajes de programación contemporáneos. Para la programación del robot se considera a los lenguajes de alto nivel, ya que el sistema de control es complejo y se requiere de algoritmos de programación de igual complejidad, los cuales vienen ya provistos en estos lenguajes donde se expresan de manera más acorde a la capacidad cognitiva humana.

Ya que el sistema empleará un análisis por visión artificial y un sistema de control inteligente, se requiere que el lenguaje de programación se oriente a las mismas aplicaciones, teniendo los criterios de selección de la Tabla 16.

Tabla 16.
Criterios de selección para el lenguaje y plataforma de programación

| Criterio | Descripción |
|--------------------|---|
| Tipo de plataforma | Se debe de emplear una plataforma abierta, que permita integrar los algoritmos propios de programación. |

CONTINÚA 

| | |
|-------------------------|--|
| Tiempo de procesamiento | Se busca velocidad de procesamiento, habiendo lenguajes que por diseño requieren de mayor tiempo de procesamiento |
| Requisitos del sistema | Es importante que la plataforma y el lenguaje sean aplicables al sistema operativo del ordenador del proyecto, el cual se basa en Windows 64bits. Además mientras el software demande de menos requisitos, se dispone de una respuesta más rápida del sistema. |
| Costo | Debido a los elevados costos de algunos softwares, se optará por el de menor precio, precautelando el software libre |

Dada la mayor puntuación en la Tabla 17, se selecciona al lenguaje de programación Python y a la plataforma Eclipse. Python es un lenguaje de programación con una sintaxis intuitiva, donde la programación demanda de un estudio de la misma y de práctica.

También se resalta que se empleará a Arduino ID, como plataforma estándar de programación del dispositivo de control Arduino Mega 2560.

Tabla 17.
Análisis de lenguajes y entornos de programación

| Lenguaje Plataforma | Tipo de lenguaje | | Costo Procesamiento | | Requisitos del sistema | TOTAL |
|------------------------|------------------|------------|------------------------|------------|---------------------------|-------|
| | Dato | Puntuación | Dato | Puntuación | Puntuación | |
| C++ - QT Creator | Libre | 3 | Bajo | 3 | 2 | 8 |
| Python – Eclipse | Libre | 3 | Bajo | 3 | 3 | 9 |
| Matlab | Pagada | 1 | Alto | 1 | 1 | 4 |
| Scilab | Libre | 3 | Medio | 2 | 2 | 7 |
| LabView NI | Pagada | 1 | Alto | 1 | 1 | 3 |

Para la puntuación de los requisitos del sistema se emplean las características de cada software disponibles en el Anexo D-9.

2.8 Detección de objetos por visión artificial

El principal objetivo del sistema de visión artificial es el de controlar la trayectoria mediante la identificación de obstáculos en la misma. El algoritmo debe funcionar ante la variación de condiciones como la iluminación, la orientación y disposición de los objetos, puesto que son las condiciones de operación del sistema

Existen algunas técnicas de detección de objetos como:

- Detección de bordes: Aplicado en condiciones de iluminación estables para obtener buenos resultados. (Del Valle Hernández, 2019)
- Espacios de color: Acepta variación de condiciones dependiendo de su parametrización. Sus resultados son eficientes y el coste computacional es bajo. (Iyer, 2016)
- Sustracción de fondo: Se requiere de conocimiento previo de escena. Es el método con mayor eficiencia al detectar cambios en una escena conocida. (Opencv, 2019)
- Estereoscopía: Permite un variar condiciones tanto de luz como de escena. Requiere de dos sensores de imagen y un ordenador con elevada capacidad de procesamiento. (Opencv, 2019)
- Redes neuronales y métodos de reconocimiento estadístico de patrones: Es una técnica muy poderosa y aplicable en cualquier situación, sin embargo, requiere de mucha información y tiempo de entrenamiento para obtener una correcta eficiencia. (García García, 2013)

La detección por bordes se descarta ya que le pretende identificar objetos de diferentes tonalidades de color. Igualmente se descarta la sustracción de fondo ya que la cámara se ubicará en la cabeza del robot y no se tendrá información previa del fondo. No se considera los métodos por redes neuronales debido a que no es óptimo porque demanda de tiempo en procesamiento, además se descarta estereoscopia porque el sistema cuenta con una cámara. Es evidente que en este caso el método más óptimo en la identificación de objetos será el de análisis de espacios de color, ya que el coste computacional es bajo y permite la variabilidad de condiciones de luz.

2.8.1 Análisis por espacios de color

Para analizar una imagen por espacios de color se emplea modelos de color, en los cuales se encuentra al modelo CMYK, el modelo RGB, el modelo HSV, el modelo HSL, escala de grises, entre otros. No obstante, los modelos que permiten una detección más eficiente ante variaciones lumínicas y de color, son aquellos cuya representación de la imagen se asemeja a nuestra vista, como los modelos HSV y HSL, con sus respectivas variaciones. (Herrera, 2019)

Se opta un análisis por el modelo HSV, ya que involucra al matiz, la saturación y el brillo. En este modelo, como se ve en la Figura 18. Se establecen tres capas:

- Hue, que denota el matiz, es decir, el tono color.
- Saturation, la pureza colorimétrica que indica el nivel de excitación ante la tonalidad o matiz.
- Value, representa el brillo dado por los componentes RGB.

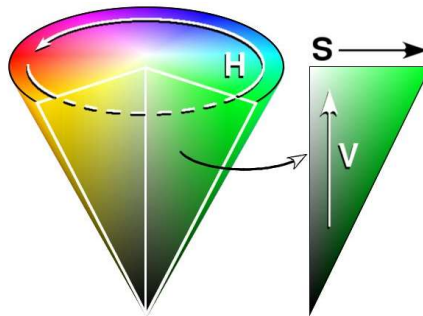


Figura 18. Representación por el modelo HSV

Fuente: (wikipedia, 2019)

El análisis se basa en filtrar a la imagen por capas donde se establecen los rangos de valores de matiz de color, de saturación y de brillo.

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

El diseño del sistema mecánico se basa en los requerimientos y limitaciones del sistema, y de la selección de los componentes, puesto que la estructura se diseñará en base a la geometría de los mismos.

3.1 Arquitectura del sistema mecánico

El cuerpo del robot se ha de componer de dos tipos de módulos dispuestos consecutivamente. Teniendo en cuenta que se requiere de tres módulos de desplazamiento y de dos módulos biaxiales, se plantea en la Figura 19, parte a), el esquema de la posible estructura del robot. También se observa en la parte b), el esquema para el diseño del módulo de desplazamiento y en la parte c), el del módulo biaxial que se basa en la junta cardán.

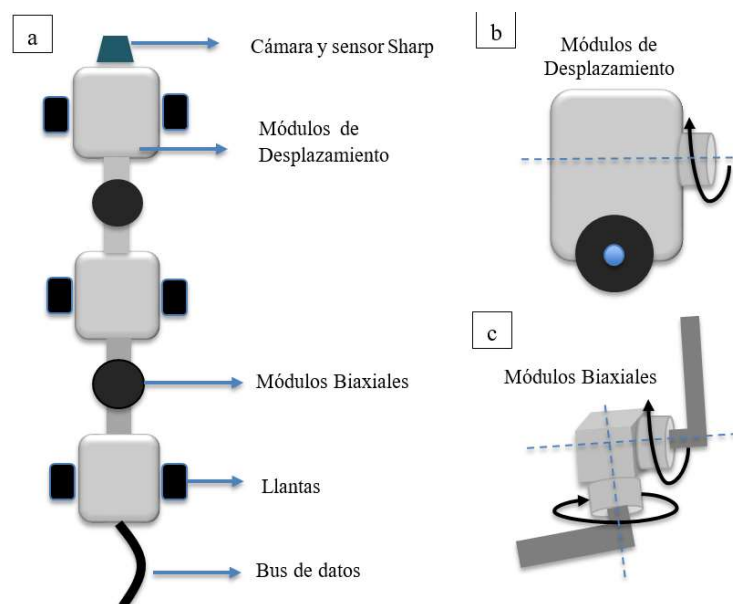


Figura 19. Esquema de estructura del sistema mecánico

Se señala que los módulos deben de ser capaces de permitir el acople de nuevos elementos tal es el caso del módulo guía que posee la cámara, o el módulo final que acopla un bus para la alimentación y comunicación.

3.2 Análisis dinámico

Mediante el análisis dinámico sobre el módulo de desplazamiento se determina la fuerza de propulsión requerida para la traslación del robot. En la Figura 20, se observa el diagrama de cuerpo libre del módulo de desplazamiento, donde se establece una posible inclinación de la superficie del desplazamiento como condición del terreno.

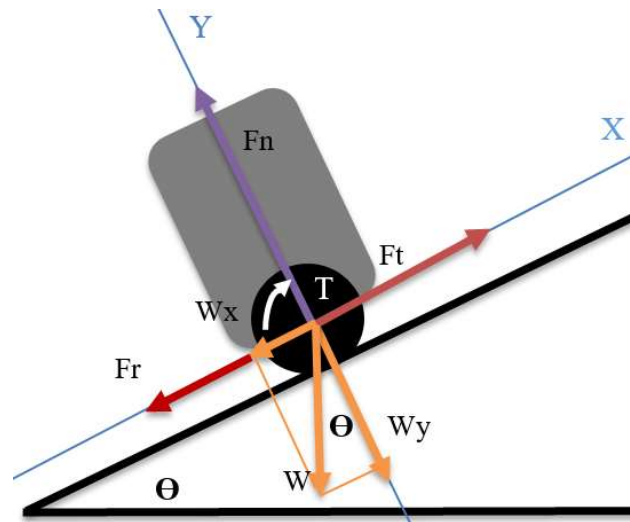


Figura 20. Diagrama de cuerpo libre del módulo de desplazamiento en operación

Dónde :

F_t = Fuerza de traslación del módulo de desplazamiento

F_r = Fricción de la superficie

W = Peso del módulo

F_n = Fuerza Normal

Θ = Ángulo de inclinación de la superficie

T = Torque

Dado que el movimiento se efectua sobre el plano, la acción sobre el eje Y se reduce a:

$$\sum F_y = 0 \quad (3.1)$$

$$F_n - W_y = 0$$

$$F_n = W_y$$

$$F_n = W \cdot \text{Cos}(\theta) \quad (3.2)$$

Mientras que la aceleración, la masa, las fuerzas de traslacion y fricción se relacionan con la segunda ley de Newton:

$$\sum F_x = m \cdot a \quad (3.3)$$

$$F_t - W_x - F_r = m \cdot a$$

$$F_t - W \cdot \text{Sen}(\theta) - 2 \cdot F_r = m \cdot a$$

$$F_t - W \cdot \text{Sen}(\theta) - 2 \cdot U_c \cdot F_n = m \cdot a$$

$$F_t - W \cdot \text{Sen}(\theta) - 2 \cdot U_c \cdot W \cdot \text{Cos}(\theta) = m \cdot a$$

$$F_t = W \cdot \text{Sen}(\theta) + 2 \cdot U_c \cdot W \cdot \text{Cos}(\theta) + m \cdot a \quad (3.4)$$

La fuerza de traslación del módulo Ft , es producida por el par del motor en relación con el radio de la rueda, como se muestra en la Figura 21, de la cual se deduce:

$$Ft = \frac{T}{R} \quad (3.5)$$

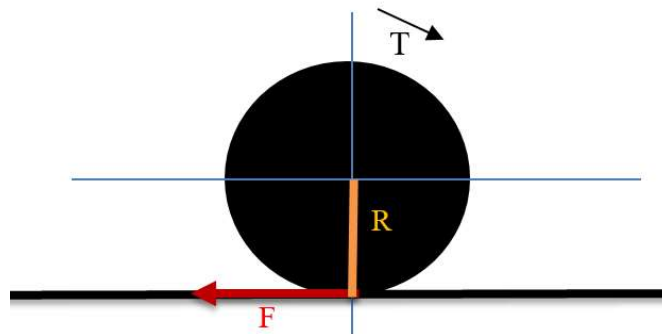


Figura 21. Diagrama de fuerza de Avance del módulo de desplazamiento

3.3 Diseño de estructuras

a. Diseño de módulo articular

El módulo articular se basa en la junta cardán la cual permite la rotación de los eslabones alrededor de dos ejes perpendiculares. De acuerdo a la geometría de los servomotores (Anexo D-4.1), se dispone del diseño del módulo articular en la Figura 22, donde se observa la disposición de los elementos para conformar la junta cardán y la simetría entre los eslabones, impidiendo así desbalances. También se observa que el módulo posee dos grados de libertad, por lo que se ha de incorporar el restante en el módulo de desplazamiento.

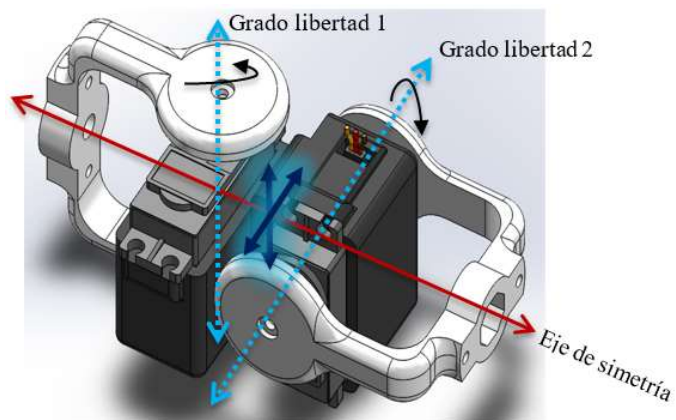


Figura 22. Módulo articular

Los componentes del módulo articular se muestran en la Figura 23. El módulo resultante tiene una masa de 146.47 g, con un peso de 1.43 N.

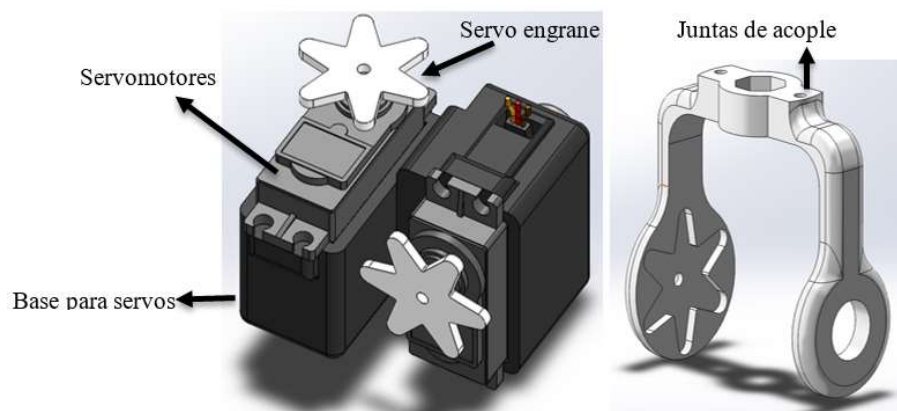


Figura 23. Componentes del módulo articular

b. Diseño de módulo de desplazamiento

El diseño del módulo de desplazamiento tiene los siguientes parámetros:

- Debe incorporar el grado de libertad de la articulación.
- Debe brindar soporte a la estructura.

- Debe incorporar el motor para el desplazamiento tangencial a la superficie de contacto.

Dada la selección de componentes, se muestra el diseño del módulo de desplazamiento en la Figura 24, donde se aprecia que también posee dos grados de libertad.

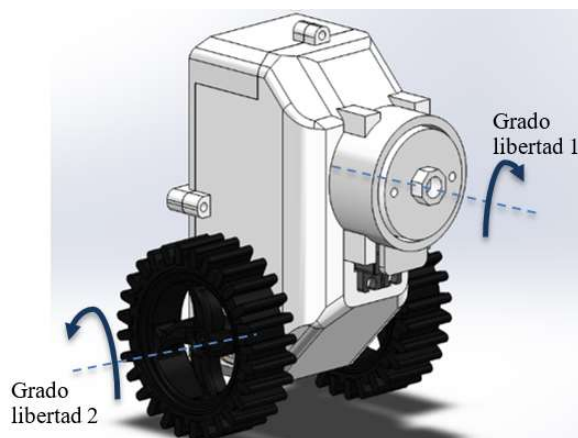


Figura 24. Módulo de Desplazamiento

Para reconocer los parámetros de diseño se observa la estructura interna del módulo y sus componentes en la Figura 25, donde se dispone al motor de forma vertical para optimizar el espacio y se orienta al servomotor para el acople con los eslabones del módulo articular. El módulo de desplazamiento resultante tiene una masa de 396.29 g con un peso de 3.88 N

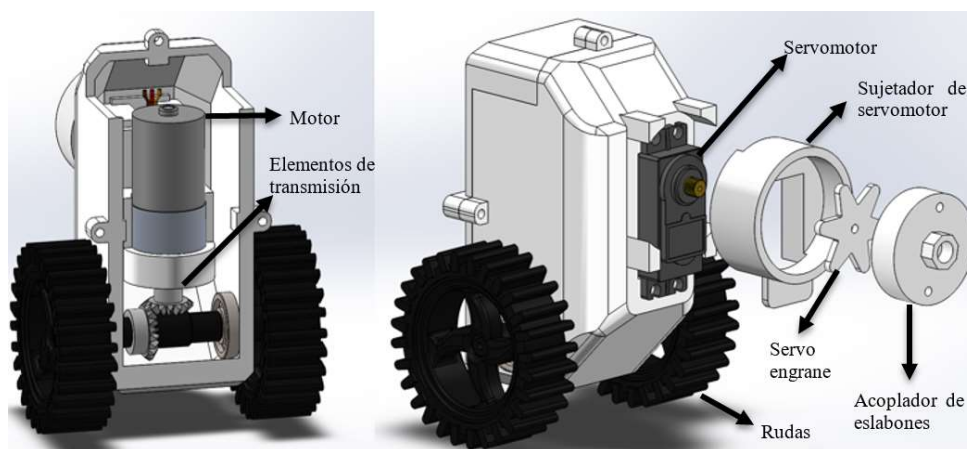


Figura 25. Componentes del módulo de desplazamiento

c. Diseño de módulo guía

El módulo guía se basa en el de desplazamiento bajo una modificación para incorporar la cámara que debe poseer motricidad en tres grados de libertad para una navegación vertical, una horizontal y una torsional, como se muestra en la Figura 26.

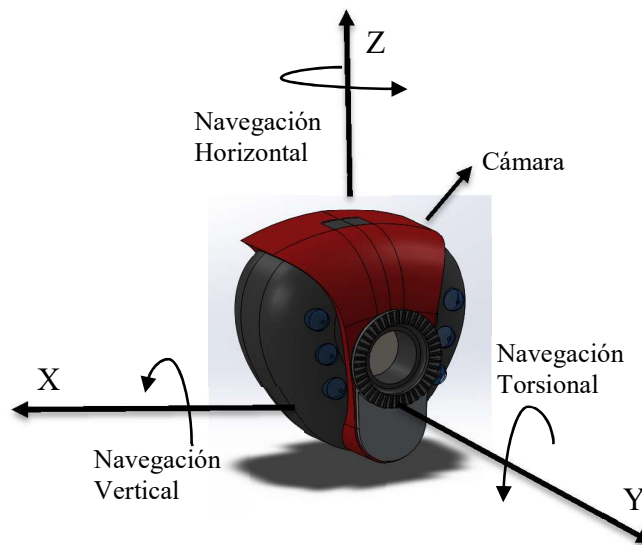


Figura 26. Motricidad requerida para la cámara

Si bien el control de la trayectoria es autónoma, el operador debe ser capaz de establecer la dirección en la cual desea trasladar el robot y para ello se requiere de una navegación libre con la cámara sin alterar la posición del robot, específicamente la locomoción horizontal, ya que si se mueve lateralmente podría producirse colisiones inesperadas. A fin de eliminar este efecto se reposiciona el servomotor del módulo de desplazamiento para permitir la navegación horizontal.

Para la navegación vertical y la torsional no se requiere implementar otros actuadores ya que se va a aprovechar la motricidad articular del cuerpo del robot sin efectuar movimientos laterales.

Adicionalmente un sensor de distancia va acoplado a la cámara para medir la proximidad de objetos en la dirección deseada. Integrando estos criterios, el diseño resultante para el módulo guía se muestra en la Figura 27, teniendo una masa de 497.14 g y un peso de 4.87 N

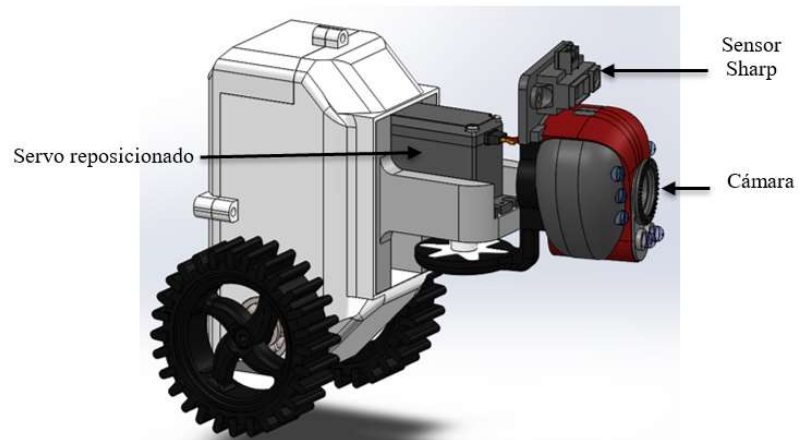


Figura 27. Módulo guía

3.4 Ensamble

El ensamble del cuerpo total consiste en la disposición de los módulos dada la arquitectura de la estructura del robot, como se observa en la Figura 28, se dispone de dos módulos articulares, tres módulos de desplazamiento y un módulo guía.

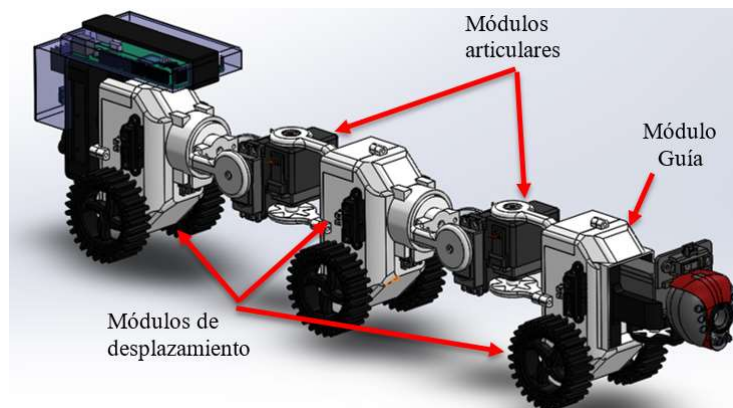


Figura 28. Ensamble sistema mecánico

En base al sistema cartesiano en la Figura 29, se establece los grados de libertad por módulo y la designación de los actuadores dando un total de 10 grados de libertad al robot de acuerdo a:

- Rotación eje A: Sa1, Sa2
- Rotación eje B: Sb1, Sb2
- Rotación eje C: Sc1, Sc2, Sc3
- Motores: M1, M2, M3

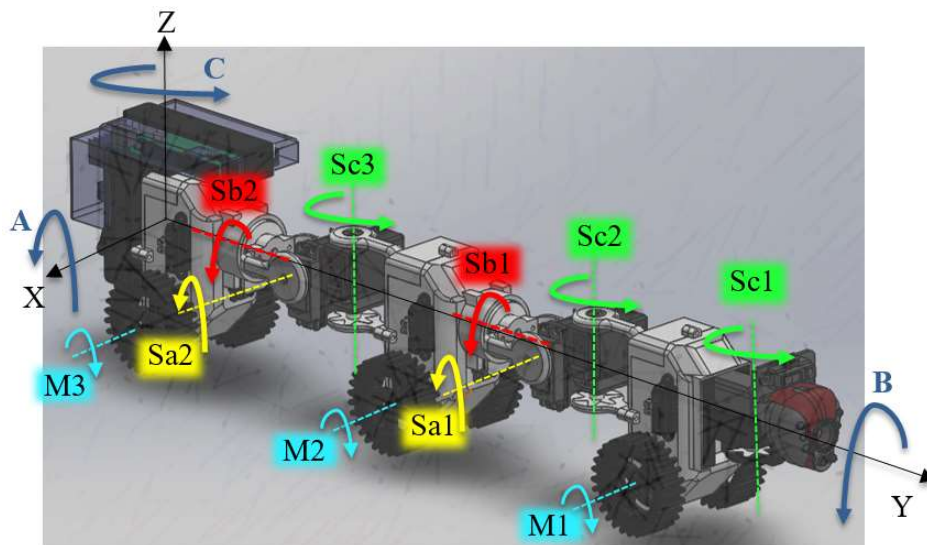


Figura 29. Ejes de referencia sobre actuadores

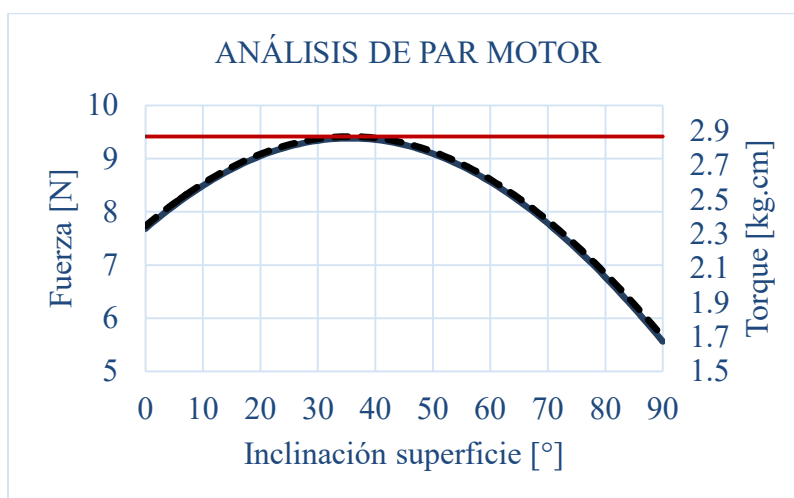
3.5 Cálculo de potencia mecánica de motor

Para determinar el par requerido de los motores, se reemplaza los valores de las variables indicados en la Tabla 18, en las ecuaciones del análisis dinámico (3.4) y (3.5), obteniendo así la fuerza de traslación y el par requeridos.

