

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA HÁPTICO PARA ENSEÑANZA Y  
APRENDIZAJE EN ROBÓTICA**



**DAVID CISNEROS INSUASTI  
ALEJANDRO DIAZ TORO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
SAN JUAN DE PASTO  
FEBRERO DE 2017**

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA HÁPTICO PARA ENSEÑANZA Y  
APRENDIZAJE EN ROBÓTICA**



**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**Presentado por:**

**DAVID CISNEROS INSUASTI  
ALEJANDRO DIAZ TORO**

**Asesor:**

**Mg. DARIO FERNANDO FAJARDO FAJARDO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
SAN JUAN DE PASTO  
FEBRERO DE 2017**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma Jurado 1

---

Firma Jurado 2

San Juan de Pasto, febrero de 2017

## DEDICATORIA

*“Les dedico mi trabajo de tesis a las personas que me han ayudado para cursar esta carrera con muchas dificultades, a mi familia, amigos, mi compañera, especialmente a la persona que admiro por su inteligencia, su generosidad y virtud de resolver problemas con mucha genialidad, mi padre. El me inspira a ser ingenioso y que todo tiene solución.”*

NELSON DAVID CISNEROS INSUASTI

*“ Siempre he estado rodeado de grandes seres humanos y de ellos he aprendido cosas muy maravillosas que me han ayudado a crecer como persona para ellos todo, gracias por ser parte de sus vidas.*

*Tú mi motivo para creer que todo es posible y que los sueños siempre se cumplen, te quiero por siempre Lorena. ”*

ALEJANDRO DIAZ

## AGRADECIMIENTOS

*“Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial a mi madre, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos años”.*

NELSON DAVID CISNEROS INSUASTI

*“Este logro alcanzado es gracias a la influencia de muchas personas que han sido parte de mi vida y que aun lo son. Gracias a toda mi familia pero en especial quiero agradecer a la persona que siempre ha estado apoyándome tanto en las victorias como en las derrotas que he vivido durante este largo pero emocionante camino en este mundo que no es solo circuitos, ni matemáticas, ni física, ni robots. Mi querida Tia Ana Erazo, gracias por brindarme todo, gracias por creer. Este triunfo es para ti.”*

ALEJANDRO DÍAZ.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1. ANTECEDENTES.....	17
1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS.....	17
1.2 SISTEMAS HÁPTICOS.....	20
1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS HÁPTICOS.....	20
1.3 DISPOSITIVOS HÁPTICOS SEGÚN EL OBJETIVO DE DISEÑO.....	20
1.4 TECNOLOGÍAS DE SISTEMAS HÁPTICOS.....	21
1.5 EJEMPLOS DE DISPOSITIVOS HÁPTICOS.....	21
1.6 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS HÁPTICOS.....	24
1.6.1 APLICACIONES MÉDICAS.....	25
1.6.2 APLICACIONES INDUSTRIALES.....	27
1.6.3 APLICACIONES EN LA EDUCACIÓN.....	28
1.6.4 LA ROBÓTICA EN COLOMBIA.....	28
2. METODOLOGÍA.....	30
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.2 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS.....	30
2.3 DIAGRAMA ESCLAVO.....	31
2.4 DIAGRAMA MAESTRO.....	32
2.5 ANÁLISIS CINEMÁTICA DIRECTA.....	33
2.6 ANÁLISIS CINEMÁTICA INVERSA.....	34
2.7 DINÁMICA DEL SISTEMA HÁPTICO.....	35
2.8 DISEÑO.....	38
2.8.1 DISEÑO MECANICO.....	38
2.8.2 SISTEMA ESCLAVO.....	38
2.8.3 SISTEMA MAESTRO.....	39
2