Tabla 18.*Variables en el análisis de la potencia mecánica de los motores*

| | |
|---|-------|
| Masa (Kg) (módulo articular + módulo de desplazamiento) | 0.54 |
| Peso (N) | 5.30 |
| Coefficiente fricción estático μ_e (para superficies caucho/madera) | 0.70 |
| Velocidad angular motor (rpm) | 110 |
| Velocidad angular motor (rad/s) | 11.57 |
| Aceleración angular motor (rad/s ²) | 16.53 |
| Aceleración tangencial motor (m/s ²) | 0.50 |
| Tiempo estabilización de motor (s) | 0.70 |
| Radio de rueda (m) | 0.03 |

Ya que el objetivo es determinar el par máximo requerido dadas las condiciones del entorno en el que opera el robot, se considera como posible situación y para garantizar la potencia del motor, a una inclinación entre 0° y 60°, también se establece que el entorno ha de ser de madera y las llantas del robot de goma, obteniendo una variación de fuerza de traslación y torque mostrada en la Figura 30, de estos valores se considera al par máximo, siendo de 2.87 kg.cm, el se considera como la potencia mínima del motor. De la línea del motor Chihai CHR-GM25-370, se selecciona el motor de 140rpm i45, ya que su par es el más cercano, siendo de 3.4 kg.cm

**Figura 30.** Análisis de par del motor

3.6 Análisis estructural

En la posición de equilibrio los actuadores permanecen en su posición de arranque, manteniendo simetría en los puntos de apoyo, como se muestra en la parte a) de la Figura 31, posición que se considera como una viga con soportes simétricos de carga nula y en consecuencia los esfuerzos son despreciables. Sin embargo, cuando se realiza una oscilación vertical por los servomotores *Sai*, como se muestra en la parte b), los eslabones y la estructura se somete a cargas flexionantes y cortantes.

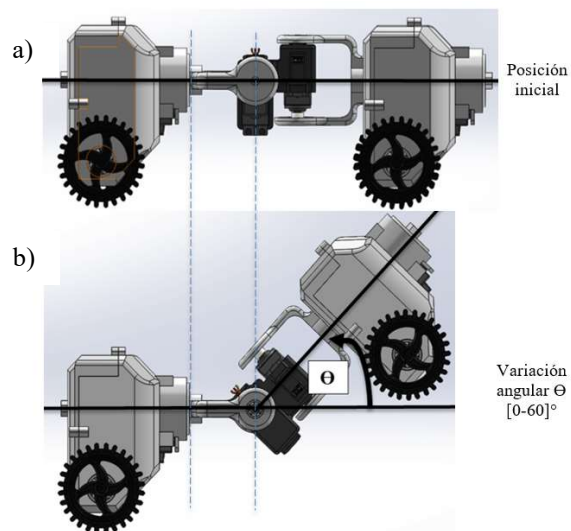


Figura 31. Posiciones de análisis de mecanismo

Para el análisis se considera un ángulo de inclinación máximo en el cual opera el robot, siendo $\Theta = 45^\circ$. Se considera la presencia de esfuerzos combinados tanto de deformación, flexión y normales. Por lo tanto se emplea un análisis por software CAE para determinar el factor de seguridad de los elementos, así como la deformación y esfuerzos admisibles. Se utiliza como

método de predicción de falla el de esfuerzos fluctuantes combinados de Von-Misses, la cual determina esfuerzos biaxiales o triaxiales en materiales dúctiles.

Para el efecto se emplean los valores de los pesos de los módulos determinados en el diseño respectivo. La carga a la cual se somete la estructura es la de su propio peso, siendo de 396.29 g para el módulo de desplazamiento, 146.47 g para el módulo articular y 497.14 g para el módulo guía, bajo la acción de la gravedad de 9.8066m/s^2 . En la Figura 32, se observan las condiciones de frontera aplicadas en el análisis, en la que se establece a la cara *A* como soporte fijo, ya que la tensión generada por los eslabones consecutivos tiende a generar dicha condición.

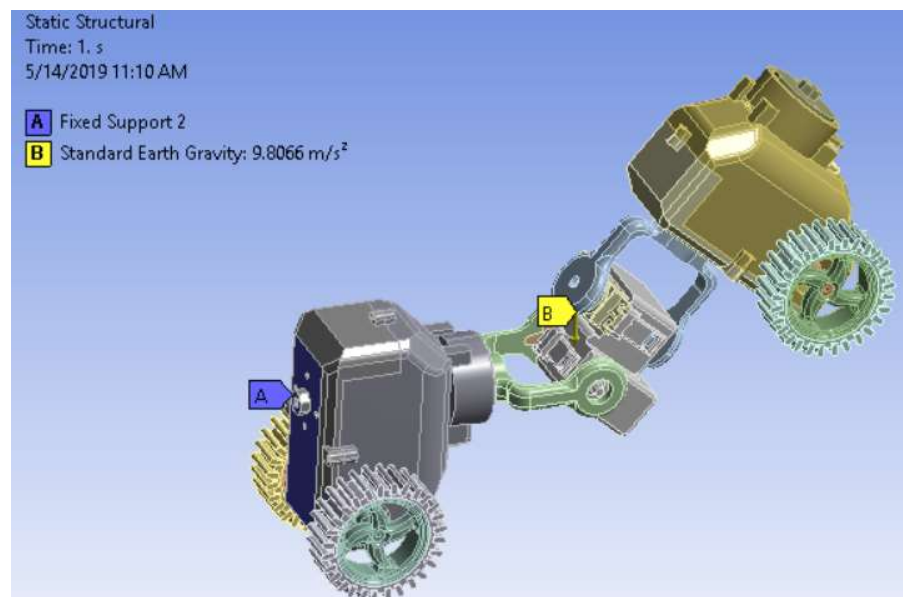


Figura 32. Condiciones de frontera del análisis estático de la estructura mecánica.

Como se muestra en la Figura 33, parte a), en los eslabones de acople del módulo biaxial se produce el mayor esfuerzo, de 2.398 Mpa, el cual no excede al máximo permisible de 8.79 Mpa, por lo que no se produce falla. En la parte b) se observa que la deformación máxima admisible es de 0.678 mm, sin embargo el valor alcanzado es de 0.45mm en los eslabones, lo cual es aceptable

dato que no produce falla. También se resalta que el factor de seguridad mínimo obtenido en la sección c), mediante el análisis de cargas fluctuantes, es de 9.8037, valor admisible dado el criterio de diseño clásico donde para materiales dúctiles, está comprendido entre 2.5 y 4.0 para el “Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquina bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente”. (Mott P.E., 2006)

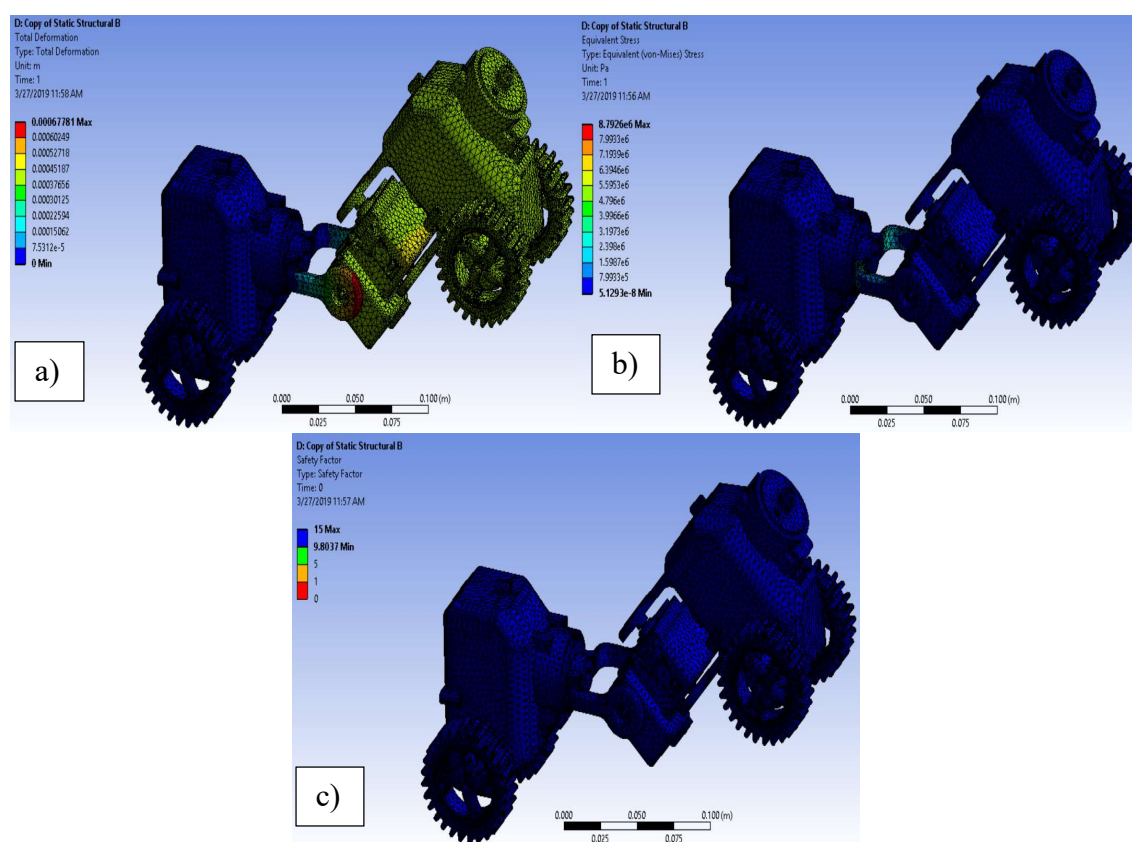


Figura 33. Análisis estático de estructura: a) análisis de deformación, b) esfuerzo equivalente, c) factor de seguridad

En la Tabla 18, se muestran los valores resultantes del análisis estático estructural.

Tabla 19.
Valores resultantes de diseño para operación efectiva

| Nombre | Valor |
|---------------------------|--------------|
| Deformación máxima | 0.6778 mm |
| Factor de seguridad | 9.8037 - 15 |
| Esfuerzo Máximo Admisible | 8.79 MPa |

3.7 Volúmen de Trabajo

El volúmen de trabajo es determinado por los rangos de trabajo del mecanismo en los que se desempeña adecuadamente sin colisiones o singularidades. Para definir los rangos de trabajo se emplea un análisis por software CAE, dónde se establece:

- Interferencia entre componentes
- Trazamiento de curvas de desplazamiento del mecanismo
- Los envolventes de movimiento del mecanismo

Los rangos de trabajo se definen por los límites motrices del mecanismo, para lo cual se analiza el acople de los módulos básicos para la conformación del cuerpo del robot, es decir, dos de desplazamiento y un módulo articular como se muestra en la Figura 34. Se resalta que en la locomoción vertical los rangos de trabajo son de -95° a 120° , mientras que en la lateral es de $\pm 115^\circ$.

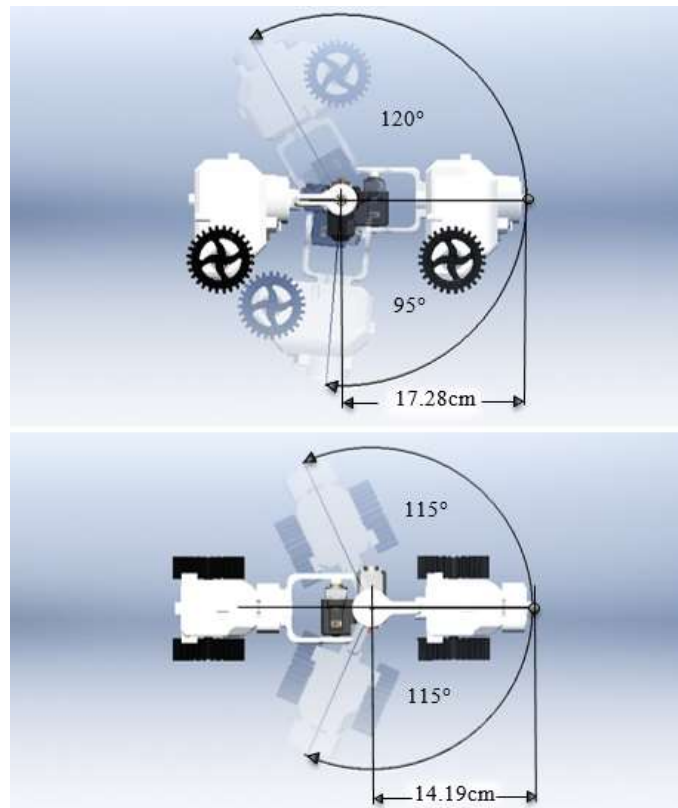


Figura 34. Rangos de trabajo del mecanismo

En la Figura 35 se muestra la envolvente de movimiento del mecanismo con sus límites de trabajo.

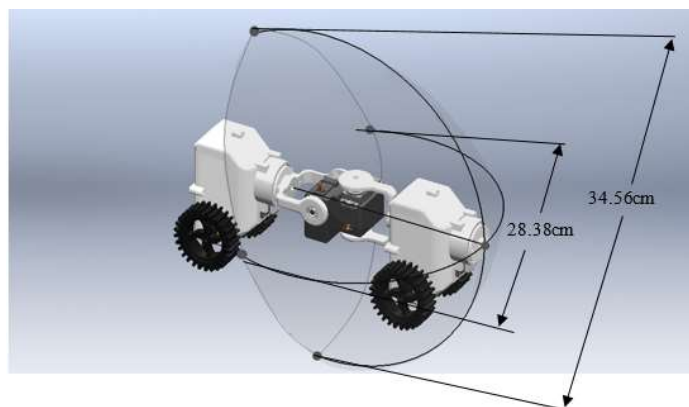


Figura 35. Envolvente de trabajo del mecanismo

3.8 Manufactura del sistema mecánico

Para la manufactura del robot se emplea a la técnica de prototipado impresión 3D del tipo FDM, en el material PLA, para ello se utilizó una impresora 3D FDM Delta Kossel Pro y filamento de 1.75mm, como se muestra en parte a) de la Figura 36.

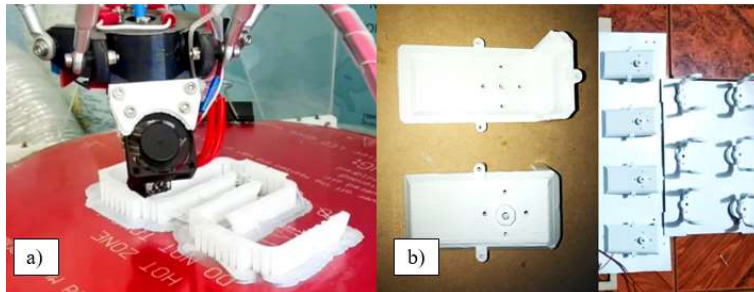


Figura 36. Manufactura de la estructura: a) impresión FDM, b) acabados

Adicionalmente se trató a las piezas con un recubrimiento de pintura plástica esmaltada OHIO American Clear A32, con el objeto de un mejor acabado y brindar una mayor resistencia a la corrosión, como se observa en la sección b) de la Figura 36.

Se ensambla el sistema mecánico incorporando los elementos de unión como rodamientos, llantas, tornillos, pernos, los motores y servomotores, como se muestra en la Figura 37.

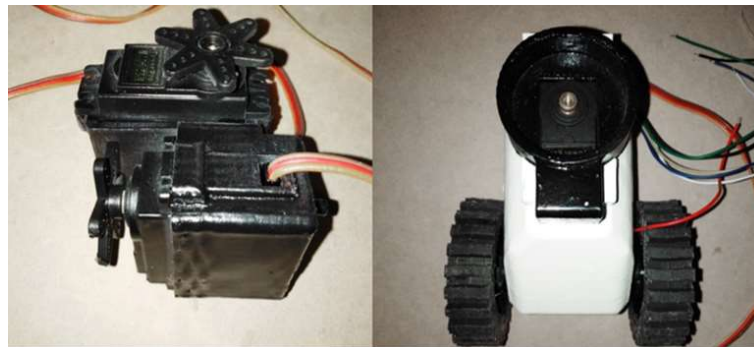


Figura 37. Implementación del sistema mecánico

Para el ensamble final se debe incorporar el sistema electrónico y de control, lo cual se realiza en el siguiente capítulo.

3.8 Diseño e implementación del entorno controlado

En el diseño del escenario se considera que debe ser de fácil acceso, además debe contar con la integración de lámparas y con dos cámaras internas para poder visualizar el entorno. También se requiere que el escenario permita la libre operación del robot, ya que el robot mide menos de 60 cm, se propone un entorno de 250 cm x 70 cm para un correcto desempeño, como se observa en la Figura 38.

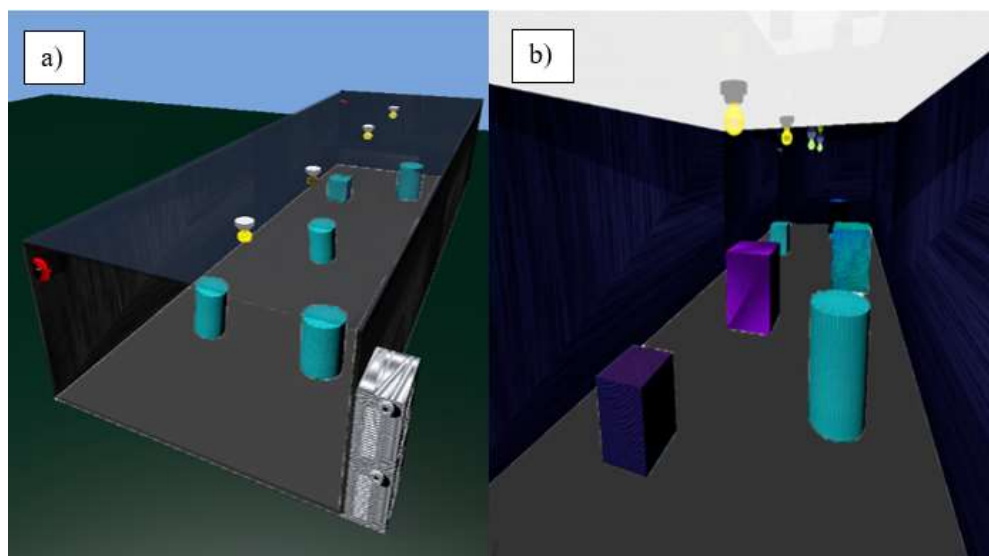


Figura 38. Diseño del entorno controlado, a) vista externa, b) vista interna

La implementación del entorno controlado se muestra en la Figura 39, donde para la estructura se empleó madera triplex de 9mm de espesor. Para proteger y dar acabados se empleó pintura blanca. También se empleó foamy de colores como material cobertor de los obstáculos y de la superficie de desplazamiento, por su capacidad de bloquear reflejos y por su adherencia estable.

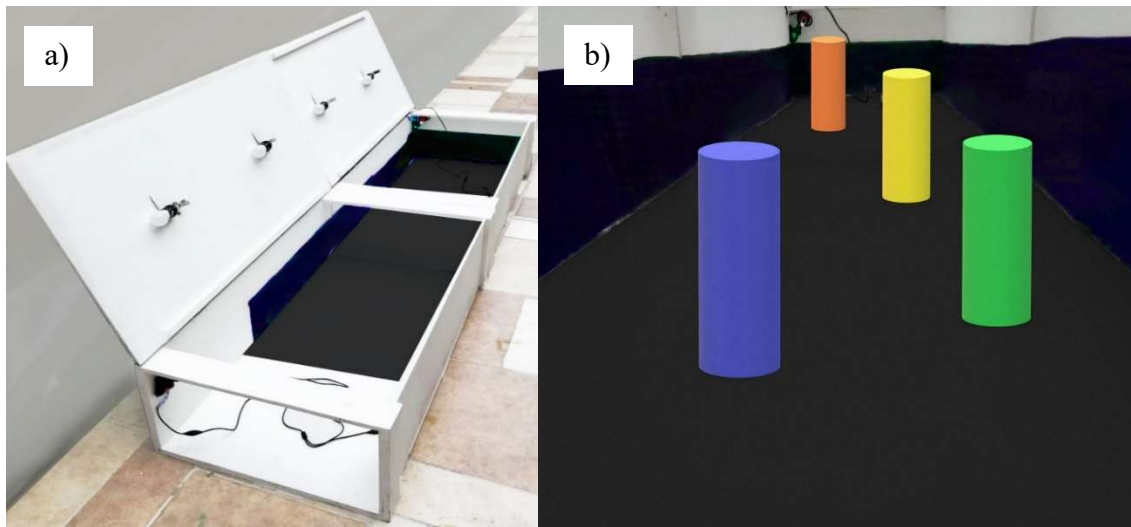


Figura 39. Implementación de entorno controlado: a) vista externa , b) vista interna

Adicionalmente se emplea el software IP Camara Viewer para visualizar las cámaras del entorno y con ello evaluar el desempeño del robot.

Para agregar las cámaras se selecciona *Add Camera*, después en *Webcam* y finalmente se selecciona la cámara conectada, como se muestra en la Figura 40.

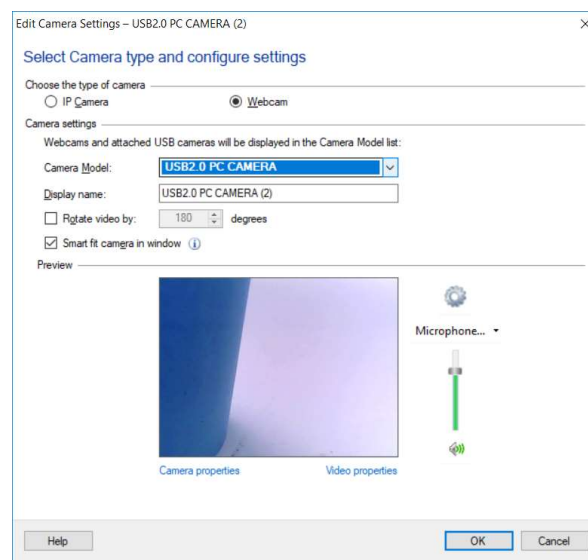


Figura 40. Adición de cámaras en Ip camera viewer

Una vez agragadas las camaras se puede visualizar el entorno controlado en la pantalla principal como se muestra en la Figura 41.

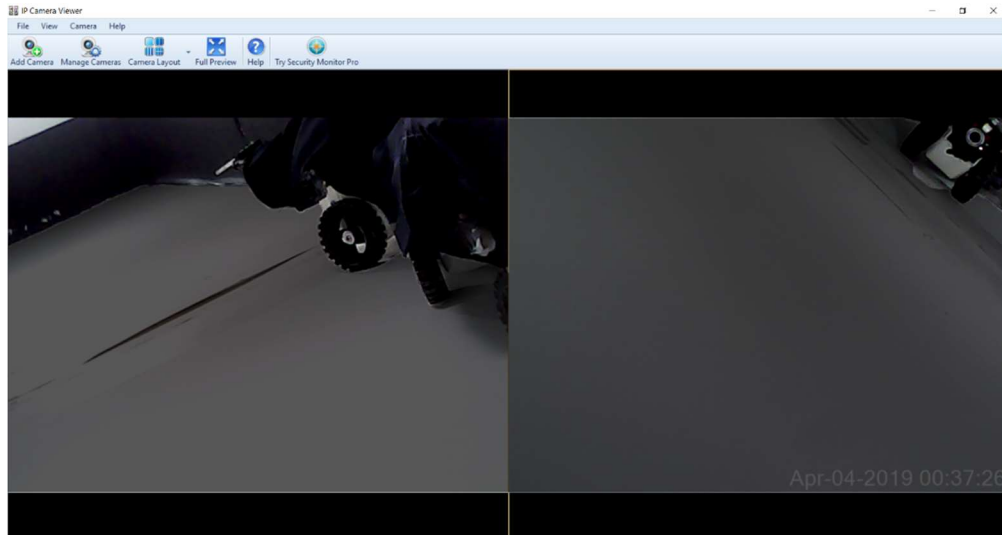


Figura 41. Monitoreo por cámaras del entorno controlado

CAPÍTULO IV

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

4.1 SISTEMA ELECTRÓNICO

4.1.1 Potencia de alimentación

La fuente de alimentación debe ser capaz de abastecer la potencia eléctrica demandada por los servomotores, los motores y sensores del sistema. Este consumo eléctrico depende del número de actuadores y de su corriente de arranque.

Para el caso de los servomotores, los datos de consumo eléctrico se encuentran disponibles en su hoja de características (Anexo D-6), teniendo un consumo de potencia dividida entre el consumo de los servomotores y el consumo de los motores dc, de tal forma que:

- Potencia Servomotores:

$$I_{\text{arranque_servos}} = 2,5A$$

$$V_{\text{m_servos}} = 7,2V$$

$$P_i = I_{\text{arranque}} \cdot V_m \quad (4.1)$$

$$P_i = 2,5A \cdot 7,2V$$

$$P_i = 18W$$

$$P_{\text{Servos}} = n_{\text{servos}} \cdot P_i \quad (4.2)$$

$$P_{\text{Servos}} = 7 * 18 \text{ W}$$

$$P_{\text{Servos}} = 126 \text{ W}$$

- Potencia de motores DC:

$$I_{\text{arranque_motores}} = 4,2 \text{ A}$$

$$V_{\text{m_motores}} = 12 \text{ V}$$

$$P_i = I_{\text{arranque_motores}} \cdot V_m \quad (4.3)$$

$$P_i = 4,2 \text{ A} * 12 \text{ V}$$

$$P_i = 50,4 \text{ W}$$

$$P_{\text{Motores}} = n_{\text{Motores}} \cdot P_i \quad (4.4)$$

$$P_{\text{Motores}} = 4 * 50,4 \text{ W}$$

$$P_{\text{Motores}} = 201,6 \text{ W}$$

- Potencia sensores:

$$P_{\text{sensorSharp}} = 0.11 \text{ W}$$

$$P_{\text{sensorEncoder}} = 0.05 \text{ W}$$

$$P_{\text{total_sensores}} = P_{\text{sensorSharp}} \cdot n_{\text{sensores}} + P_{\text{sensorEncoder}} \cdot n_{\text{sensores}} \quad (4.5)$$

$$P_{\text{total_sensores}} = 0.11 \text{ W} * 7 + 0.05 \text{ W} * 3$$

$$P_{\text{total_sensores}} = 0.92W$$

- Potencia Total:

Considerando idealización sin pérdidas

$$P_{\text{Total}} = P_{\text{Motores}} + P_{\text{Servos}} + P_{\text{sensores}} \quad (4.6)$$

$$P_{\text{Total}} = (126 + 201,6 + 0.92) W$$

$$P_{\text{Total}} = 328,52 w$$

Se considera que existen posibles variaciones respecto a la potencia real de consumo, por lo que se optará por la superior más cercana, Winstar Modelo WS – ATX – 450 W

4.1.2 Diagrama de Conexión del Sistema Electrónico

Dada la naturaleza de los instrumentos empleados, no se requiere realizar una placa de circuitos, por lo que establece el diagrama de conexión como se muestra en la Figura 42. Véase ampliado en Anexo C-1.

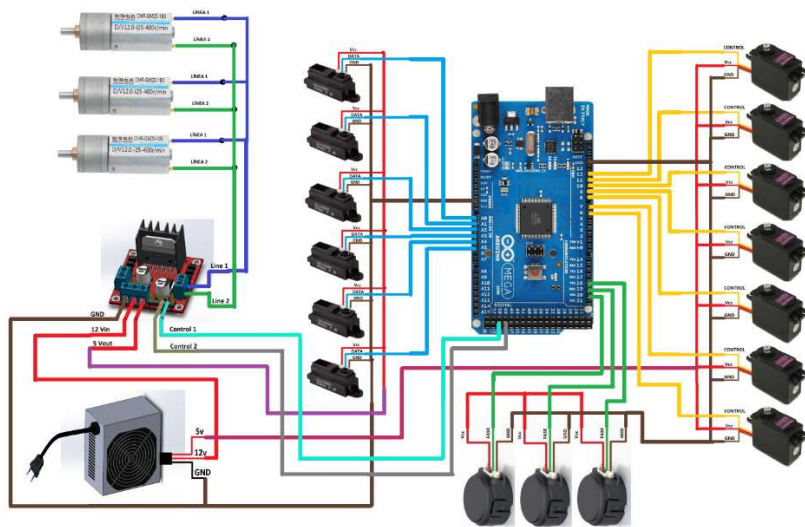


Figura 42. Diagrama de conexión del Sistema electrónico

4.1.3 Implementación del Sistema Electrónico

En base al diagrama de conexión del sistema electrónico, se conectan los elementos como se muestra en la Figura 43.

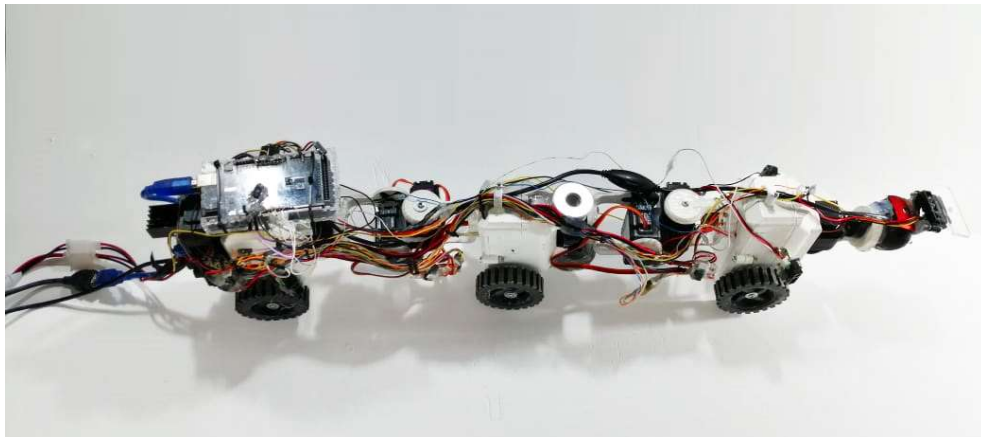


Figura 43. Implementación de sistema electrónico

Debido a la exposición del cableado y de los elementos se ha optado por una cubierta de Supplex, tela sintética de nylon , como se muestra en la Figura 44. La piel protege a los componentes electrónicos tanto del contacto como de intervención, además brinda la flexibilidad y elasticidad necesarios para la correcta locomoción.



Figura 44. Implementación de piel protectora

4.2 SISTEMA DE CONTROL

4.2.1 Variables del Sistema

- a) Variables de entrada: Son las señales de referencia que ingresan al sistema de control que determinan el estado de la planta, generalmente son valores provistos por los sensores.
- La posición angular de cada servomotor
 - La distancia entregada por los sensores Sharp
 - La distancia de desplazamiento provista por el sensor encoder
 - La imagen captada por la cámara
- b) Variables de salida: Son las respuestas o acciones que proporciona el sistema de control
- Los ángulos de posición para los servomotores
 - Movimiento de motores
- c) Variable manipulada: “Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada” (Ogata, 2010)
- Desplazamiento parcial
- d) Variable controlada: “Es la cantidad o condición que se mide y controla” (Ogata, 2010)
- La trayectoria del robot

4.2.2 Perturbaciones

Se define así a todo factor que perjudica el resultado del sistema de control y es importante identificarlas para poder incluir su efecto en el sistema de control ya que hay que tratar de eliminar o disminuir su efecto para poder obtener un control óptimo. En el sistema presente, las perturbaciones comprenden a:

- Colisiones
- Rozamientos involuntarios con las ruedas
- Errores de posicionamiento de servos
- Errores de captura de imagen
- Tensión en cableado

4.2.3 Estructura del sistema de control

El sistema de control se conforma por tres subsistemas, los cuales son:

- Sistema de visión artificial: su función es identificar obstáculos en la trayectoria del robot y modificarla en virtud de este análisis.
- Sistema de control de locomoción: encargado de motricidad y el desplazamiento del robot en base al seguimiento de un eslabón guía.
- Sistema de control de trayectoria: el cual controla la trayectoria en base a los desplazamientos parciales

Cabe resaltar que cada subsistema tiene una estructura y estrategia de control diferente.

4.2.4 Sistema de Control de Locomoción

El diseño del sistema de control de la locomoción se basa en los requerimientos y limitaciones establecidas en el Capítulo II, lo cual se sintetiza en dos funciones:

- Seguimiento de eslabón guía
- Evitar colisiones.

a. Composición de la locomoción del robot

Para diseñar el controlador del sistema de locomoción, se debe establecer qué movimientos constituyen la locomoción del robot, lo cual se aprecia en la Figura 45.

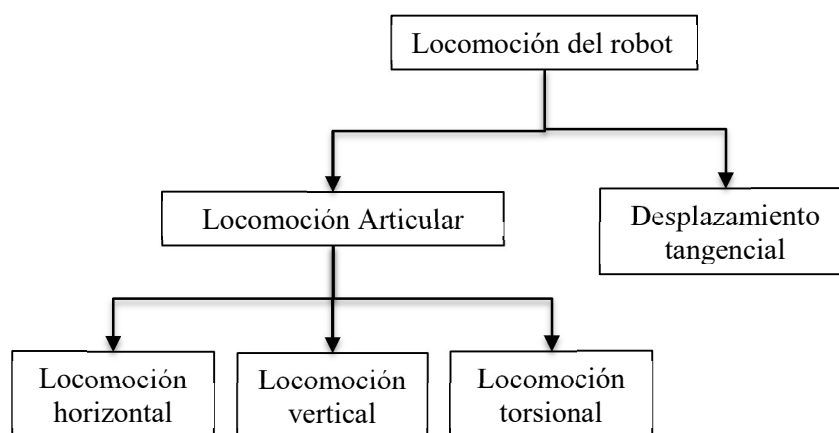


Figura 45. Composición del sistema de locomoción del robot

b. Variables del sistema de locomoción

Dado que la locomoción del robot se integra por tres tipos de locomoción, cada una tiene diferentes variables que determinan su comportamiento, las cuales se indican en la Tabla 20.

Tabla 20.

Variables de los tipos de locomoción

| Tipo de locomoción | Variables independientes | Variables dependientes |
|---------------------------|---|--|
| Locomoción horizontal | <ul style="list-style-type: none"> - El estado actual de la articulación por actuadores Sci. - El estado de destino ideal de la articulación por actuadores Sci. - La distancia de desplazamiento en la que se desarrolla este cambio. | <ul style="list-style-type: none"> - Posición de salida o final de la articulación por actuadores Sci |

| | | | | |
|---------------------------|---|--|---|------------------------------|
| Locomoción vertical | - | Reposicionamiento de actuadores Sci . | - | Posición de actuadores Sai |
| Locomoción torsional | - | Posición de actuador $Sc1$. | - | Posición de actuadores Sbi |
| Desplazamiento Tangencial | - | Sentido de rotación de motores (∂). | - | Desplazamiento (Dt) |
| | - | Estado de motor (ϵ). | | |

c. Interpretación matemática de la planta.

Obtener un modelo matemático unificado de la planta es de elevada complejidad, no solo por tratarse de un robot móvil multi articular; también porque este análisis depende de las múltiples alteraciones no determinables que presenta la planta física, como variaciones de inercia, de densidad, de masa, de resistencia mecánica, de fricción y de esfuerzos, producto de la implementación del sistema electrónico, la piel del robot y la manufactura de la estructura.

También se reconoce que al tener un modelo unificado de un sistema modular se desaprovecha la facultad del control descentralizado que es el idóneo en estos sistemas. (Ogata, 2010)

Una vez establecidas las variables que involucran el comportamiento de cada tipo de locomoción, se expresa matemáticamente la relación entre variables para el diseño del controlador.

- Locomoción horizontal

El reposicionamiento de cada servomotor Sci se expresa por:

$$\theta ci_{salida}(\theta ci_{actual}, \theta ci_{destino}, \Delta_{distancia}) \quad (4.7)$$

- Locomoción vertical

El reposicionamiento de cada servomotor Sai se expresa por:

$$\theta_{ai_salida}(\Delta\theta_{ci}) \quad (4.8)$$

- Locomoción torsional

$$\theta_{bi_salida}(\theta_{c_1}) \quad (4.9)$$

- Desplazamiento tangencial

$$D_t(\partial, \epsilon) \quad (4.10)$$

d. Estrategia de control

Se define así al tipo de estructura de los lazos entre las variables medidas o de entrada y las variables controladas del sistema de control, pudiendo ser de lazo abierto y cerrado.

En el caso del sistema de lazo cerrado o sistema realimentado, el cual, según Ogata (2010), se trata de un sistema que utiliza la diferencia entre el valor de entrada o referencia o valor deseado y el valor de salida para la acción del controlador. Por otra parte, los sistemas de lazo abierto son aquellos donde su acción de control es independiente de su salida.

Ya que no se mide el error del posicionamiento de los eslabones y por lo tanto no calcula la posición en base al error de salida, el sistema se considera de lazo abierto.

e. Tipo de Sistema

Dado el criterio de estabilidad y tiempo, se tiene dos posibilidades:

- Sistemas invariables en el tiempo o sistemas estáticos: su estado depende solo de las causas actuales. (Cortéz & Garibay, 2018)

- Sistemas variables en el tiempo o sistemas dinámicos: su estado cambia con el tiempo por las causas actuales y las previas (Cortéz & Garibay, 2018)

Dado que la locomoción del robot, se basa en el estado actual y en el anterior, y la salida es estable, el sistema es de tipo estático.

f. Selección del controlador

Debido a que el sistema se compone de varios tipos de locomoción y que es de tipo MIMO (múltiples entradas con múltiples salidas), se opta por el desarrollo de un control descentralizado síncrono, estableciendo un controlador para cada tipo de locomoción, los cuales se sincronizan para lograr el control total de la locomoción del robot.

Ya que existen varios tipos de locomoción, se procede con la selección del controlador respectivo dadas sus características y necesidades.

f.1 Selección de controlador para locomoción horizontal

El control de la locomoción horizontal se basa en el seguimiento del eslabón guía, es decir, que durante el desplazamiento del robot los eslabones adoptarán la orientación de su predecesor cuando se hayan desplazado a la posición del mismo hasta que el último eslabón se encuentre en la posición del eslabón guía.

Los servomotores **Sci** son los puntos de referencia de la orientación de los eslabones, como se muestra en la Figura 46. También se observa que la posición destino del eslabón guía siempre tenderá a ser colineal respecto al eje axial de su módulo (línea amarilla), para no perder la dirección del destino cuando se produce el reposicionamiento de los demás módulos.

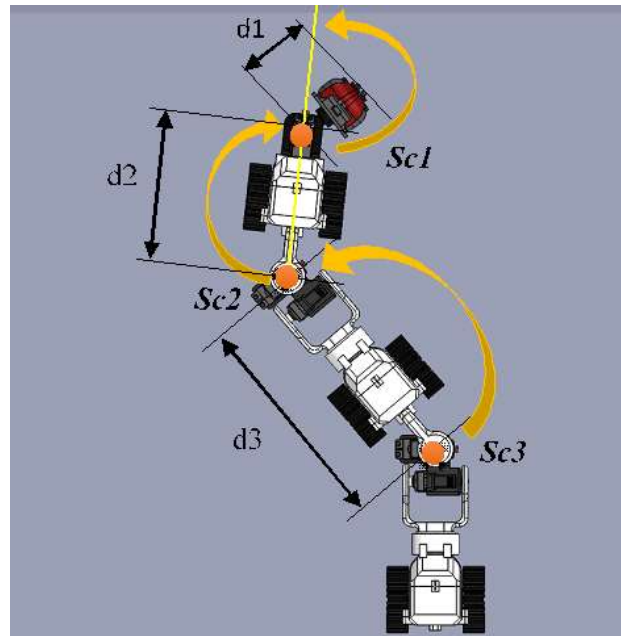


Figura 46. Variables de locomoción horizontal. $d1 = 7\text{cm}$, $d2 = 15\text{cm}$, $d3 = 24\text{cm}$

Es imprescindible relacionar las variables de distancia y la orientación de los servomotores, en tal virtud se establece:

- El servomotor **Sc1**, tiene la distancia **d1** para posicionarse en 90°
- El servomotor **Sc2**, tiene la distancia **d2** para posicionarse en la dirección del **Sc1** anterior.
- El servomotor **Sc3**, tiene la distancia **d3** para posicionarse en la dirección del **Sc2** anterior.

Con los enunciados anteriores se reitera la dependencia del posicionamiento de los servomotores **Sci** con las tres variables independientes relacionadas (El estado actual de la articulación – El estado de destino de la articulación – La distancia de desplazamiento).

En la Figura 47, se muestra la relación entre las variables independientes y la dependiente, en la que se toma como primer parámetro a la diferencia entre posiciones del estado actual y estado de

destino deseado. El segundo parámetro es la distancia entre los nodos d (puntos de localización de servomotores S_{ci}). La posición final del servomotor, es decir, la salida del controlador, es limitada por la distancia en la que tiene lugar la locomoción, puesto que el espacio en el que se desarrolla este cambio y ha de ser proporcional a la magnitud del mismo, esto se lo puede apreciar con las siguientes situaciones:

- Si la variación entre el estado actual y el de destino es de 180° , y la distancia de desplazamiento para efectuar este cambio es de 2 cm, la variación permitida para la posición final no puede ser los 180° .
- Por lo contrario, si la variación entre el estado actual y la de destino es 180° , y la distancia de desplazamiento para efectuar este cambio es de 20cm, la variación permitida para la posición final puede ser o acercarse a los 180° .

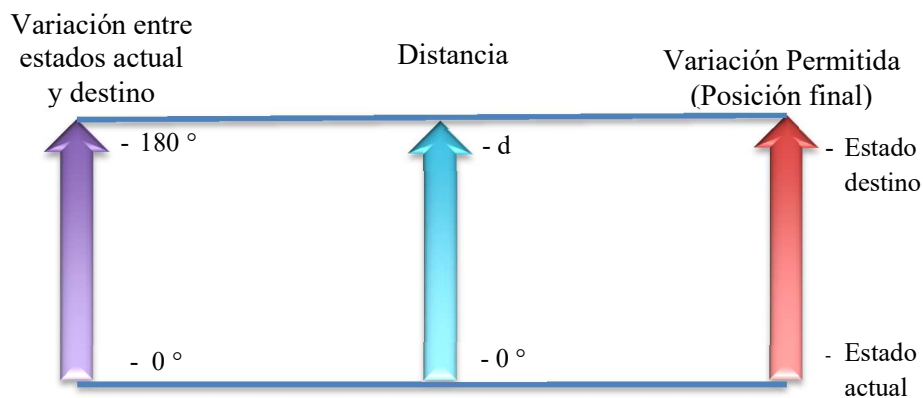


Figura 47. Esquema de relaciones entre variables del sistema de locomoción horizontal

Como es de esperar, los controladores clásicos no trabajan bajo criterios cualitativos, por lo que un PID es descartado. Por otro lado un sistema de control inteligente es aplicable para sistemas con un alto nivel de complejidad. Estos controles se los conoce como técnicas de inteligencia artificial, en los que se encuentran:

- Sistemas expertos
- Redes neuronales
- Algoritmos genéticos
- Lógica difusa.

El estudio de las técnicas mencionadas, es muy vasto dentro del área de Inteligencia artificial, por lo que se propone emplear el análisis por Ratio (2010), donde se definen las cualidades de cada una y sus aplicaciones. Ya que las variables pueden adquirir valores aleatorios, y que a su vez se encuentran contextualizados, es decir, se conoce los rangos y límites, el control que se adapta mejor a las necesidades planteadas, es el control difuso, por lo que se lo empleará en el control de la locomoción horizontal.

Es necesario resaltar que en base a los objetivos establecidos, el sistema de locomoción horizontal debe permitir la locomoción evitando colisiones, por lo que se requiere incorporar esta función al sistema de control de locomoción. En base al análisis de las técnicas de control para robots serpiente (Anexo A-2), en el cual se establece que el método de restricciones de conmutación se ajusta mejor a la necesidad de evitar colisiones con el cuerpo del robot, razón por la cual se lo incorporará al sistema de control de locomoción horizontal difuso, logrando optimizarlo y teniendo un control híbrido.

f.2 Selección de controlador para locomoción vertical

La locomoción vertical se basa en estados circunstanciales de posicionamiento para los servomotores *Sai*, lo que quiere decir que adoptarán posiciones determinadas por los siguientes casos:

- Posición de captura de imagen
- Oscilación de reposicionamiento

Por este motivo se emplea un controlador de tipo condicional sincronizado ya que ha de orientar a los servomotores *Sai* de acuerdo a la acción de los servomotores *Sci*.

f.3 Selección de controlador para locomoción torsional

La locomoción torsional tiene como objetivo mantener la estabilidad del robot durante la operación de la locomoción vertical, específicamente en la posición de captura. Como ya se mencionó, la variable de la posición del servomotor *Sc1*, es de la cual depende el comportamiento de los actuadores *Sbi*, los cuales permitirán la estabilidad de la cámara resguardando el equilibrio. Se resalta que para esta locomoción se emplearán criterios cualitativos de estabilidad en base a la observación de la locomoción, por lo que el controlador más idóneo a emplear es el difuso.

f.4 Selección de controlador para desplazamiento tangencial

El desplazamiento tangencial es el resultado de la acción de los motores *Mi*, en la que se debe establecer el estado del motor y la distancia a recorrer. Se ha de emplear el sensor encoder para determinar la distancia recorrida, sin embargo, no se va a emplear el error resultante como referencia de control, por lo tanto, el control será de tipo “todo o nada” o “On-Off”.

g. Diseño del Controlador

Para el diseño del controlador se emplea el software Matlab ya que incorpora herramientas para el diseño de sistemas de control. Además se presentan los los diagramas de flujo en los que se basa la programación del sistema de control en Python.

g.1 Control de locomoción horizontal

- Esquema del controlador

El controlador tiene dos entradas, las cuales son la variación de estados entre el actual y el deseado para los servomotores *Sci*, y la distancia de desplazamiento en la que tiene lugar el cambio de orientación de los mismos. Se tiene como salida del controlador difuso a la variación angular de reposicionamiento permisible para los servomotores, la misma que ha de ser evaluada en base a la proximidad de obstáculos provista por los sensores Sharp.

Ya que la definición de reglas es de carácter cualitativa, es decir, no se estructuran mediante funciones de entrada, el tipo de mecanismo de inferencia será por el método Mandani, criterio corroborado por López (2003) en su exposición “Tipos de sistemas de lógica difusa”.

Se tienen 3 controladores difusos para cada servomotor *Sci*, cuyo esquema del controlador se muestra la Figura 48.

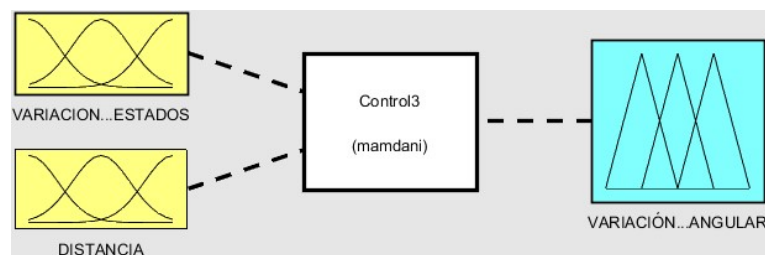


Figura 48. Esquema del controlador difuso locomoción horizontal para cada servomotor *Sci*.

- Definición de funciones de membresía

Los conjuntos borrosos definen a la variable de entrada y salida, es decir, se le asigna rangos en base a funciones de membresía y grados de pertenencia. Las funciones de membresía pueden ser de varios tipos como la triangular, la trapezoidal, la sigmoide, singleton, entre otras. Dado que las

variaciones no serán completamente definidas bajo un valor de inflexión, y en base al análisis de los conjuntos borrosos por Rodríguez Segura & Daza Barzola (2016), se opta por conjuntos trapezoidales.

El universo de la variable de entrada “Variación de Estados”, está comprendido entre $[1^\circ-180^\circ]$, bajo 5 funciones de membresía trapezoidales con la designación $\{v1, v2, v3, v4, v5\}$, como se muestra en la Figura 49.

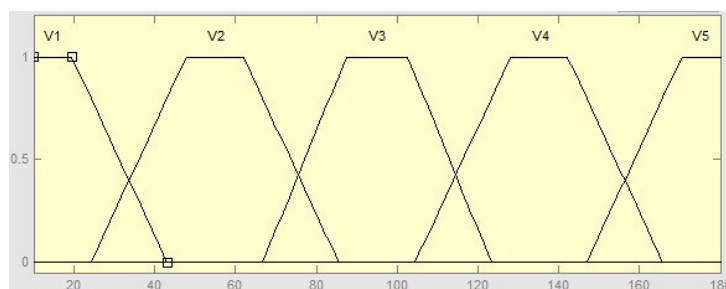


Figura 49. Definición de conjuntos borrosos locomoción horizontal, variable estados

Para la variable de entrada “Distancia”, se establece 4 funciones de membresía de tipo trapezoidal con la designación $\{D1, D2, D3, D4\}$, las cuales establecen los rangos de distancia en las que se produce la variación de posición. Los rangos de su universo varía dependiendo de la distancia d_i de los eslabones relacionados con cada servomotor. Así el universo comprendido para el servomotor Sc1, es de $[0-7]$ cm, para el servomotor Sc2, es de $[0-15]$ cm y para el servomotor Sc3, $[0-24]$ cm, como se muestra en la Figura 50.

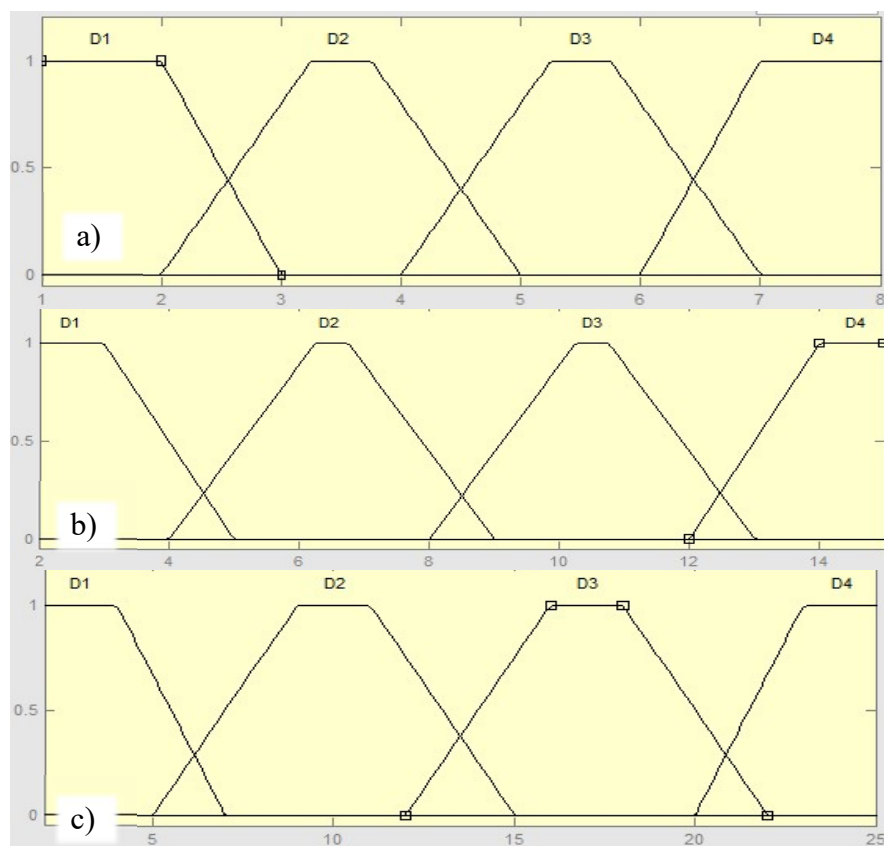


Figura 50. Definición de conjuntos borrosos locomoción horizontal, variable distancia para servomotores: a) Sc1, b) Sc2 y c) Sc3.

Para la variable de salida “Variación Angular Permitida”, su universo está comprendido entre $[1^\circ-180^\circ]$ y se establecen a 5 funciones de membresía trapezoidales con la designación $\{O1, O2, O3, O4, O5\}$ como se muestra en la Figura 51.

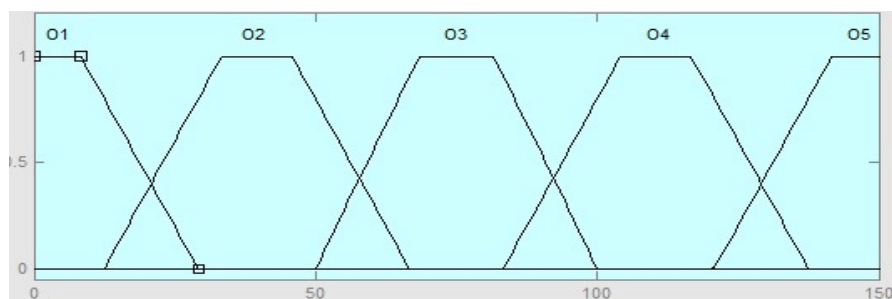


Figura 51. Definición de conjuntos borrosos, variable variación angular permitida

- Definición de reglas

Las reglas son de tipo condicional “Si, entonces”, y definen el comportamiento del control basándose en la relación de los conjuntos borrosos de las variables de entrada y de salida.

Las reglas son definidas en base a la experiencia del diseñador, las cuales se pueden asociar en una matriz de asociación borrosa, más conocida como FAM, como se indica en la Tabla 21.

Tabla 21.

Matriz de asociación borrosa para controlador difuso de locomoción horizontal.

| | O1 | O2 | O3 | O4 | O5 |
|----|----|----|----|----|----|
| | | | D1 | | |
| V1 | + | - | - | - | - |
| V2 | + | - | - | - | - |
| V3 | + | + | - | - | - |
| V4 | - | + | - | - | - |
| V5 | - | + | + | - | - |
| | | | D2 | | |
| V1 | + | - | - | - | - |
| V2 | + | + | - | - | - |
| V3 | - | + | - | - | - |
| V4 | - | + | + | - | - |
| V5 | - | - | + | - | - |
| | | | D3 | | |
| V1 | + | - | - | - | - |
| V2 | + | + | - | - | - |
| V3 | - | + | - | - | - |
| V4 | - | - | + | - | - |
| V5 | - | - | - | + | - |
| | | | D4 | | |
| V1 | + | - | - | - | - |
| V2 | - | + | - | - | - |
| V3 | - | - | + | - | - |
| V4 | - | - | - | + | - |
| V5 | - | - | - | - | + |

Los signos + y -, representan la relación entre los parámetros, definiendo así las reglas del controlador y dado que se incorporan solo las reglas positivas, se tienen 25 reglas para cada controlador difuso de los servomotores *Sci*.

- Resultados

En la Figura 52, se muestra las superficies de operación del controlador difuso para los servomotores Sc1, Sc2 y Sc3. Se aprecia la intervención del controlador en todo el universo de las variables, por lo que no existen zonas inestables.

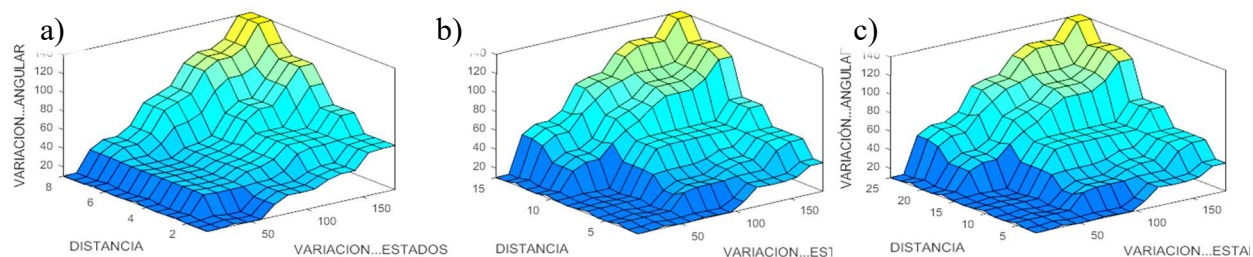


Figura 52. Superficies de control de controlador difuso: a) Sc1, b) Sc2 y c) Sc3.

En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos del controlador tanto en matlab como en Python, ya que es aquí donde se comandará al robot. Las variaciones obtenidas varían entre 0.3° y 1.84° , por lo que se consideran despreciables y se acepta el controlador dispuesto en Python.


Tabla 22.

Resultados de controlador difuso para los actuadores Sci

| Variación Estados | Distancia [1-8]cm | Variación angular Permissible [$^\circ$] | |
|------------------------|-------------------|--|--------|
| | | Matlab | Python |
| Controlador difuso Sc1 | | | |
| 30 | 1 | 11.6 | 11.45 |
| | 5 | 25.4 | 25.37 |
| | 7 | 30.6 | 30.87 |
| 60 | 1 | 9.94 | 9.78 |

CONTINÚA

| | | | |
|------------------------|----|-------|--------|
| | 5 | 30.3 | 29.89 |
| | 7 | 53.9 | 54.12 |
| 90 | 1 | 9.90 | 9.74 |
| | 5 | 56.6 | 55.97 |
| | 7 | 91.1 | 90.86 |
| 120 | 1 | 30.2 | 31.26 |
| | 5 | 56.8 | 57.22 |
| | 7 | 99.7 | 98.75 |
| 150 | 1 | 30.3 | 31.75 |
| | 5 | 56.4 | 55.63 |
| | 7 | 120.2 | 119.89 |
| 180 | 1 | 39.6 | 38.74 |
| | 5 | 75.1 | 74.86 |
| | 7 | 140.2 | 139.96 |
| Controlador difuso Sc2 | | | |
| 30 | 3 | 11.6 | 11.27 |
| | 7 | 12.8 | 12.35 |
| | 15 | 40.2 | 39.86 |
| 60 | 3 | 9.94 | 9.75 |
| | 7 | 12.8 | 12.20 |
| | 15 | 56.8 | 56.45 |
| 90 | 3 | 9.94 | 9.87 |
| | 7 | 55.3 | 54.95 |
| | 15 | 93.2 | 92.97 |
| 120 | 3 | 30.1 | 29.99 |
| | 7 | 55.3 | 55.12 |
| | 15 | 114.1 | 113.86 |
| 150 | 3 | 30.2 | 30.12 |
| | 7 | 56.4 | 55.86 |
| | 15 | 120.1 | 120.75 |
| 180 | 3 | 39.6 | 41.27 |
| | 7 | 70.6 | 71.20 |
| | 15 | 140.3 | 141.5 |
| Controlador difuso Sc3 | | | |
| 30 | 5 | 12.6 | 12.11 |
| | 17 | 28.6 | 27.53 |
| | 24 | 40.2 | 41.14 |
| 60 | 5 | 12.6 | 12.22 |
| | 17 | 39.6 | 39.47 |
| | 24 | 56.8 | 55.76 |
| 90 | 5 | 27.3 | 26.86 |
| | 17 | 75.1 | 75.98 |
| | 24 | 93.2 | 94.35 |

CONTINÚA 

| | | | |
|-----|----|-------|--------|
| 120 | 5 | 31.3 | 32.48 |
| | 17 | 93.5 | 94.53 |
| | 24 | 114.2 | 114.98 |
| 150 | 5 | 40.1 | 39.27 |
| | 17 | 96.6 | 98.11 |
| | 24 | 120.3 | 122.14 |
| 180 | 5 | 51.1 | 52.36 |
| | 17 | 119.3 | 121.52 |
| | 24 | 140.2 | 141.42 |

Ahora, los controladores difusos de los actuadores *Sci* se deben sincronizar para controlar la locomoción total, teniendo en cuenta que la referencia o estado de destino siempre será el estado actual del servomotor predecesor, como se muestra en la Figura 53.

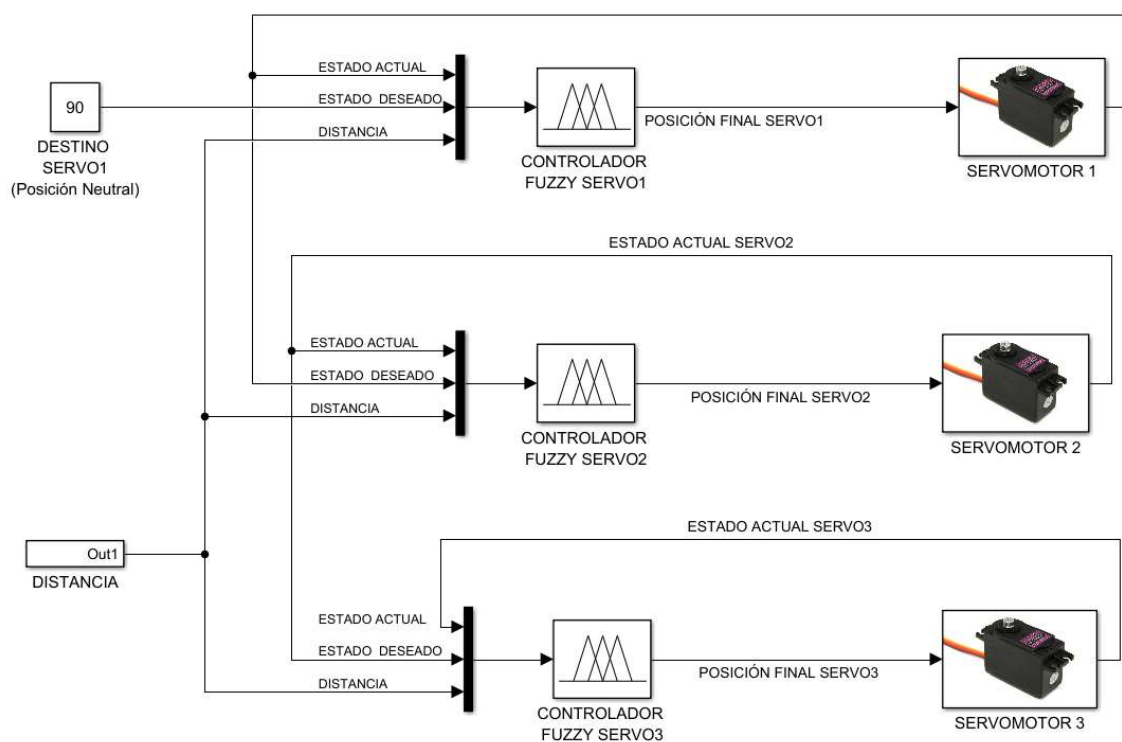


Figura 53. Esquema del sistema de control sin restricción lateral.

Si bien el controlador expuesto en la Figura 54, ya es operativo y cumple con el seguimiento del eslabón guía, se estableció durante la selección del controlador que se ha de incorporar el método de restricciones de conmutación para la restricción lateral de locomoción. Dado el análisis correspondiente a éste método (Anexo A-3), se emplea la lectura de distancias laterales al cuerpo para condicionar la locomoción, en base a sensores de rango, los cuales son reemplazados por sensores Sharp, teniendo como resultado el sistema de control mostrado en la Figura, donde se aprecia el condicionamiento de la salida del controlador difuso en base a la lectura de distancias por los sensores laterales Sharp, los cuales permiten la modificación de orientación siempre y cuando no haya peligro de colisión.

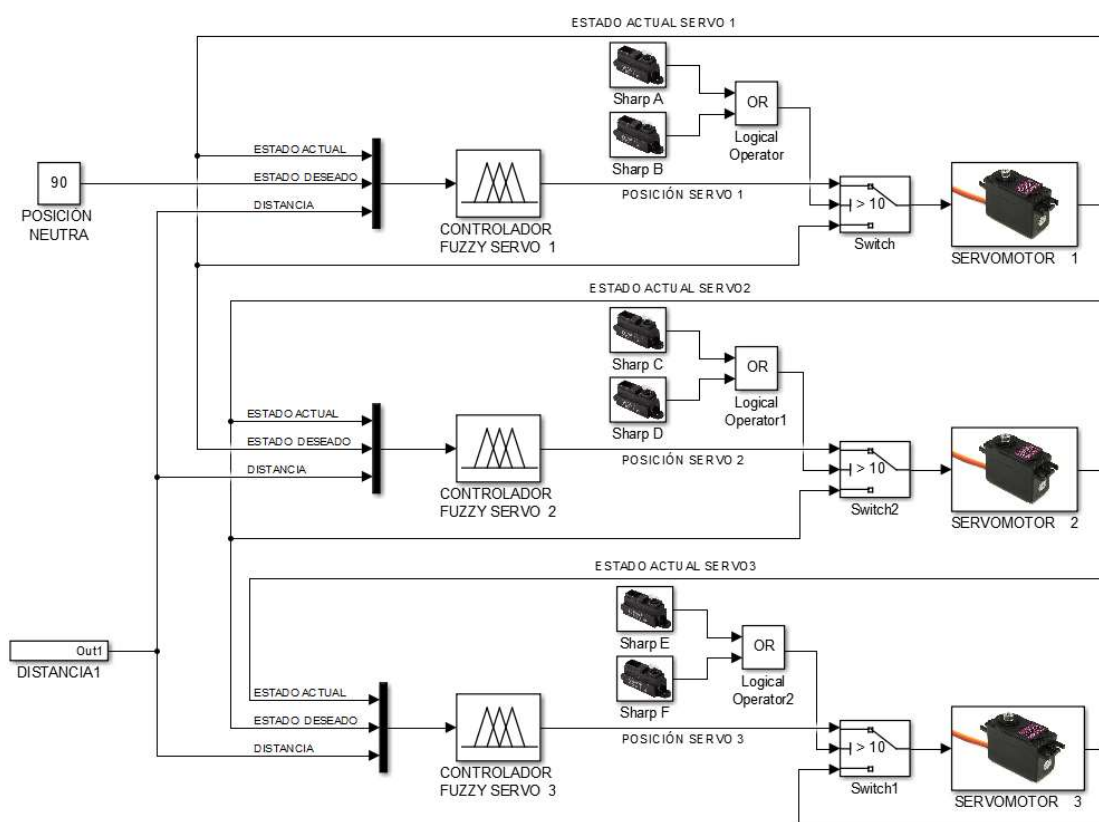


Figura 54. Esquema del sistema de control con control de colisiones

g.2 Control de locomoción Vertical

- Posición de captura de imagen

El análisis de la detección de obstáculos por visión artificial es en dos dimensiones, ya que no toma la variable de profundidad. Por este motivo se debe emplear imágenes que permitan la correcta identificación de obstáculos, lo cual depende de la postura que adopte el robot para la captura de imágenes.

En el caso de una postura horizontal, la cámara amplía su rango de detección, identificando todos los objetos que se encuentren al horizonte, como se muestra en la Figura 55. En consecuencia se detectarán a todos los objetos que se encuentren frente al robot puesto que se desconoce la distancia a la que se encuentran y por énde se descartará la dirección pese a que los obstáculos puedan estar lo suficientemente alejados para permitir el desplazamiento del robot.

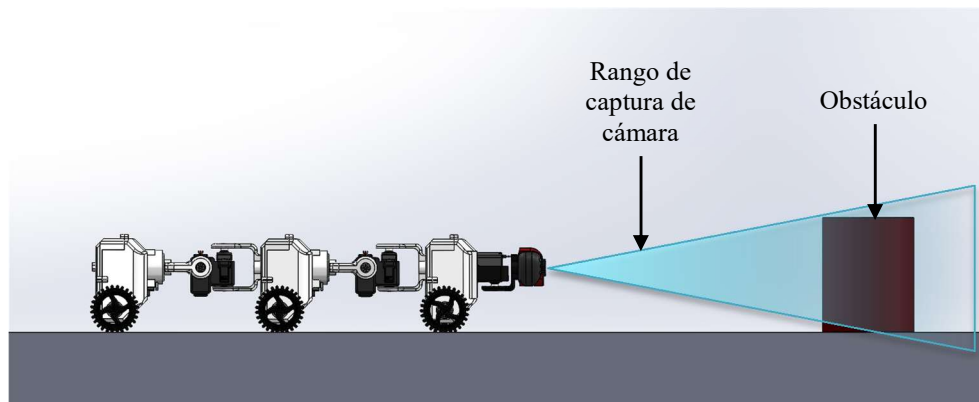


Figura 55. Rango de captura de imagen en posición horizontal

Sin embargo, si el análisis se lo realiza sobre el área más próxima al robot, como se muestra en la Figura 56, el análisis tendrá los resultados esperados, ya que se identificará la presencia del obstáculo en un área conocida.

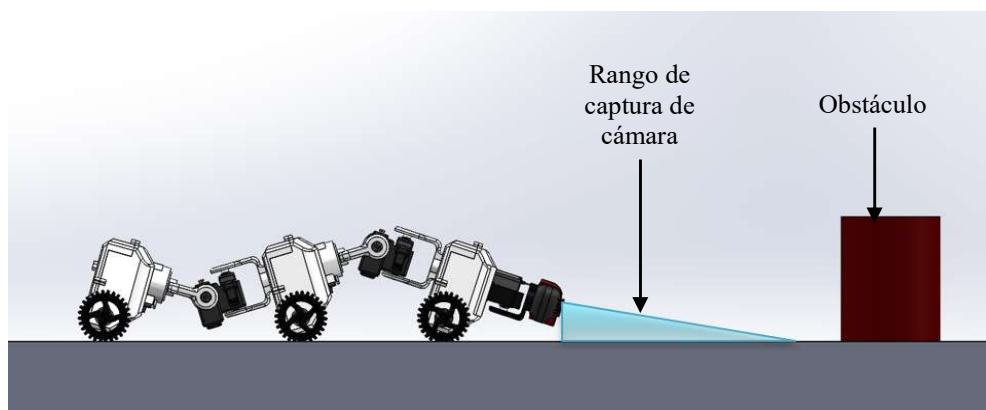


Figura 56. Rango de captura de imagen en posición de captura

Para adaptar la postura de captura, se debe inclinar al robot como se muestra en la Figura 57, donde el ángulo $\Phi = 30^\circ$ y es el mismo para los servomotores **Sa1** y **Sa2**, independientemente de la posición de los otros servomotores.

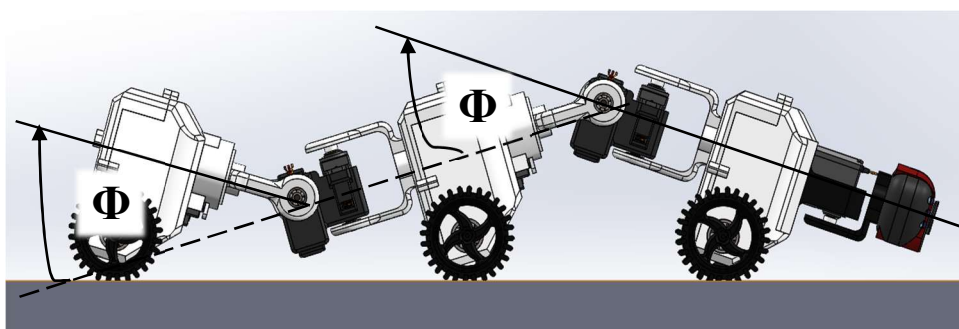


Figura 57. Orientación de servomotores **Sa_i** en posición de captura

- Oscilación de reposicionamiento

Durante el reposicionamiento de los módulos por la locomoción horizontal, se debe efectuar una oscilación que permita el desplazamiento de los módulos evitando colisiones. Esta oscilación tiene que ir sincronizada al cambio de posición de los servomotores **Sci**, como se muestra en la Figura 58.

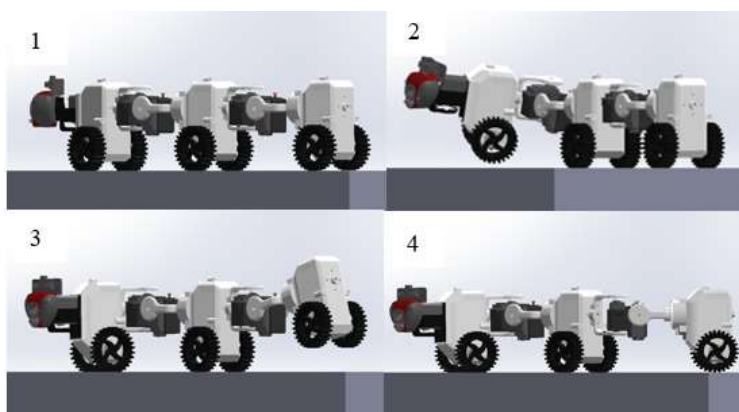


Figura 58. Secuencia de oscilación de reposicionamiento

La oscilación de los servomotores Sa_i se produce al detectarse un cambio en la posición de los servomotores Sc_i , en la que se eleva al módulo hasta que termina su reposicionamiento. La metodología de control de esta locomoción se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 59.

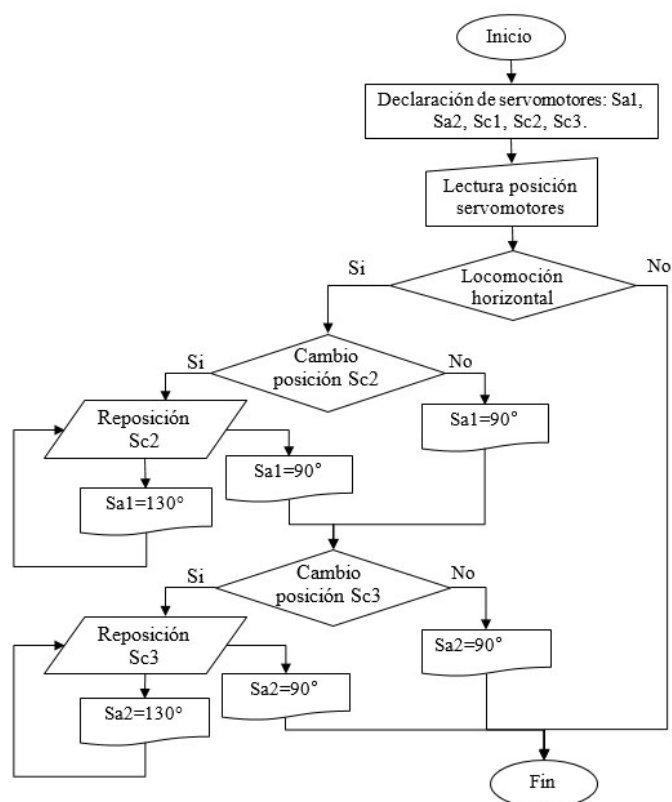


Figura 59. Diagrama de flujo del control de oscilación de reposicionamiento

g.3 Control de locomoción Torsional

El control torsional estabiliza la orientación de la cámara durante la captura panorámica de las imágenes, ya que al rotar la cámara aparece un efecto de inclinación y la imagen no es completamente horizontal, como se muestra en la parte b) de la Figura 60; produciendo un rango mayor de captura de imagen y por ende error en la identificación de obstáculos. Al emplear la locomoción torsional se corrige el efecto de inclinación como se muestra en la parte c), obteniendo una captura adecuada para el análisis, la cual es similar a la captura ideal con orientación horizontal como se muestra en la parte a).

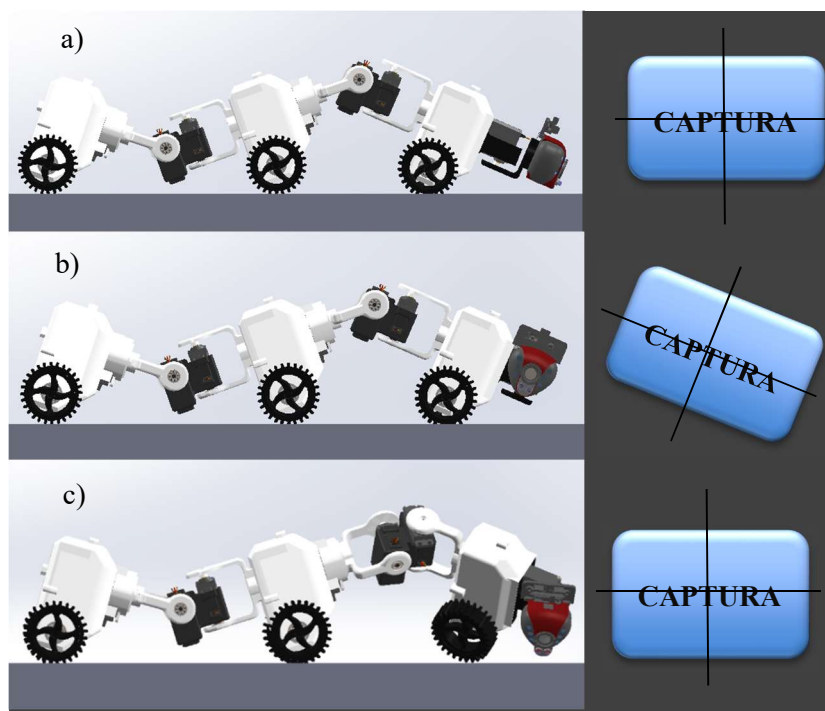


Figura 60. Estabilización de orientación de captura por locomoción torsional

La torsión se basa en la acción del servomotor *Sb1*, como se muestra en la Figura 61, la cual ha de tener el mismo sentido de giro que el servomotor *Sc1*, que es el que rota la cámara, pero no

deben de rotar bajo el mismo ángulo ya que la torsión no delimitada puede voltear al módulo y ocasionar un choque o avería.

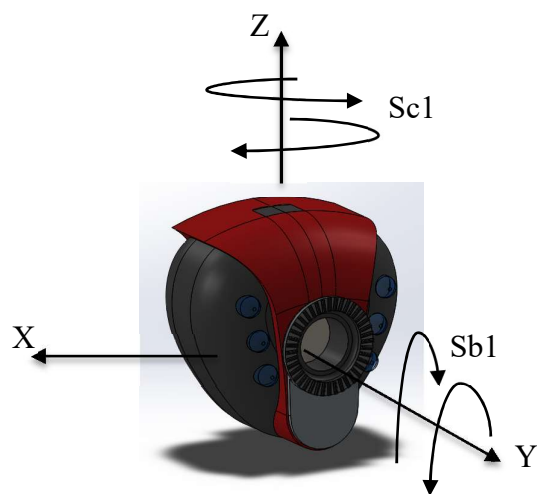


Figura 61. Direccionamiento de servomotores captura de imagen

- Esquema del controlador

Se emplea un controlador difuso tipo Mamdani de una entrada y una salida, las cuales son la posición del servomotor *Sc1* y la del servomotor *Sb1*, como se muestra en la Figura 62.

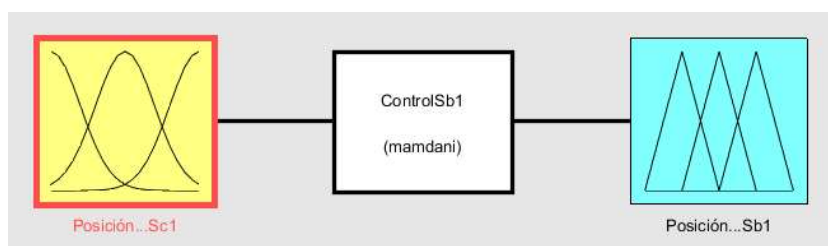


Figura 62. Esquema del controlador difuso para control de locomoción torsional

- Definición de funciones de membresía

Se emplean tres funciones de tipo triangular con la designación {Derecha, Central, Izquierda} como se muestra en la Figura 63. Se emplean funciones triangulares ya que la posición neutral de

90° indica una captura completamente horizontal, es decir, una pertenencia total. A la vez el universo esta comprendido entre [0°-180°], que son los rangos de rotación permisibles para la captura panorámica.

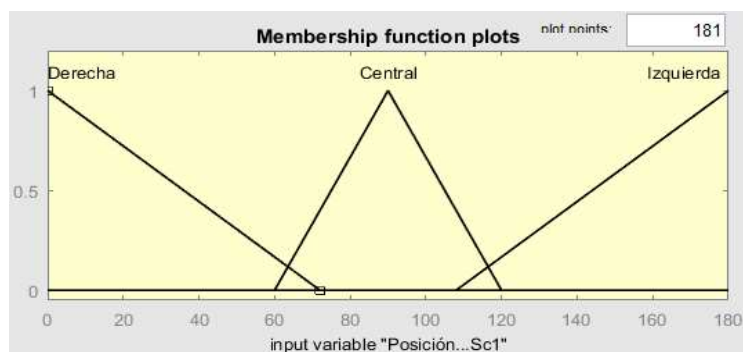


Figura 63. Funciones de membresía de variable de orientación de la cámara “Posición Sc1”.

Para la variable de salida del ángulo de torsión, “Posición Sb1”, su universo se establece entre [45°-135°] y con 3 funciones de membresía triangulares con la designación {Derecha, Central, Izquierda} como se muestra en la Figura 64.

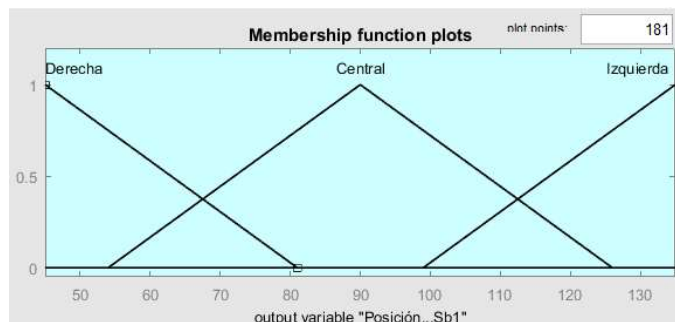


Figura 64. Definición de conjuntos borrosos en variable de salida para posición de Sb1

- Definición de reglas

En la Tabla 23, se establecen las reglas del controlador difuso mediante la matriz de asociación borrosa en la cual se emplea los signos + y – para representar la relación entre los parámetros, por lo que se tienen 3 reglas.

Tabla 23.

Matriz de asociación borrosa para controlador difuso de locomoción torsional.

| Sb1 Sc1 | Torsión Derecha | Torsión Centro | Torsión Izquierda |
|--------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| Captura Derecha | + | - | - |
| Captura centro | - | + | - |
| Captura Izquierda | - | - | + |

- Resultados

La operación del control difuso en la locomoción torsional, se observa en la curva de la Figura 65.

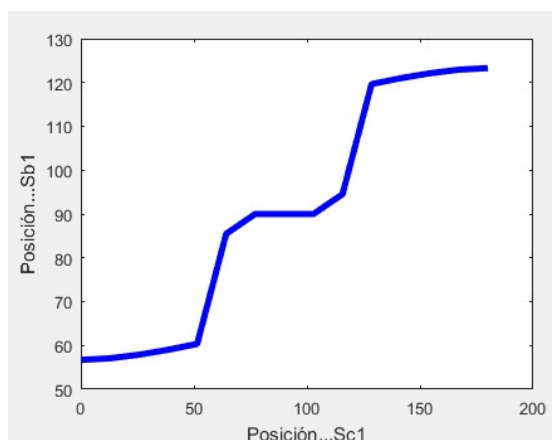


Figura 65. Curva de control del controlador fuzzy de locomoción torsional

En la Tabla 24, se exhiben los resultados del controlador difuso obtenidos desde Matlab y en Python, identificando una variación entre $0.1-0.3^\circ$ entre los mismos, la cual es aceptable.

Tabla 24.

Resultados del controlador fuzzy de locomoción torsional

| Posición Sc1 | Posición Sb1 | |
|--------------|--------------|--------|
| | Matlab | Python |
| 0 | 53 | 52.89 |
| 15 | 53.5 | 53.45 |
| 30 | 54.7 | 54.56 |

CONTINÚA 

| | | |
|-----|--------|--------|
| 45 | 56.3 | 56.4 |
| 60 | 77.2 | 77.32 |
| 75 | 80.5 | 80.12 |
| 90 | 90 | 90 |
| 105 | 100.26 | 100.34 |
| 120 | 107.26 | 107.56 |
| 135 | 124.54 | 124.67 |
| 150 | 125.12 | 125.20 |
| 165 | 126.48 | 126.78 |
| 180 | 127.26 | 127.43 |

g.4 Desplazamiento Tangencial

El control de desplazamiento es de tipo On-Off, cuyo diagrama de flujo de la programación se muestra en la Figura 66.

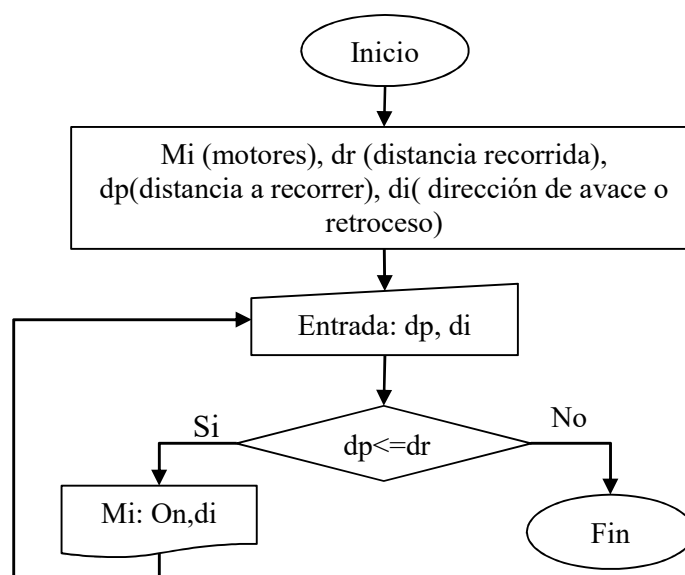


Figura 66. Diagrama de flujo del control “todo-nada” para el desplazamiento

4.2.5 Sistema de Visión Artificial

El sistema de visión artificial permite:

- Identificar objetos

- Determinar la dirección libre de obstáculos de forma panorámica

Para ello se realizan 4 capturas de forma panorámica mediante la rotación de la cámara alrededor del eje z, por acción del actuador Sc1, como muestra la Figura 67. Posteriormente se analizan las imágenes detectando obstáculos y con ello las direcciones libres y obstruidas. Finalmente se agrupan los resultados y se determina la dirección de desplazamiento más óptima de acuerdo a la zona de seguridad del robot para evitar colisiones.

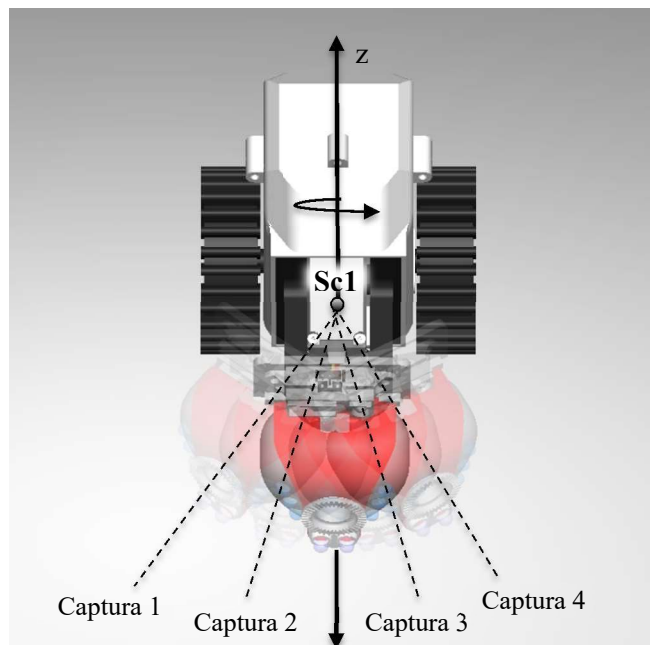


Figura 67. Captura panorámica

a. Procesamiento de Imágenes

En análisis empleado es por espacios de color (seleccionado en el Capítulo II), con el cual se busca identificar obstáculos en la trayectoria. A continuación se muestran las etapas empleadas en el análisis de visión artificial, para efecto se emplea una imagen con varios colores ya que se desea el mayor rango de detección posible.

- Captura imagen

Cada imagen capturada se establece en formato RGB, como se muestra en la Figura 68.



Figura 68. Captura de imagen

- Transformación HSV

Se emplea la función `cv2.cvtColor-cv2.COLOR_BGR2HSV`, como se indica en la Figura 69.



Figura 69. Conversión HSV

- Separación por capas *Hue - Saturation - Value*

Se separan las capas para poder analizarlas individualmente, como se muestra en la Figura 70, mediante la función `cv2.split`

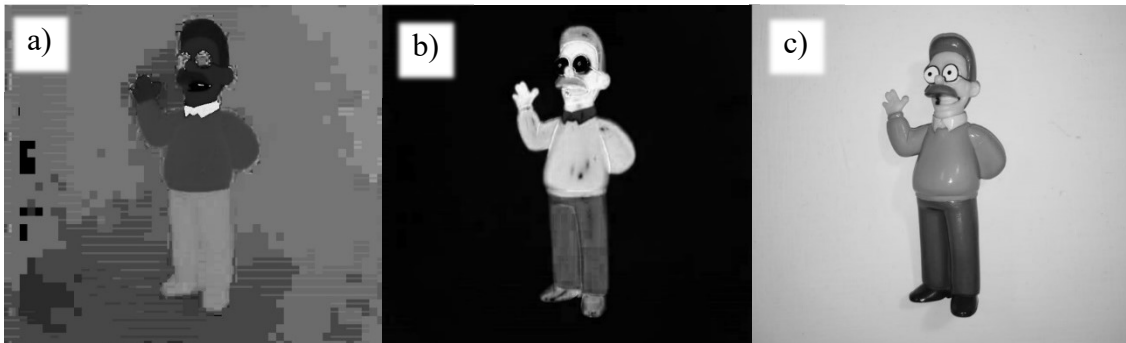


Figura 70. Separación por capas H-S-V: a) capa *hue*, b) capa *saturation* y c) capa *value*

- Filtros por capas

Dado que se pretende identificar a objetos de cualquier color, no se puede delimitar filtrando información por la capa *Hue* o de matiz de color, ya que se excluiría del análisis a objetos de determinado color. Por otro lado, al filtrar por la capa saturación, la cual representa intensidad de color, permite la detección de objetos en una amplia gama de matiz de color. Para ello se toma el rango de [100 – 255] aplicando la función *cv2.threshold - cv2.THRESH_BINARY*.

También debe de parametrizar el factor de luminosidad que es la propiedad de los cuerpos de reflejar la luz, puesto que el robot cambiará de posición y por ende ha de variar la disposición de luz. Para el efecto se emplea un filtro por la capa brillo o *value* en los rangos de [100-200], puesto que no se desea identificar a la superficie del entorno la cual es de color negro y evitar las partículas de ruido por efecto del reflejo de la luz. Se aplica la función *cv2.threshold - cv2.THRESH_BINARY*.

En la Figura 71, se muestran los rangos de los espacios de color empleados en los filtros tanto para la capa de saturación como para la de brillo.

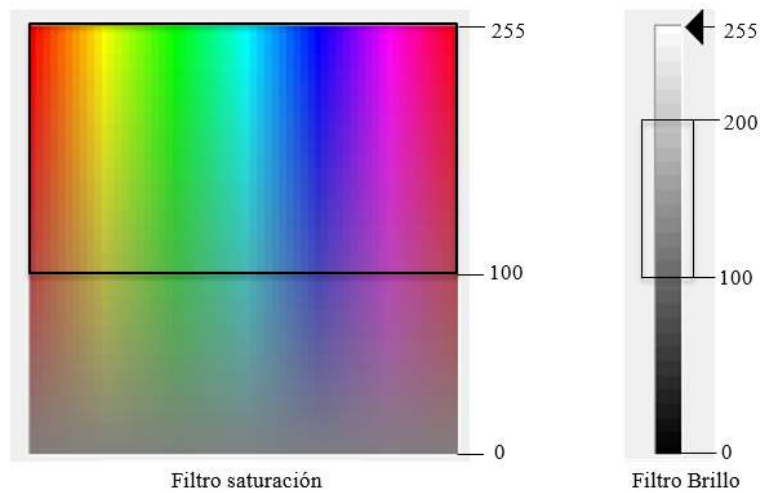


Figura 71. Rangos de espacios de color por capas saturación y brillo.

Finalmente se unen los filtros tanto de la capa saturación como de brillo, como se muestra en la Figura 72.

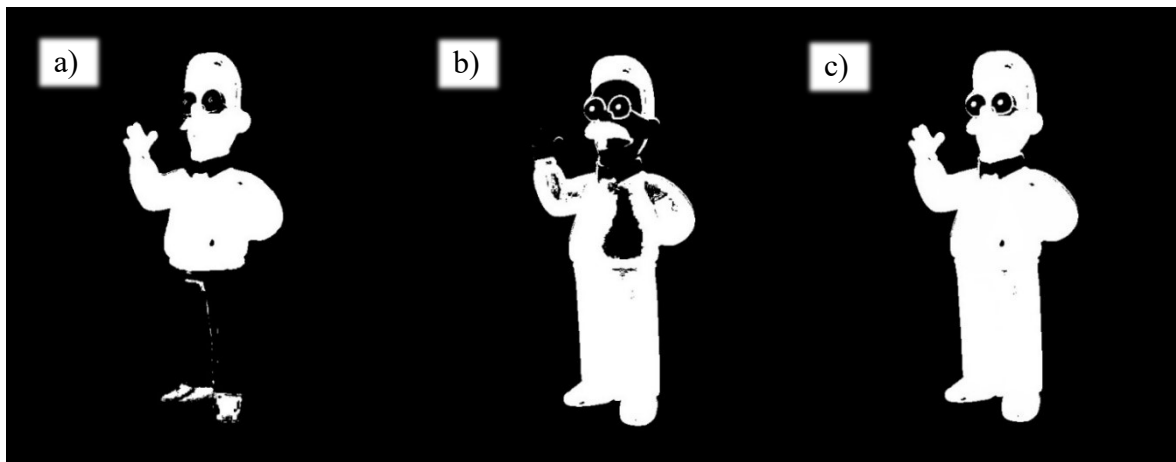


Figura 72. Filtros por espacios de color: a) filtro por saturación, b) filtro de brillo y c) unión de filtros.

- Identificación de obstáculos

Se aplica una sustracción del objeto detectado de la imagen original, como se muestra en la Figura 73, mediante la función `cv2.bitwise_and`



Figura 73. Extracción de objeto

- Localización de obstáculos

Se divide la imagen en secciones para la localización del objeto y tener una referencia en el espacio, optimizando así tiempo de procesamiento puesto que se determina el porcentaje de obstrucción por sección y se etiqueta a las mismas como libres u obstruidas, teniendo menor cantidad de pixeles por analizar. Primero se divide la imagen en 15 secciones verticales (cantidad con mejor desempeño para el análisis), como se muestra en la Figura 74.

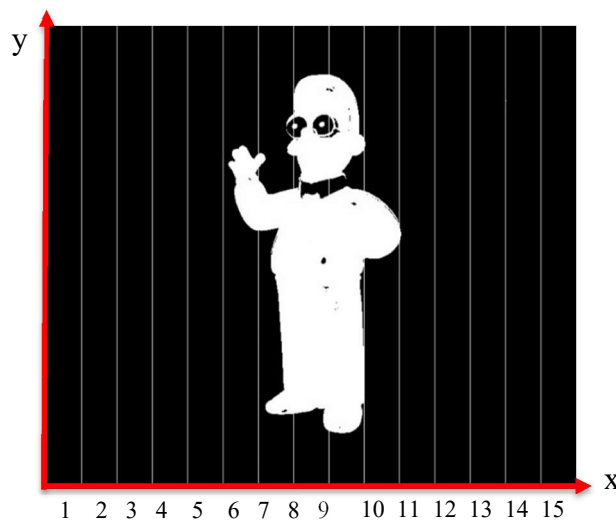


Figura 74. Segmentación de imagen.

Las secciones se dividen de forma vertical y no horizontal, puesto que al representar una dirección de trayectoria no importa la posición del objeto respecto al eje Y, ya que la dirección se marca por la disponibilidad de espacio en el eje X.

El número de divisiones establece la exactitud de la localización del objeto, es decir, que la resolución de la detección espacial del obstáculo depende del número de divisiones con el que se analice la imagen, considerando que a mayor número de secciones, mayor será el tiempo de procesamiento.

Se establece el 8% como porcentaje de obstrucción para determinar la disponibilidad de las secciones.

b. Determinación de dirección de desplazamiento.

- Agrupación panorámica

Una vez realizado el análisis de las imágenes individuales, se procede a agrupar los resultados de forma panorámica para obtener una dirección de desplazamiento. Como ejemplo se tiene la secuencia de capturas de la Figura 75.



Figura 75. Secuencia de capturas de imágenes

Sobre la secuencia de capturas se realiza el análisis de espacios de color por cada imagen, como se muestra en la Figura 76.

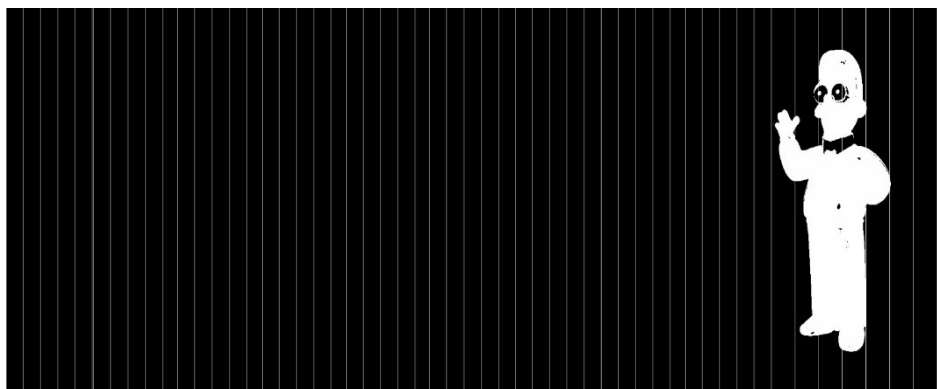


Figura 76. Secuencia de resultados de análisis de detección de objetos

Posteriormente se agrupan los resultados en una misma imagen, convergiendo cada sección al punto de la posición inicial de la cámara, puesto que es a la cual debe desplazarse el robot, la cual se representa por una línea amarilla en la Figura 77. Adicionalmente las secciones obstruidas se representan por la región sobreada.

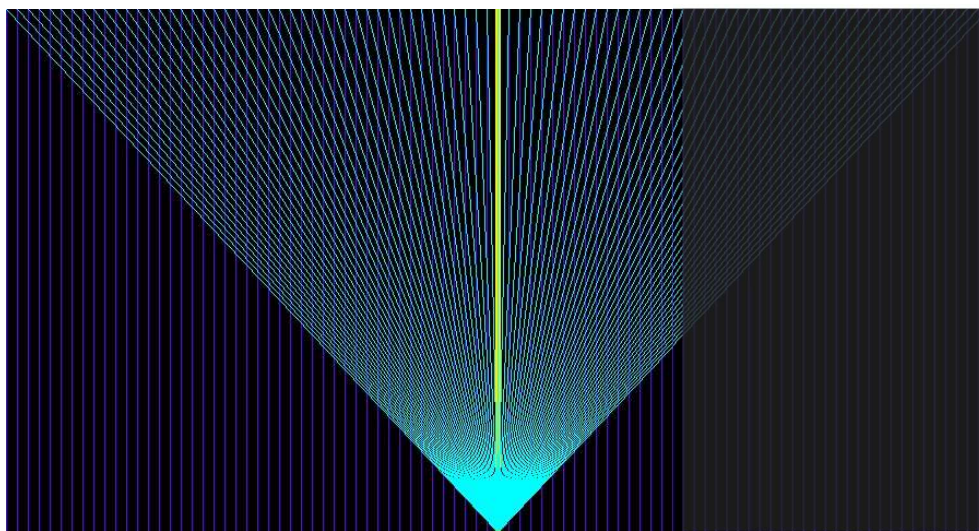


Figura 77. Agrupación panorámica de resultados

Para determinar la dirección de desplazamiento se considera que el robot requiere de al menos 14 secciones libres para poder desplazarse, valor establecido por experimentación. También se considera que la dirección tiene que ser la más cercana a la deseada, es decir, a la línea amarilla.

Integrando los dos criterios para establecer la dirección, se tiene como resultado una zona de direcciones libres, representado por la región azul en la Figura 78, y la dirección de desplazamiento calculada, representa por la línea roja. Se observa que el área despejada es considerablemente grande, de 62 secciones, no obstante, el algoritmo determina la dirección más cercana a la deseada, resguardando el área de seguridad del robot, donde siempre preferirá un área mayor pero más próxima al destino.

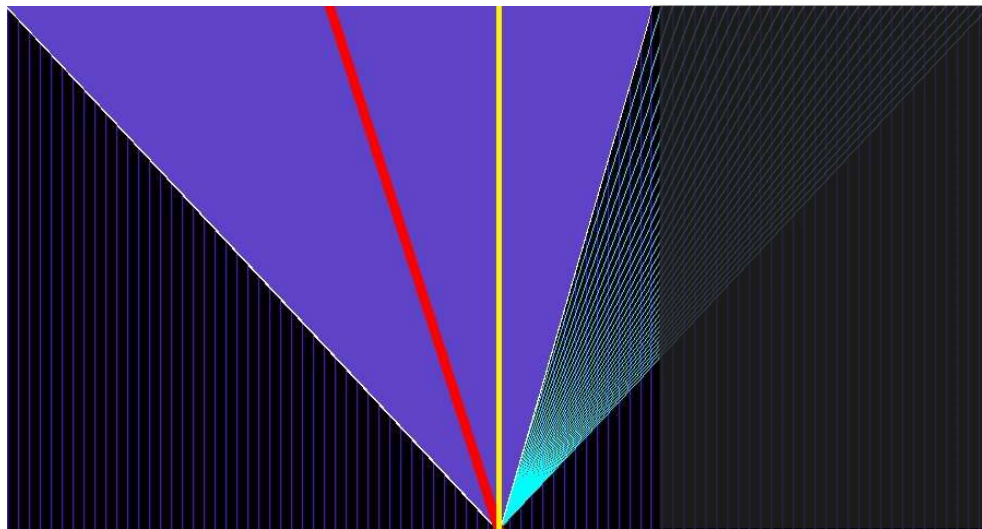


Figura 78. Análisis de direcciones libres en agrupación panorámica

c. Esquema del sistema de visión artificial

El proceso se resume en el esquema de la Figura 79.

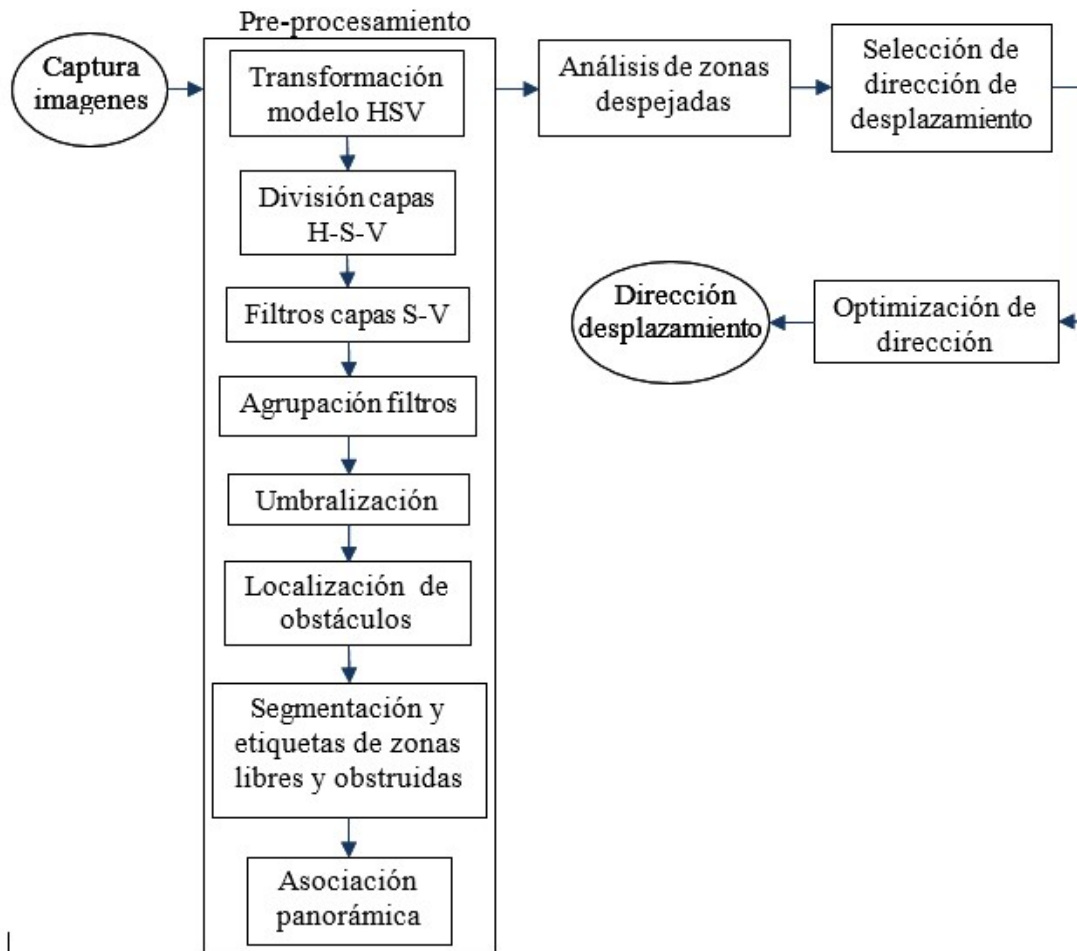


Figura 79. Esquema de procesamiento de sistema de visión artificial

4.2.6 Sistema de Control de Trayectoria

Una vez que el sistema de visión artificial determina la dirección de desplazamiento se pueden presentar dos condiciones, las cuales son:

- La dirección es la misma que la dirección de destino (seleccionada por el operador), como se muestra en la sección a) de la Figura 80.
- La dirección fue alterada por presencia de obstáculos en la dirección de destino, como lo muestra la sección b).

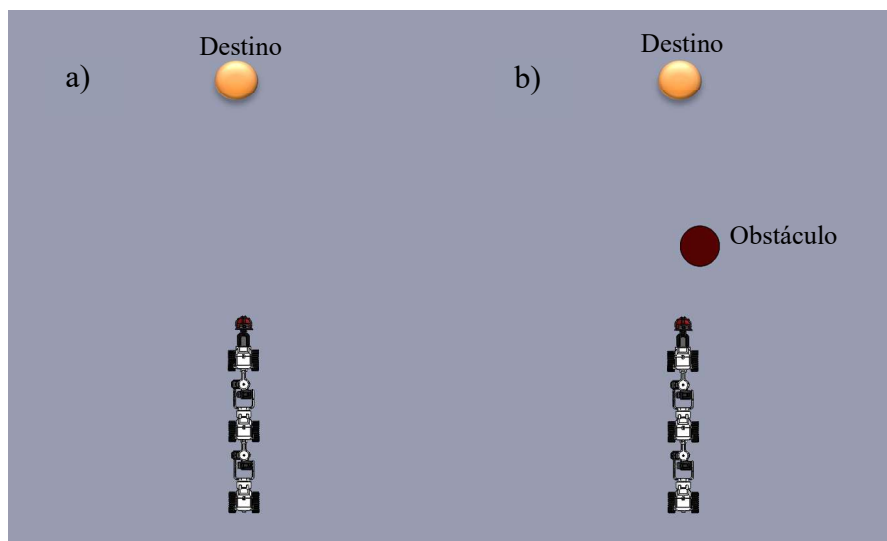


Figura 80. Condiciones de análisis en la trayectoria del robot

Si se considera a la segunda situación, donde el robot se desplaza en la dirección establecida por el sistema de visión artificial para evadir al obstáculo, se tiene que reajustar la nueva dirección de desplazamiento con el objetivo de retomar la dirección que el operador estableció inicialmente, de forma que al controlar los desplazamientos parciales se controla la trayectoria del robot, como se muestra en la Figura 81.

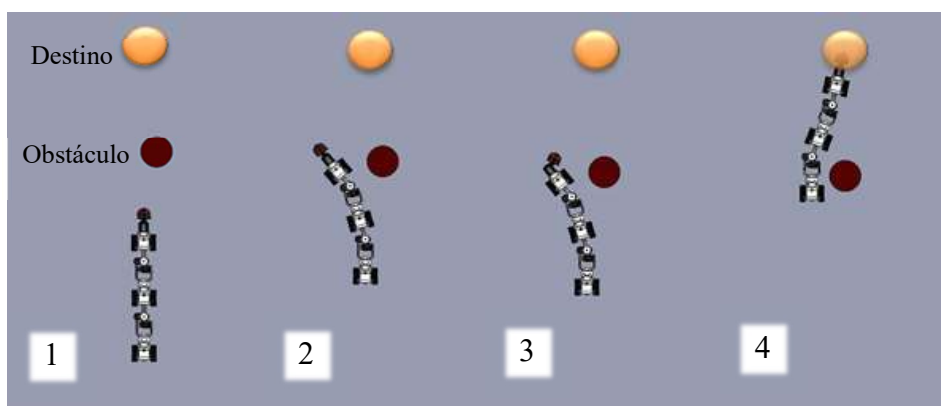


Figura 81. Secuencia de funcionamiento del control de la trayectoria

Para corregir la desviación en la dirección, se emplea un análisis por cinemática inversa, dado que se conoce el valor de las coordenadas de posición y se determina las posiciones articulares del robot. (ISA, 2017).

Al tratarse de un robot móvil sin retroalimentación de su posición absoluta en el entorno (lo cual quiere decir que su sistema de referencia es relativo) y que el sistema de locomoción posiciona al robot en la dirección del eslabón guía el cual es el que sostiene la cámara; la corrección de la dirección se ha de enfocar en éste.

El análisis se sintetiza a tres puntos en el espacio, los cuales son:

- El punto de partida del desplazamiento
- El punto destino deseado
- El punto alcanzado

En la Figura 82, se representa la posición del extremo del robot, es decir, del eslabón guía. El punto A, representa el origen del desplazamiento, el punto B es el punto de desplazamiento alcanzado por el robot, resultado de una dirección dada por el sistema de visión artificial, con el cual indica que existe un obstáculo entre el punto de partida y el punto de destino deseado por el operador, punto C.

El ángulo α , representa la desviación respecto a la dirección original, el ángulo β es aquel que reorienta nuevamente al robot en la dirección del destino original. Por el contrario el ángulo γ es el valor que toma el servomotor que redirecciona el eslabón guía que en el punto B se encuentra en la dirección del eje de la Cámara. Al redireccionar el eslabón guía en el ángulo γ se corrige proporcional la desviación en la dirección por la presencia de obstáculos.

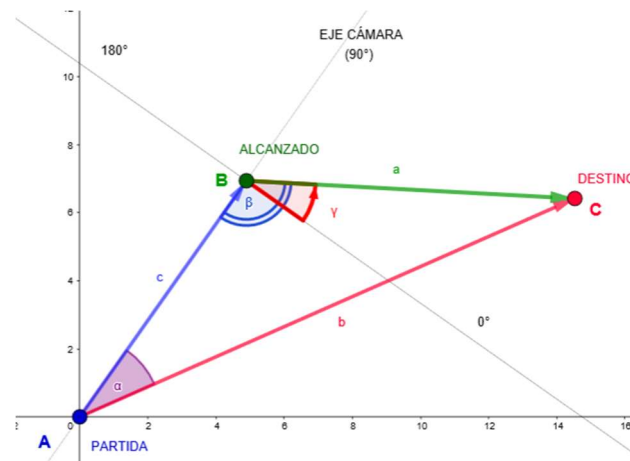


Figura 82. Análisis de direccionamiento de objetivo

Para determinar el ángulo γ se debe determinar primero el ángulo β y el valor “a” (la distancia entre el punto alcanzado, y el punto de destino). Se conoce el valor de α (que es la diferencia entre la dirección original y la actual), también se conoce la distancia “b” (distancia entre el punto de partida y el de destino) y la distancia “c” (distancia entre el punto de partida y el punto alcanzado).

Mediante el teorema de cosenos se determina “a” y con éste valor se determina el ángulo β .

$$a = \sqrt{c^2 + b^2 - 2 * c * b * \cos \alpha} \quad (4.11)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2 * a * c} \right) \quad (4.12)$$

El ángulo de corrección γ se determina de acuerdo a dos posibilidades:

- Si el ángulo del punto alcanzado es mayor que el ángulo inicial del punto destino

$$\gamma = 90 - (180 - \beta) \quad (4.13)$$

- Si el ángulo del punto alcanzado es menor que el ángulo inicial del punto destino

$$\gamma = 90 + (180 - \beta) \quad (4.14)$$

Se resalta que el ángulo Υ es el ángulo que toma el servomotor y que para determinarlo se emplea una resta o suma, dependiendo de las condiciones anteriores, con el valor suplementario del ángulo β . Por lo tanto, en caso de haber una desviación por presencia de obstáculo, se ha de corregir la dirección del nuevo desplazamiento mediante el ángulo Υ en el eslabón del módulo guía.

4.2.7 Implementación del Sistema de Control

El sistema de control se incorpora mediante la programación del controlador y de la interface de usuario para la operación del sistema en Python y del dispositivo de control en Arduino..

Se aclara que el controlador estará cargado en el ordenador, es decir, en el programa de Python, realizando con ello un control directo desde la PC. Por otro lado se programa a la placa Arduino para efectuar mediciones y las acciones de control, las cuales son provistas por el programa en Python.

a. Programación en Arduino

La programación del dispositivo de control Arduino, se enfoca en la lectura y comando serial de los sensores y actuadores, empleando la siguiente metodología:

- Se establece una comunicación serial de 115200 baudios.
- Se emplea la librería *Servo.h*, para el control de los servomotores, además se los condiciona para trabajar bajo comando serial dada una cadena de caracteres que indique la posición a efectuar por cada actuador.

- Se leen los estados de los servomotores empleando la función *servo.read()*, la cual envía en forma de cadena de caracteres la posición de los servomotores
- Se emplean interrupciones para adquirir los datos del sensor encoder.
- Se acondiciona a los sensores Sharp para la lectura de distancia, empleando la curva de comportamiento del sensor disponible en el Anexo D-2.2.

b. Programación en Python

El programa desarrollado en Python permite el análisis por visión artificial, el control de la locomoción y la interface de usuario, para lo cual se emplearon las siguientes librerías:

- Opencv: Librería de visión artificial
- Numpy: Para manejo de matrices, requisito en análisis de imágenes
- Skfuzzy: Librería de desarrollo de sistemas de control difusos para python
- Pill: permite la edición de imágenes desde Python
- Serial: Para comunicación serial con arduino
- Time: Permite obtener referencia del tiempo a partir de los datos del ordenador
- Imutils: Librería para edición de imágenes
- Math: Permite obtener funciones matemáticas, trigonométricas y estadísticas.
- Sys: Para acceder a datos del Sistema.
- Tkinter: Para el desarrollo de la aplicación interactiva
- Gc: Para liberar la memoria del sistema
- Pygame: Se empleó para la adquisición de archivos multimedia

4.2.8 Interface de usuario y operación del sistema.

La interface se compone de cinco ventanas de flujo, las cuales son:

- Portada
- Introducción: en esta ventana se describe al sistema y a las aplicaciones del mismo.
- Características del sistema: permite identificar los componentes del sistema tanto mecánicos como electrónicos y de control.
- Instrucciones de operación: que indican la forma de operar el sistema
- Ventana de control: en esta ventana se opera y configura el sistema.

Adicionalmente se incorporan siete subventanas que complementan la interface, mostradas en el Anexo E-1.

Para configurar y controlar el sistema se dispone de la ventana de control *Video Navegación*, mostrada en la Figura 83, en la cual se dispone de una pantalla en la que se visualiza la imagen capturada por la cámara. También se presentan botones con diferentes funciones, las cuales son:

- *Desplazamiento Manual*, para efectuar la locomoción manualmente sin restricción lateral.
- *Desplazamiento Regulado*, se ejecuta la locomoción con restricción lateral.
- *RESET*, se reposiciona a los eslabones de forma colineal, la cual es su posición inicial.
- *AVANCE* y *RETRO* se puede desplazar al robot sin modificar la orientación de los eslabones.
- Flechas de navegación, con las cuales se puede mover la cámara en cualquier dirección.

- *Desplazamiento Autónomo*, con el que se realiza el desplazamiento de forma autónoma en la dirección que indica el puntero de la pantalla.
- *Atrás*, para regresar a las pantallas anteriores.

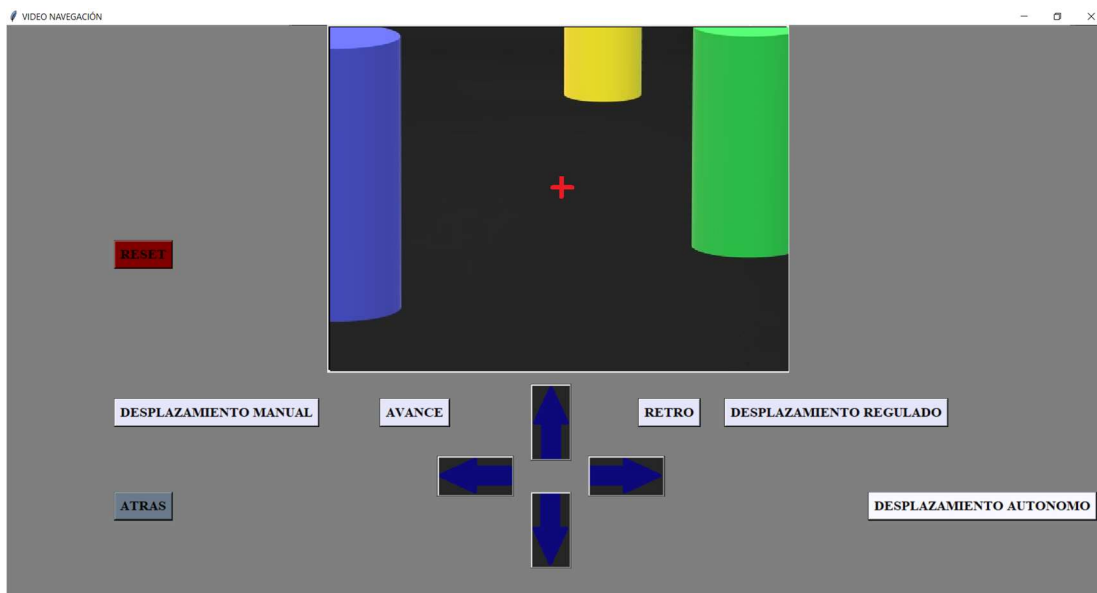


Figura 83. Ventana de control y configuración del sistema.

Una vez establecida la dirección a la cual se desea trasladar el robot, se tiene que presionar el botón *DESPLAZAMIENTO AUTÓNOMO*, inmediatamente el sistema comienza con la captura panorámica, para posteriormente realizar la locomoción. El proceso se repite hasta que la posición del robot alcance al punto de destino establecido por el operador, o en su defecto en una región cercana, dependiendo de la situación.

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 Pruebas de Funcionamiento

En este apartado se realizan pruebas para determinar los resultados logrados y la validación de la hipótesis, razón por la cual se evalúa el desempeño del sistema de visión artificial, el de control de locomoción y el de control de trayectoria por visión artificial.

5.1.1 Pruebas del sistema de visión artificial

Para evaluar el desempeño del sistema de visión artificial, se establecen diferentes secuencias de imágenes efectuadas por la operación de captura panorámica del robot en el entorno controlado, con variación en la disposición y el color de los obstáculos.

- Prueba 1: Se dispone de un obstáculo en la tercera captura, como se muestra en la parte a) de la Figura 84; obteniendo una dirección de desplazamiento en los 135° , parte b), evitando la colisión con el obstáculo.

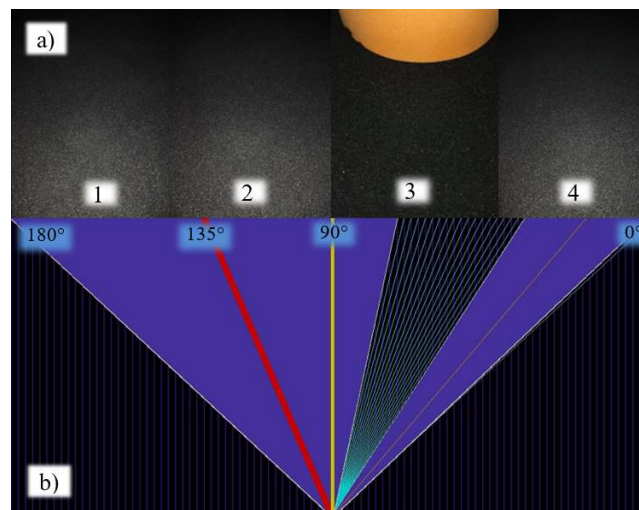


Figura 84. Prueba 1 de sistema de visión artificial: a) secuencia de capturas, b) resultados

- Prueba 2: Se dispone de dos obstáculos distribuidos en las capturas 2, 3 y 4, como se muestra en la parte a) de la Figura 85; obteniendo una dirección de desplazamiento en los 170° , parte b), evitando la colisión con los obstáculos.

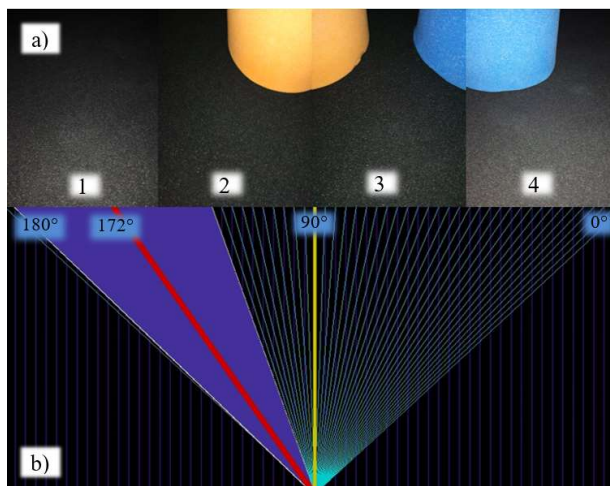


Figura 85. Prueba 2 de sistema de visión artificial: a) secuencia de capturas, b) resultados

- Prueba 3: Se dispone de un obstáculo distribuidos en las capturas 1 y 2, como se muestra en la parte a) de la Figura 86; obteniendo una dirección de desplazamiento en los 56° , parte b), evitando la colisión con el obstáculo.

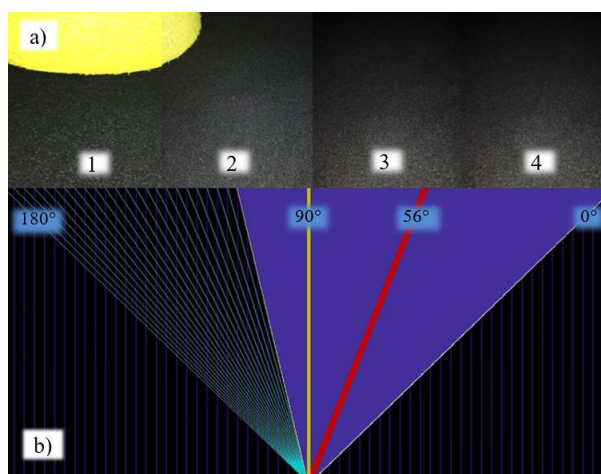


Figura 86. Prueba 3 de sistema de visión artificial: a) secuencia de capturas, b) resultados

- Prueba 4: Se dispone de dos obstáculos distribuidos en las capturas 1 y 4, como se muestra en la parte a) de la Figura 87; obteniendo una dirección de desplazamiento en los 98° , parte b), evitando la colisión con los obstáculos.

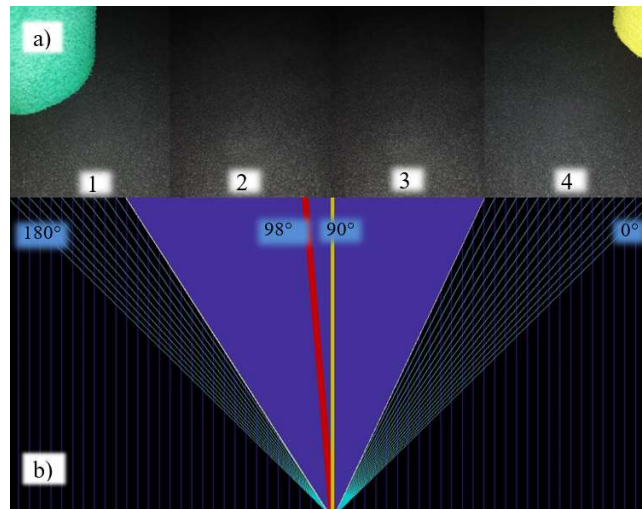


Figura 87. Prueba 4 de sistema de visión artificial: a) secuencia de capturas, b) resultados

De las pruebas realizadas se concluye que el control por visión artificial para la detección de obstáculos en el entorno controlado, es funcional puesto que determina la dirección de desplazamiento evitando obstáculos y en base al área de seguridad del robot.

5.1.2 Pruebas de locomoción

Para evaluar el desempeño del sistema de control de locomoción, se establecen diferentes pruebas de carácter cualitativo, en el que se varía la disposición de los obstáculos a fin de poner a prueba la adaptación de la locomoción.

- Prueba 1: En esta prueba se verifica la motricidad adquirida del robot, para lo cual se dispone de un obstáculo a 15 cm del robot, alrededor del cual se traslada hasta invertir la dirección de posición del mismo, como se muestra en la Figura 88.



Figura 88. Prueba 1 de locomoción – prueba de motricidad

- Prueba 2: En esta prueba se verifica la adaptación de la locomoción, para lo cual se dispone de varios obstáculos formando un tunel, a través del cual el robot se desplaza evitando colisiones, como se muestra en la Figura 89.



Figura 89. Prueba 2 de locomoción – prueba de tunel

- Prueba 3: En esta prueba se verifica la restricción de locomoción horizontal del robot, para ello se dispone de obstáculos laterales pegados a su cuerpo. Los obstáculos no son golpeados durante el desarrollo de toda la locomoción, como se muestra en la Figura 90.



Figura 90. Prueba 3 de locomoción – restricción lateral

De las pruebas de locomoción se determina una correcta adaptación al entorno de la locomoción del robot.

5.1.3 Pruebas de control de trayectoria por visión artificial

Para evaluar el desempeño del control de la trayectoria por visión artificial, se emplea la norma ASTM E2802 – 11, “Método de prueba estándar para evaluar las capacidades del robot de respuesta de emergencia: Movilidad: Obstáculos en áreas confinadas: Obstáculos”. En esta norma existen muchos tipos de pruebas que competen al desempeño del robot, por cual se selecciona el test de “Tareas de maniobra: Slaloms Poste / Hoyo”, la cual se basa en la evasión de postes empotrados de manera colineal consecutiva, bajo una maniobra zigzageante.

Cada prueba tiene sus parámetros de evaluación, sin embargo, existen varias pruebas que se someten a calificación del evaluador, tal como se muestra en la Figura 91.


| Mobility: Confined Area Terrains | | | |
|---|--|---|--|
|  | Continuous Pitch/Roll Ramps (ASTM E2826-11) |  | Maneuvering Tasks: Sustained Speed (ASTM E2829-11) |
|  | Crossing Pitch/Roll Ramps (ASTM E2827-11) |  | Maneuvering Tasks: Towing Grasped/Hitched Sleds (ASTM E2830-11) |
|  | Symmetric Stepfields (ASTM E2828-11) |  | Maneuvering Tasks: Post/Hole Slaloms (Balloting) |
|  | Gravel (Balloting) |  | Navigation Tasks: Hallway Labyrinths with Complex Terrain (WK33260) |
|  | Sand (Balloting) |  | Search Tasks: Random Mazes with Complex Terrain (ASTM 2857-12) |

Figura 91. Metodología de pruebas bajo ASTM E2802

Fuente: (NIST - National Institut of Standards and Technology, 2014)

Dado que la norma ASTM E2802, valora la capacidad de evadir obstáculos (cualitativamente) por diferentes tipos de pruebas, lo cual ya fue realizado en las pruebas de locomoción; se debe agregar un criterio de evaluación sobre el control de la trayectoria, aspecto evaluado puntualmente en los robots industriales, por lo que también se emplea la norma ISO 9283: “Robots Industriales de Manipulación. Criterios de rendimiento y métodos de prueba relacionados”. Aquí se presentan 14 criterios de evaluación para el desempeño de robots.

Para determinar la factibilidad de emplear esta norma, nos referimos al análisis de la norma ISO 9283 por (ABROX Metrología Industrial, 2001), en la cual señala: “también pueden ser usados para test de prototipos, test de diferentes tipos de robots o test de aceptación.”

Ya que se debe evaluar el desempeño del robot en el control de la trayectoria bajo cambios de dirección en su desplazamiento, y bajo el análisis por (ABROX Metrología Industrial, 2001), se toma el siguiente criterio:

- Precisión de la trayectoria en reorientación

“Registra la influencia de las alteraciones de orientación tridireccionales sobre la trayectoria lineal.” (ABROX Metrología Industrial, 2001)

Aquí se toma como parámetro a la precisión o repetibilidad sobre una trayectoria producto de una o más alteraciones de orientación durante el desplazamiento. La precisión mide la cercanía entre los puntos alcanzados, es decir, la cercanía entre las trayectorias alteradas bajo las mismas condiciones.

La exactitud, que es la capacidad de colocarse lo más cercano al punto ideal de destino, no es un valor crítico dada la funcionalidad del robot. El motivo es que al haber alteraciones de orientación (por un sistema que establece un posicionamiento seguro dada la zona de seguridad del robot), el factor de exactitud pasa a segundo plano permitiéndole una mayor variación dadas las condiciones de espacio.

Para esta prueba se deben obtener los datos de las posiciones alcanzadas y de destino, donde se obtiene valores esperados y alcanzados. Para el efecto, las condiciones de las pruebas son las siguientes:

- Mismo punto de partida
- Mismo punto de destino
- El obstáculo tiene que tener la misma posición

Las pruebas de funcionamiento de la navegación autónoma se realizan bajo 6 posiciones diferentes de destino seleccionadas, ya que es un número prudente para estudio de localización en robots, recomendado por Rodríguez Vázquez (2010). Para cada posición se efectúan 7 iteraciones, es decir, se elige un punto de destino, luego se realiza la operación de traslación repitiéndola 7 veces desde el mismo punto de partida y con el mismo punto de destino, después se cambia de punto de destino y se repite el proceso.

La repetibilidad se determina mediante las siguientes fórmulas:

[Repetibilidad \equiv 3 * Desviación estandar + Valor media muestral de vectores de posición relativa]

$$\text{Repetibilidad} = 3 * Sl + lm \quad (5.1)$$

$$li = \sqrt{(Xi - Xm)^2 + (Yi - Ym)^2} \quad (5.2)$$

$$lm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n li \quad (5.3)$$

$$Sl = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (li - lm)^2}}{n-1} \quad (5.4)$$

Donde:

- Sl = Desviación estándar
- li = Magnitud vector posición relativo
- lm = Valor media muestral de vectores de posición relativa
- Xi = Coordenada cartesiana respecto a eje X
- Xm = Valor media muestral de posiciones respecto a eje X

- Y_i = Coordenada cartesiana respecto a eje Y
- Y_m = Valor media muestral de posiciones respecto a eje Y
- n = número de muestras (iteración de operación de traslación)

1. Posición

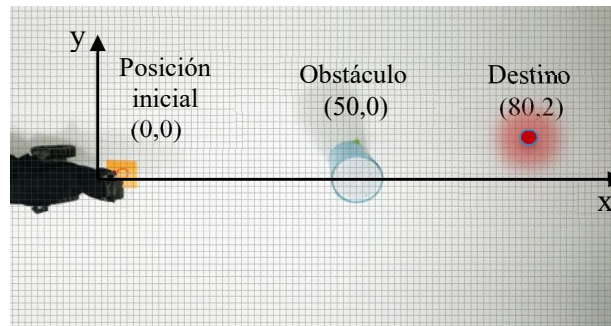


Figura 92. Posición de elementos Posición 1

En la Tabla 25 se presentan las posiciones resultantes de cada iteración bajo las mismas circunstancias.

Tabla 25.

Pruebas de funcionamiento en Posición 1

| Destino 1 | | | |
|-----------|--------|--------|---------|
| Muestra | X [cm] | Y [cm] | Evasión |
| 1 | 75 | 8 | 0 |
| 2 | 76 | 6 | 1 |
| 3 | 77 | 9 | 0 |
| 4 | 75 | 7 | 1 |
| 5 | 77 | 10 | 0 |
| 6 | 75 | 9 | 1 |
| 7 | 76 | 10 | 0 |

- Destino = (80,2) cm
- $X_m = 75.9$ cm

- $Y_m = 8.4 \text{ cm}$
- $l_m = 1.6 \text{ cm}$
- Desviación Estándar - $SI = 0.2 \text{ cm}$
- Repetibilidad = 2.20 cm
- Evasión promedio = 43%

En la Figura 93 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje X, son fluctuantes y cercanos entre si, en el rango de 74 y 77 cm, con una variación máxima de 3 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 3 y 6 cm respecto al valor de destino de 80 cm.

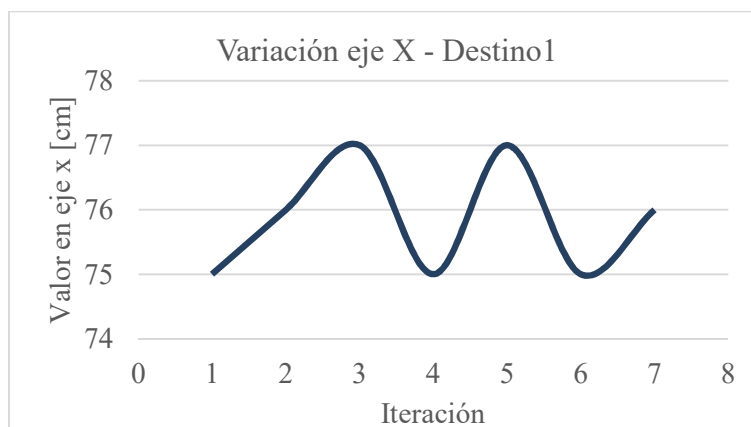


Figura 93. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 1

En la Figura 94 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje Y son fluctuantes y cercanos entre si, en el rango de 7 a 10 cm, con una variación máxima de 3 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 5 y 8 cm respecto al valor de destino de 2 cm.

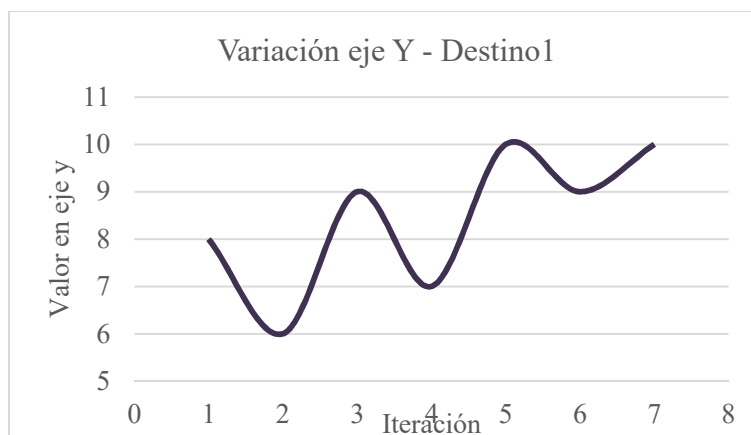


Figura 94. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 1

2. Posición

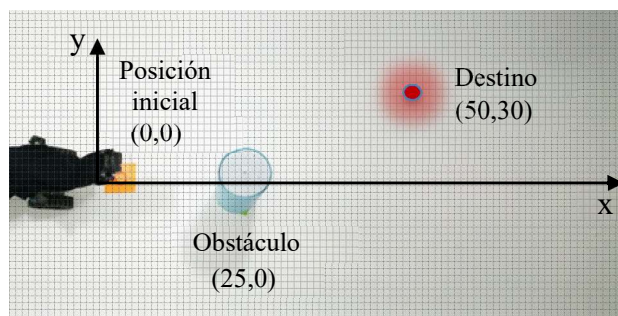


Figura 95. Posición de elementos Posición 2

En la Tabla 26 se presentan las posiciones resultantes de cada iteración bajo las mismas circunstancias.

Tabla 26.

Pruebas de funcionamiento en Posición 2

| Destino 2 | | | |
|------------------|-------|-------|---------|
| Muestra | X[cm] | Y[cm] | Evasión |
| 1 | 55 | 25 | 1 |
| 2 | 53 | 27 | 0 |
| 3 | 53 | 32 | 1 |
| 4 | 54 | 26 | 0 |
| 5 | 56 | 25 | 1 |
| 6 | 54 | 27 | 1 |
| 7 | 56 | 26 | 1 |

- Destino = (50,30) cm
- $X_m = 54.4$ cm
- $Y_m = 26.9$ cm
- $l_m = 2.0$ cm
- Desviación Estándar - $S_l = 0.6$ cm
- Repetibilidad = 4.0 cm
- Evasión promedio = 71%

En la Figura 96 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje X son fluctuantes y cercanos entre sí, en el rango de 53 a 56 cm, con una variación máxima de 3 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 3 y 6 cm respecto al valor de destino de 50 cm.

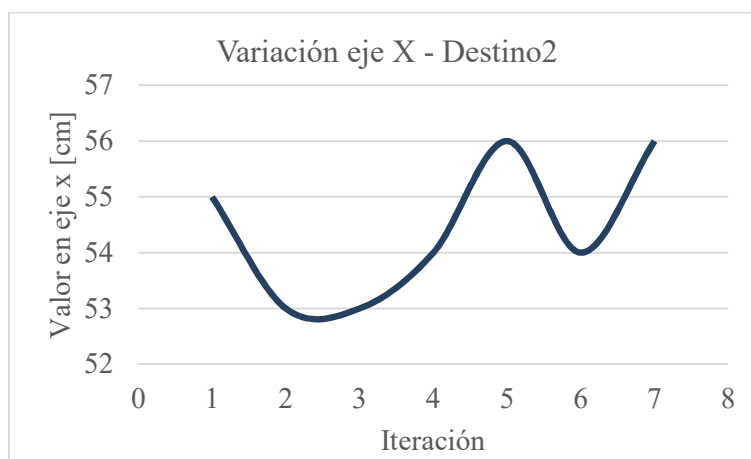


Figura 96. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 2

En la Figura 97 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje X son fluctuantes y cercanos entre sí, en el rango de 25 a 32 cm, con una variación máxima de 7 cm entre

posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 2 y 5 cm respecto al valor de destino de 30 cm.

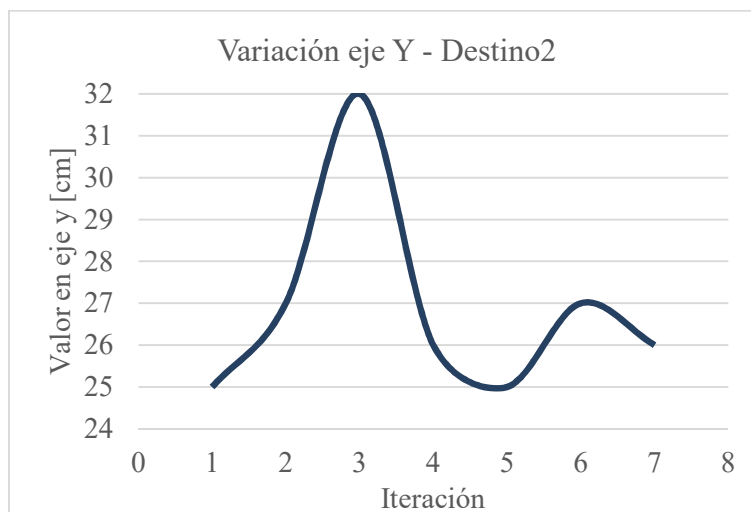


Figura 97. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 2

3. Posición

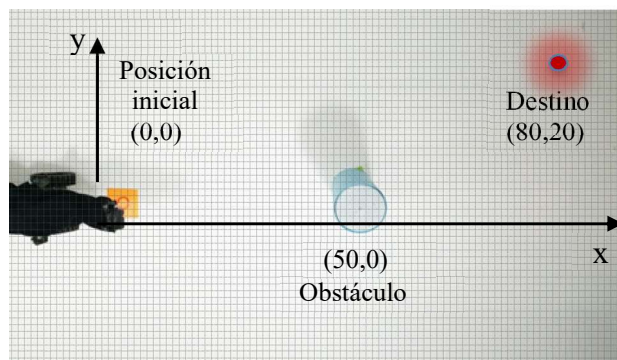


Figura 98. Posición de elementos Posición 3

En la Tabla 27 se presentan las posiciones resultantes de cada iteración bajo las mismas circunstancias.

Tabla 27.
Pruebas de funcionamiento en Posición 3

| Destino 3 | | | |
|------------------|--------|--------|---------|
| Muestra | X [cm] | Y [cm] | Evasión |
| 1 | 75 | 16 | 1 |
| 2 | 77 | 17 | 0 |
| 3 | 75 | 18 | 1 |
| 4 | 76 | 15 | 0 |
| 5 | 77 | 16 | 1 |
| 6 | 75 | 16 | 0 |
| 7 | 78 | 16 | 0 |

- Destino = (80,20) cm
- $X_m = 76.1$ cm
- $Y_m = 16.3$ cm
- $l_m = 1.4$ cm
- Desviación Estándar - SI = 0.2 cm
- Repetibilidad = 1.9 cm
- Evasión promedio = 43%

En la Figura 99 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje X son fluctuantes y cercanos entre si, en el rango de 75 a 78 cm, con una variación máxima de 3 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 3 y 5 cm respecto al valor de destino de 80 cm.

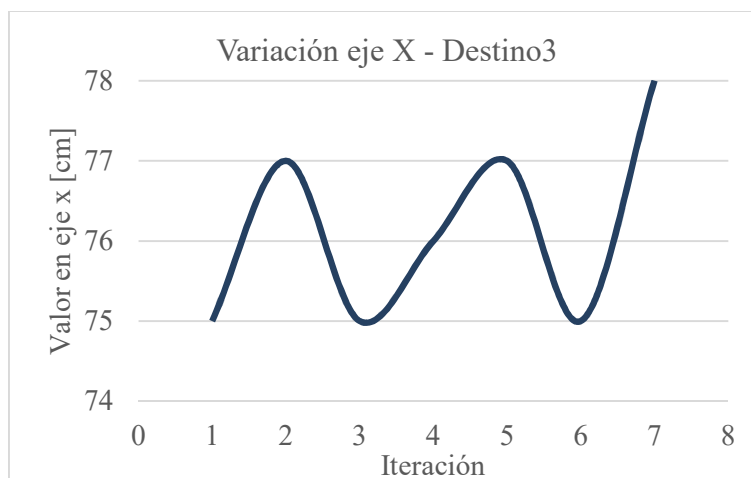


Figura 99. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 3

En la Figura 100 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje Y son fluctuantes y cercanos entre sí, en el rango de 15 a 18 cm, con una variación máxima de 3 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 3 y 5 cm respecto al valor de destino de 20 cm.

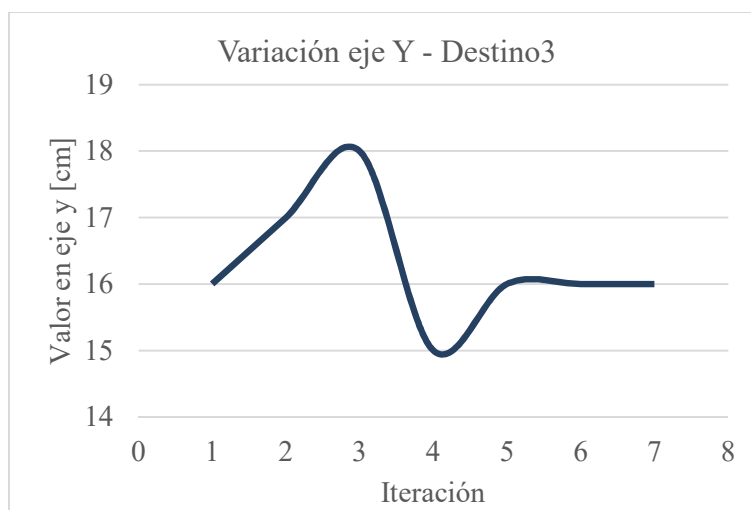


Figura 100. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 3

4. Posición

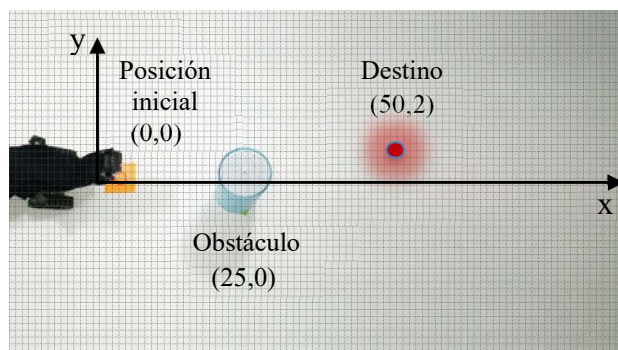


Figura 101. Posición de elementos Posición 4

En la Tabla 28 se presentan las posiciones resultantes de cada iteración.

Tabla 28.

Pruebas de funcionamiento en Posición 4

| Destino 4 | | | |
|------------------|-------|-------|---------|
| Muestra | X[cm] | Y[cm] | Evasión |
| 1 | 45 | 7 | 1 |
| 2 | 46 | 10 | 0 |
| 3 | 43 | 9 | 1 |
| 4 | 44 | 8 | 0 |
| 5 | 48 | 11 | 1 |
| 6 | 44 | 8 | 1 |
| 7 | 46 | 7 | 1 |

- Destino = (50,2) cm
- $X_m = 45.1$ cm
- $Y_m = 8.6$ cm
- $l_m = 1.9$ cm
- Desviación Estándar - $Sl = 0.4$ cm
- Repetibilidad = 3.0 cm
- Evasión promedio = 71%

En la Figura 102 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje X son fluctuantes y cercanos entre si, en el rango de 43 a 48 cm, con una variación máxima de 5 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 2 y 7 cm respecto al valor de destino de 50 cm.

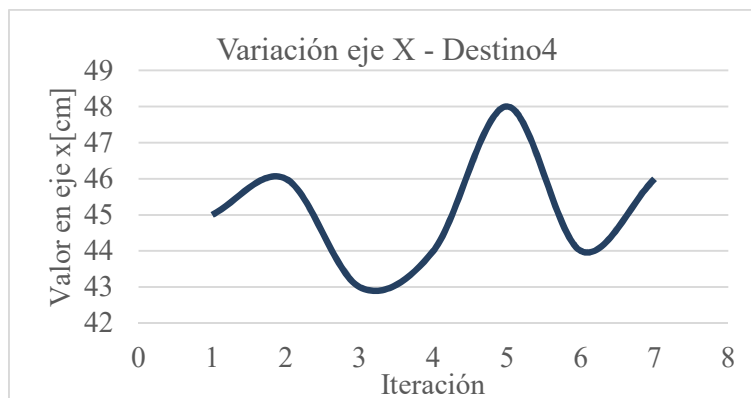


Figura 102. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 4

En la Figura 103 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje Y son fluctuantes y cercanos entre si, en el rango de 7 a 11 cm, con una variación máxima de 4 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 5 y 9 cm respecto al valor de destino de 2 cm.

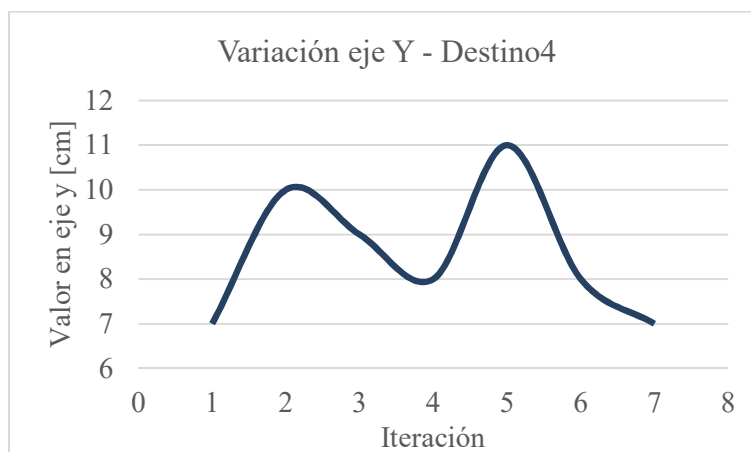


Figura 103. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 4

5. Posición

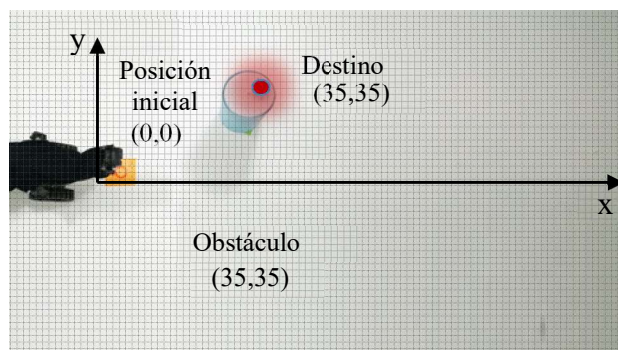


Figura 104. Posición de elementos Posición 5

En la Tabla 29 se presentan las posiciones resultantes de cada iteración bajo las mismas circunstancias.

Tabla 29.

Pruebas de funcionamiento en Posición 5

| Destino 5 | | | |
|------------------|--------|--------|---------|
| Muestra | X [cm] | Y [cm] | Evasión |
| 1 | 44 | 28 | 1 |
| 2 | 47 | 27 | 1 |
| 3 | 45 | 29 | 1 |
| 4 | 44 | 30 | 0 |
| 5 | 43 | 26 | 0 |
| 6 | 46 | 27 | 1 |
| 7 | 42 | 28 | 1 |

Destino = (35,35) cm

$X_m = 44.4$ cm

$Y_m = 27.9$ cm

$l_m = 1.9$ cm

Desviación Estándar - SI = 0.3 cm

Repetibilidad = 2.8 cm

Evasión promedio = 71%

En la Figura 105 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje X son fluctuantes y cercanos entre si, en el rango de 42 a 47 cm, con una variación máxima de 4 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 7 y 12 cm respecto al valor de destino de 35 cm.

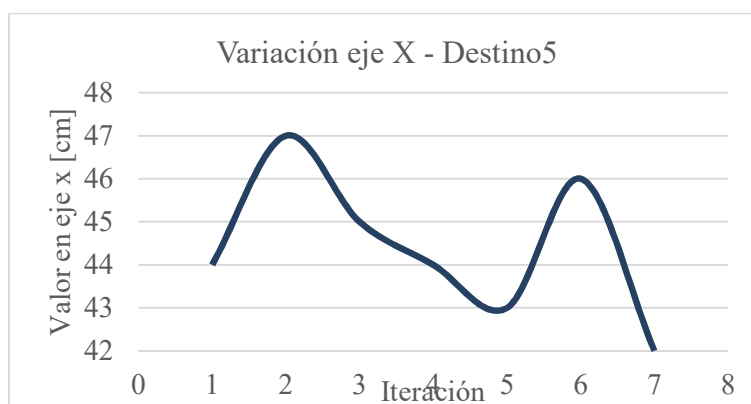


Figura 105. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 5

En la Figura 106 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje Y son fluctuantes y cercanos entre si, en el rango de 26 a 30 cm, con una variación máxima de 4 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 5 y 9 cm respecto al valor de destino de 35 cm.

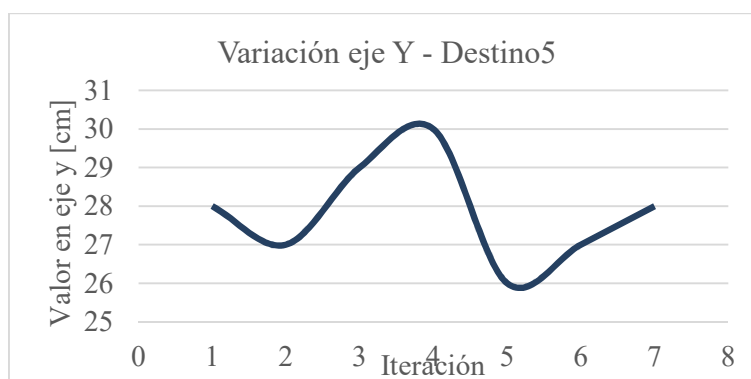


Figura 106. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 5

6. Posición

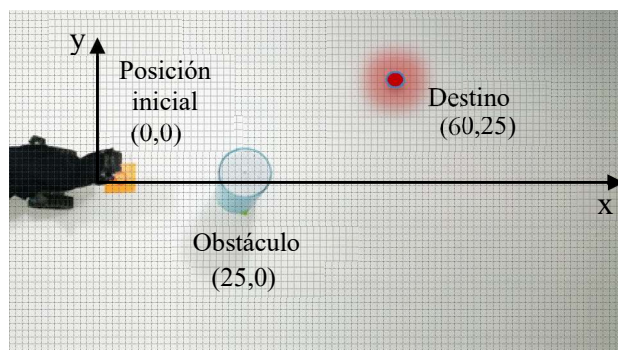


Figura 107. Posición de elementos Posición 6

En la Tabla 30 se presentan las posiciones resultantes de cada iteración bajo las mismas circunstancias.

Tabla 30.

Pruebas de funcionamiento en Posición 6

| Destino 6 | | | |
|------------------|--------|--------|---------|
| Muestra | X [cm] | Y [cm] | Evasión |
| 1 | 35 | 50 | 1 |
| 2 | 32 | 52 | 1 |
| 3 | 30 | 54 | 1 |
| 4 | 31 | 53 | 0 |
| 5 | 33 | 51 | 0 |
| 6 | 35 | 55 | 1 |
| 7 | 33 | 52 | 1 |

Destino = (60,25) cm

$X_m = 52.4$ cm

$Y_m = 32.7$ cm

$l_m = 2.1$ cm

Desviación Estándar - $S_l = 0.5$ cm

Repetibilidad = 3.6 cm

Evasión promedio = 71%

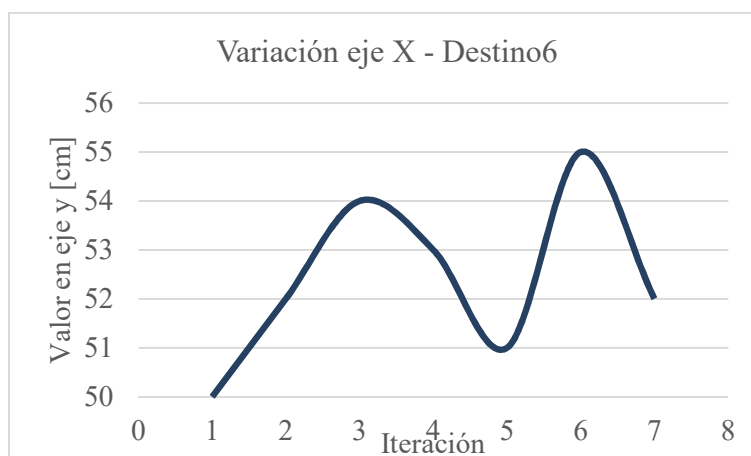


Figura 108. Variación de posicionamiento respecto a eje X en Posición 6

En la Figura 108 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje X son fluctuantes y cercanos entre sí, en el rango de 50 a 55 cm, con una variación máxima de 4 cm entre posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 5 y 10 cm respecto al valor de destino de 60 cm.

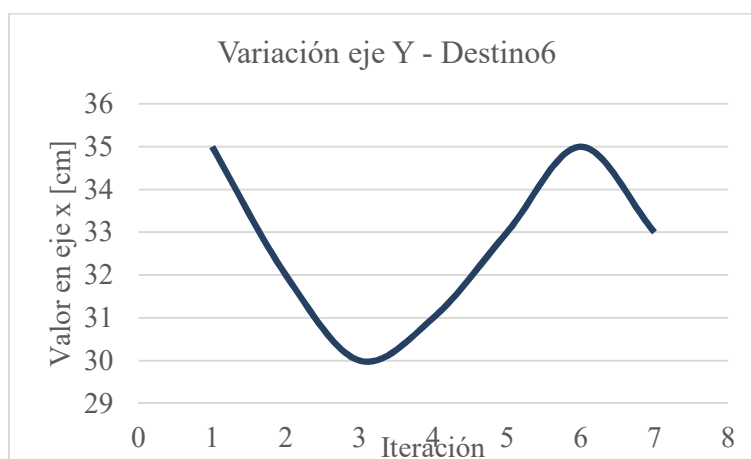


Figura 109. Variación de posicionamiento respecto a eje Y en Posición 6

En la Figura 109 se observa que los valores obtenidos de posicionamiento respecto al eje Y son fluctuantes y cercanos entre sí, en el rango de 30 a 35 cm, con una variación máxima de 4 cm entre

posiciones alcanzadas. También se produce una variación entre 10 y 15 cm respecto al valor de destino de 25 cm.

5.2 Validación de la Hipótesis

Para determinar la veracidad de la hipótesis se emplea el método de la distribución X o Chi cuadrado, debido a que por ésta metodología se relacionan varias variables independientes.

A continuación se formula las hipótesis y variables de la prueba:

- Hipótesis:

Es posible la exploración y monitoreo en un entorno controlado mediante el control por visión artificial de la trayectoria de un robot modular con locomoción de serpiente.

- Hipótesis Nula

Ho = No se puede explorar ni monitorear en un entorno controlado mediante el control por visión artificial de la trayectoria de un robot modular con locomoción de serpiente.

- Hipótesis alternativa

Hi = Se puede explorar y monitorear en un entorno controlado mediante el control por visión artificial de la trayectoria de un robot modular con locomoción de serpiente.

- Margen de Error:

5%.

En la Tabla 31 se muestran los resultados de la repetibilidad de cada prueba. Ya que el método Chi cuadrado requiere un parámetro de importancia de la variable considerada, en este caso la Repetibilidad, se determina en base a la aceptación de la muestra.

La aceptación es un parámetro que expresa si la muestra entra en los rangos permitidos para la variable repetibilidad.

El límite establecido para la repetibilidad es de ± 4 cm, valor objetivo tomado como referencia del control de la trayectoria.

Tabla 31.

Resultados de Repetibilidad y Evasión en pruebas de funcionamiento

| Destino | Repetibilidad [cm] | Aceptación Repetibilidad | Evasión Obstáculo |
|----------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 2.20 | 1.0 | 0.43 |
| 2 | 4.00 | 1.0 | 0.71 |
| 3 | 1.90 | 1.0 | 0.43 |
| 4 | 2.99 | 1.0 | 0.71 |
| 5 | 2.85 | 1.0 | 0.71 |
| 6 | 3.58 | 1.0 | 0.71 |

También se establece la evasión promedio del robot, resultante del total de las pruebas efectuadas, mediante la fórmula:

$$Evasión\ Promedio = \frac{\sum_{i=1}^n Evasión_i}{n} = 61.90\% \quad (5.5)$$

En la Tabla 32 se aprecia a la repetibilidad y a la capacidad de evasión de obstáculos como las variables que determinan la veracidad de la hipótesis. De las mismas se establece el número total de muestras aceptables y rechazables de cada una de las pruebas realizadas, en base a los valores de repetibilidad permisible.

Tabla 32.
Variables de la hipótesis

| Variables de hipótesis | | | |
|-------------------------------|------------|------------|-------|
| | Acceptable | Rechazable | Total |
| Evasión obstáculos | 4 | 2 | 6 |
| Repetibilidad | 6 | 0 | 6 |
| TOTAL | 10 | 2 | 12 |

En la Tabla 33, se establecen las frecuencias teóricas esperadas, las cuales se calculan mediante la multiplicación entre el total de la fila y columna al cual pertenecen, divididos para el total absoluto.

Tabla 33.
Frecuencias teóricas esperadas para las variables de la hipótesis

| Frecuencias teóricas esperadas | | |
|---------------------------------------|------------|------------|
| | Acceptable | Rechazable |
| Evasión obstáculos | 5 | 1 |
| Repetibilidad | 5 | 1 |

La desviación Chi cuadrado se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$X^2 = \sum_{n=1}^i \frac{(f - ft)^2}{ft} \quad (5.6)$$

Donde:

- f = valor de la variable de la tabla de Variables de hipótesis
- ft = valor de la frecuencia teórica esperada de la variable correspondiente.

Reemplazando los valores de las variables de la Tabla 36, se tiene:

$$X^2 = \frac{(4 - 5)^2}{5} + \frac{(6 - 5)^2}{5} + \frac{(2 - 1)^2}{1} + \frac{(0 - 1)^2}{1}$$

$$X^2 = 2.82$$

En el método de la distribución Chi cuadrada se requiere establecer el valor nominal de la misma que a su vez depende del margen de error seleccionado y de los grados de libertad, los cuales se determinan mediante:

- Número filas (tabla variables de la hipótesis) = 2
- Número columnas (tabla variables de la hipótesis) = 2
- Los grados de libertad = (#filas - 1) (#columnas - 1) = 1

En base al margen de error y al número de columnas se selecciona en la tabla de distribución Chi cuadrado (Anexo E-2.) la Chi cuadrada nominal de 2.71

Finalmente se tienen los valores tabulados y calculados de la distribución Chi cuadrada, como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34.

Resultados de la Chi cuadrada

| | |
|---------------|------------------|
| Chi Calculado | 2.82 |
| Chi tabla | 2.71 (Anexo E-2) |

La veracidad de hipótesis alternativa y el rechazo de la nula se produce cuando lo la Chi calculada es mayor que la tabulada, lo cual es el caso, por lo tanto:

“Se puede explorar y monitorear en un entorno controlado mediante el control por visión artificial de la trayectoria de un robot modular con locomoción de serpiente.”

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se requiere mínimo de tres módulos de apoyo para emplear la motricidad de serpiente en un robot, dada la distribución de masa de la estructura.
- El sistema emplea tres tipos de locomoción, los cuales son la locomoción horizontal, la vertical y la torsional.
- El rango de indentificación de obstáculos por el sistema de visión artificial está comprendido en un radio de 15cm respecto a el eje de la cámara
- El sistema de visión artificial identifica a cualquier objeto que presente tonalidad, en la gama de azul, naranja, verde, rojo, morado.
- Los parámetros de las pruebas de funcionamiento se basan en la prueba ASTM E2802 – 11, en las que se interpone a un obstáculo cilíndrico frente al robot.
- Las variables de análisis para determinar el funcionamiento del robot se basan en la norma ISO 9283 bajo el factor de precisión o repetibilidad. Adicionalmente el otro factor clave involucrado en la operatividad es la capacidad de evasión de obstáculos.
- La capacidad de evasión de obstáculos del robot es del 61.9%, lo cual no implica un 38.1% de posibilidad de que el robot sufra un impacto o choque que inhabilite su locomoción, ya que en caso de producirse un rozamiento o contacto con un obstáculo, el sistema reposiciona los eslabones para superar esta condición.

- El efecto de las colisiones es el de modificar la dirección de desplazamiento lo que altera el control de la trayectoria.
- La repetibilidad del robot se establece en ± 4 cm, lo cual indica que el robot seguirá la trayectoria establecida por visión artificial y por la corrección de proximidad con un margen de error de ± 4 cm.
- Se concluye de la exploración y monitoreo en un entorno controlado mediante el control por visión artificial de la trayectoria de un robot modular con locomoción de serpiente es posible siempre y cuando el sistema posea una repetibilidad menor o igual a ± 4 cm y una capacidad de evasión de obstáculos mínima del 61.9%
- El control de la trayectoria se basa en un análisis por cinemática inversa, donde se establece el ángulo de reposicionamiento en dirección al destino deseado.
- Existen zonas de no identificación de obstáculos las cuales se producen en las zonas colindantes a la región de captura de los 17 cm, por lo cual es necesario emplear una nueva medición antes de llegar a éste límite.
- El análisis por visión artificial determina la dirección del desplazamiento en base a la detección de objetos por análisis de espacios de color.
- La dirección de desplazamiento determinada siempre será la más cercana a la dirección de destino deseada. En éste análisis que toma en cuenta el área de seguridad para el robot, establecida en un rango de 15° respecto a la línea central del robot.
- Durante la captura panorámica se puede producir colisiones leves entre el eslabón sobre el cual descansa la cámara con objetos muy cercanos ya que la el eslabón rota la cámara para realizar capturas panorámicas. Este fenómeno involuntario no afecta al análisis por visión artificial.

- La modificación del posicionamiento de los eslabones por el sistema de locomoción con restricción por proximidad presenta zonas donde no se detecta objetos debido a que en cada módulo se posicionan dos sensores laterales Sharp, los cuales miden puntualmente la distancia y cuando el objeto no se encuentra en la región frontal al sensor no puede ser detectado, situación que puede ocasionar un roce o colisión.
- Se requirió emplear una segunda fuente de alimentación debido a la superior demanda de la corriente de arranque por los servomotores. La potencia de consumo determinada se elevó considerablemente en el funcionamiento real de la planta por factores como el desgaste de los servomotores, las corrientes parásitas, la alta impedancia y resistencia producida en el cableado.
- Debido al consumo de potencia por los actuadores, no es factible emplear una alimentación mediante baterías portátiles, ya que su desgaste será inmediato y producirá la salida del control de los servomotores, los cuales requieren de una fuente estable de alimentación.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se debe separar las líneas de potencia con las de datos ya que como se emplean cables de longitud considerable se produce alta impedancia y con ello la pérdida de datos
- Para optimizar la detección de obstáculos laterales, se debe emplear sensores de proximidad de rango ampliado de medición en lugar de sensores Sharp o en tal caso incorporar más sensores Sharp laterales.
- Existe una sobrecarga en los servomotores de la locomoción vertical, lo cual produce un consumo superior de corriente y la disminución de la vida del actuador, razón por la cual

se debe contemplar la alternativa de cambiar el servomotor o incorporar otro que complemente el trabajo y disminuya la carga

- Para disminuir la incidencia de colisión del eslabón en el que reposa la cámara, durante la captura panorámica, se recomienda modificar el mecanismo para una acción más cercana al eje de rotación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que al extender la distancia entre el mecanismo y el actuador, mayor será la inercia y la carga se incrementará indudablemente pese a no modificar la masa; razón por la cual se plantea otra alternativa, la de incorporar más sensores de distancia que colaboren en la operación.
- Se debe incorporar una regulación electrónica de intensidad luminosa en el escenario en lugar de la física, ya que facilita la variabilidad ante posibles modificaciones.
- Para disminuir la tensión producida por el cableado, se recomienda implementar un sistema dispensador se regule la tensión , la salida y la recolección del cable.
- Para la optimización el control de la trayectoria se recomienda emplear redes neuronales que evalúen y corrijan la locomoción ya que no es posible emplear sensores que evalúen la posición absoluta y relativa de la estructura del robot.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC Ciencia. (08 de Julio de 2016). *Sentido del tacto a distancia en serpientes marinas*. Recuperado el 28 de Abril de 2019, de https://www.abc.es/ciencia/abci-sentido-tacto-distancia-serpientes-marinas-201606081736_noticia.html
- ABROX Metrología Industrial. (23 de Agosto de 2001). *ISO 9283: Manipulating industrial robots -- Performance criteria and related test methods*. Recuperado el 30 de Marzo de 2019, de http://www.abrox.com/robotic_iso.htm
- Alleyn, S. (17 de Enero de 2019). *Filamento PLA*. (Impresoras3D, Editor) Recuperado el 28 de Abril de 2019, de <https://www.impresoras3d.com/filamento-pla/>
- Anónimo. (20 de Julio de 2016). *¿Dónde empieza la cola de una serpiente?* Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://resolviendolaincognita.blogspot.com/2016/07/donde-empieza-la-cola-de-una-serpiente.html>
- Arcgis. (01 de Enero de 2019). *Requisitos Python*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/get-started/installation-guide/python-requirement.htm>
- arduino.cc. (01 de Enero de 2019). *Arduino Mega 2560*. Recuperado el 03 de Marzo de 2019, de <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>

Balitskiy , A. (13 de Diciembre de 217). *Conjunto de Serpientes*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://sp.depositphotos.com/177096786/stock-illustration-set-viper-snake-serpent-cobra.html>

Control 3D. (26 de Abril de 2018). ABS VS PLA | COMPARATIVA EXTREMA. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=GcZe38CCSho>

Cortéz, L., & Garibay, R. (23 de Agosto de 2018). *Tema 1 - Concepto de sistemas dinámicos y estáticos*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de <https://www.studocu.com/en/document/instituto-politecnico-nacional/termodinamica/lecture-notes/tema-1-concepto-de-sistemas-dinamicos-y-estaticos/749776/view>

Date, H., & Takita, Y. (2007). *Adaptive locomotion of a snake like robot based on curvature derivatives*. IEEE/RSJ.

David L. Hu, J. N. (23 de Junio de 2009). *The mechanics of slithering locomotion*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://www.pnas.org/content/106/25/10081>

De la Rosa , J. (7 de Diciembre de 2018). *La anaconda gigante, la serpiente más grande del mundo*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de La anaconda gigante, la serpiente más grande del mundo

Del Valle Hernández, L. (08 de Abril de 2019). *Detector de bordes con OpenCV*. Obtenido de <https://programarfacil.com/blog/vision-artificial/detector-de-bordes-canny-opencv/>

EVEREST. (23 de Agosto de 2015). *SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROL*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de

<http://ieshuelin.com/huelinwp/download/Tecnologia/Tecnologia%20industrial/3-SISTEMAS-AUTOMaTICOS-DE-CONTROL-ampliacion-PAG-1-a-34.pdf>

Futaba. (21 de Enero de 2019). *Catálogo servomotores Futaba*. Recuperado el 27 de Abril de 2019, de <https://www.futabarc.com/servos/servo-wizard.php>

FZICHanel. (5 de Agosto de 2015). *Autonomous stair climbing with the snake-like inspection robot KAIRO 3*. Recuperado el 20 de Abril de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=orWmDO13k9Y&list=PL6uaX14EdJcwCFO9Nit-7OE9ID3_Rv86c&index=31&t=26s

García García, P. P. (2013). *Reconocimiento de imágenes utilizando redes neuronales artificiales*. Obtenido de Universidad Complutense de Madrid

Gómez, S. (19 de Agosto de 2016). *Sensores de velocidad angular*. Recuperado el 25 de Abril de 2019, de <https://prezi.com/eainfv9kteuh/sensor-de-velocidad-angular/>

González Espín, C., & Urrutia Goyes, P. (2006). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT ÁPODO PARA EXPLORACIÓN*.

González, J. (2008). *Robótica Modular y Locomoción: Aplicación a Robots Ápodos*. Madrid.

Hasanzadeh, S., & Akbarzadeh, A. (2008). *Adaptive Optimal Locomotion of Snake Robot Based on CPG-Network Using Fuzzy Logic Tuner*. IEEE.

Herrera, A. (08 de Abril de 2019). *Modelos de color (RGB, CMYK, HSV/HSL)*. Recuperado el 30 de Abril de 2019, de <https://ahenav.com/2014/04/09/modelos-de-color/>

Hirose, S., Cave, P., & Goulden, C. (1993). *Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators*. London.

InfoSerpientes. (28 de Diciembre de 2018). *Mamba negra*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://www.infoserpientes.com/mamba-negra>

InfoSerpientes. (09 de Abril de 2019). *Sentidos de las serpientes*. Recuperado el 28 de Abril de 2019, de <https://www.infoserpientes.com/sentidos-de-las-serpientes>

ISA. (23 de Agosto de 2017). *TEMA 4: CINEMÁTICA DEL ROBOT*. (U. M. Hernández, Editor) Recuperado el 28 de Marzo de 2019, de <https://docplayer.es/18981326-Robotica-industrial-robotica-industrial.html>

Iyer, A. (15 de Marzo de 2016). *Detección de objetos mediante el rastreo de manchas*. Recuperado el 29 de Abril de 2019, de <http://layer0.authentise.com/object-detection-using-blob-tracing.html>

James Hom. (Enero de 2000). *Prototipado*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <http://www.sidar.org/recur/desdi/traduc/es/visitable/tecnicas/Prototyping.htm>

Juan, G. (2008). *Cube Revolutions*. Recuperado el 22 de Abril de 2019, de http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=Cube_Revolutions

Kamegawa, T., Kuroki, R., Travers, M., & Choset, H. (2012). *Proposal of EARLI for the snake robot's obstacle aided locomotion*. IEEE.

Keyence. (31 de Agosto de 2016). *Comparación entre sensores ultrasónicos y sensores ópticos*.

Recuperado el 25 de Abril de 2019, de <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/ultrasonic/comparison/>

Klaassen, B., & Paap, K. L. (1999). *GMD-SNAKE2: A Snake-Like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control*. IEEE.

Krupke, Wasserfall, Hendrich, & Zhang. (2015). *Printable modular robot: an application of rapid prototyping for flexible robot design*. *Industrial Robot: An International Journal*.

Lab, B. (Dirección). (2015). *Concertina motion of snake* [Película].

Labenda, P. (2013). *Safeguarding Trafficability of a Wheeled, Snake-like Reconnaissance Robot on Rough Terrain by a Shared Control System based on Fuzzy Logic*. IEEE.

Liljeback, P., Pettersen, K., & Gravdahl, T. (2014). *Mamba - A Waterproof Snake Robot with Tactile Sensing*. IEEE/RSJ.

Llega Arduino Due con arquitectura de 32 bit. (08 de Noviembre de 2012). Recuperado el 28 de Marzo de 2019, de <https://www.tr3sdland.com/2012/11/llega-arduino-due-con-arquitectura-de-32-bit/>

López, A. J. (18 de Noviembre de 2003). *Tipos de sistemas de lógica difusa*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de http://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/FuzzyIntro2.html

Martínez Tovar, J. G. (Junio de 2016). *Distribución "T" de Student*. Recuperado el 20 de Abril de 2019, de <https://estadisticaeninvestigacion.wordpress.com/distribucion-t-de-student/>

Maza, G. V. (2017). *PROCESAMIENTO DE IMÁGENES*.

MotionControl. (21 de Marzo de 2010). *Arquitectura de un Control de Posición : “Una cuestión de lazos”*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de <http://www.infopl.net/blog4/2010/03/21/arquitectura-de-un-control-de-posicion-%E2%80%9Cuna-cuestion-de-lazos%E2%80%9D/>

Mott P.E., R. L. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas* (Cuarta ed.). México: Pearson Education.

National Instruments. (01 de Enero de 2019). *Requerimientos del Sistema para LabVIEW*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview/compare-labview-nxg-and-labview.html>

NIST - National Institut of Standards and Technology. (28 de Mayo de 2014). *Call for Robots and Operators to Practice Standard Test Methods for Response Robots*. Recuperado el 30 de Marzo de 2019, de <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/isd/ks/Call-for-Response-Robots-and-Operators-for-NIST-ASTM-Standards-Meeting-and-Demo-Gaithersburg-MD.pdf>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (5 ed.). Madrid: Pearson Education.

Opencv. (14 de Febrero de 2019). *Sustracción de fondo*. Recuperado el 29 de Abril de 2019, de https://docs.opencv.org/3.3.0/db/d5c/tutorial_py_bg_subtraction.html

Pérez, A. (6 de Agosto de 2012). *BIOLOGIA DE LAS SERPIENTES*. Obtenido de <http://manual-ofidico.blogspot.com/2012/08/biologia-de-las-serpientes-en-el.html>

Pompa, P. (03 de Abril de 2019). *Trabajar con Servos*. Recuperado el 27 de Abril de 2019, de <http://www.superrobotica.com/Servosrc.htm>

PTC Creo Parametric. (01 de 01 de 2019). *Acerca del análisis cinemático*. Recuperado el 03 de Marzo de 2019, de http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/spanish/index.html#page/simulate/mech_des/analysis/AboutKinematicAnalysis.html

Qt.io. (12 de Enero de 2019). *Qt APIs & Librerías, herramientas e interface*. Recuperado el 29 de Abril de 2019, de <https://www.qt.io/qt-features-libraries-apis-tools-and-ide/>

Ramos, G. (10 de Diciembre de 2015). *Prairie Rattlesnake (Crotalus viridis) Skeleton*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://galileoramos.files.wordpress.com/2015/12/crotalus-viridis-18-prairie-rattlesnake-skeleton.jpg>

Ratio, F. E. (01 de Septiembre de 2010). *INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADAS A LA GESTIÓN FINANCIERA EMPRESARIAL*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2010000100002

reference.org. (2019). *How Fast Do Anacondas Move?* Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://www.reference.com/pets-animals/fast-anacondas-move-caf38f6073d1aba>

Rodríguez Segura, R. D., & Daza Barzola, P. J. (2016). *ESTUDIO Y DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO*. Guayaquill.

Rodríguez Vázquez, A. O. (2010). *LOCALIZACIÓN DEL ELEMENTO EFECTOR DEL ROBOT PARALELO LIBERTAD PARALLIX*. Querétaro: Instituto Politécnico Nacional.

- SAIS 3D. (23 de Enero de 2019). *Filamentos*. Recuperado el 29 de Abril de 2019, de http://www.sais3d.com/?gclid=Cj0KCQjwn8_mBRCLARIsAKxi0GLah1HAhQMcaQ3R1Wgq1S2Cml4ZXTSXDmLUzvWM-1RhkX32bX9ax1caAv2IEALw_wcB
- Sandiegozoo. (2019). *Python*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://animals.sandiegozoo.org/animals/python>
- Servocity. (12 de Enero de 2019). *HS-7940TH Servo*. Recuperado el 27 de Abril de 2019, de <https://www.servocity.com/hs-7940th-servo>
- ServoDatabase. (2019). *TowerPro Servos*. Obtenido de <https://servodatabase.com/servos/towerpro?sort=make-desc>
- smithsonianchannel. (2019). *Speed Kills: This Sidewinding Snake Slithers at 18 MPH*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://www.smithsonianchannel.com/videos/this-sidewinding-snake-slithers-at-18-mph/32675>
- Tanaka , M., & Matsuno, F. (2014). *Control of snake robots with switching constraints: trajectory tracking with moving obstacle*. Advanced Robotics.
- Tanaka Motoyasu, A., & Kazuo, L. (2015). *Control of a Snake Robot for Ascending and Descending Steps*. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS.
- Tanaka, M., Kon, K., & Kazuo, T. (2015). *Range Sensor Based Semiautonomous Whole-Body*. IEEE. Obtenido de IEEE
- Thakker, R., Kamat, A., Bharambe, S., & Chiddarwar, F. (2014). *ReBiS – Reconfigurable Bipedal Snake Robot*. IEEE. IEEE.

Transeth, A., Leine, R., Glocker, C., Pet, K., & Liljebäck, P. (2008). *Snake robot obstacle-aided locomotion: Modeling, simulation and experiments*. IEEE Trans. Robot.

Wei, K. (Dirección). (2014). *The Science of Snake Movement* [Película].

wikipedia. (05 de Febrero de 2019). *Modelo de color HSV*. Recuperado el 15 de Marzo de 2019, de https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_color_HSV

Wikipedia.org. (05 de Mayo de 2018). *Scilab*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de https://es.wikipedia.org/wiki/Scilab#Requisitos_del_sistema

wikipedia.org. (12 de Diciembre de 2018). *Serpentes*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Serpentes>

Wikipedia.org. (21 de Marzo de 2019). *Matlab*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de <https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB#Licencia>

Wolf, A. C. (2014). *Design and control of a mobile hyperredundant urban search and rescue*. . Advanced Robotics. .

ANEXOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **JIMÉNEZ TORRES, LENIN EDUARDO**.

En la ciudad de Latacunga, a los 15 días del mes de mayo del 2019.

Ing. Andrea Córdova Cruzatty

DIRECTORA DEL PROYECTO

Ing. Darío Mendoza Chipantasi

DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca Corrales

SECRETARIO ACADÉMICO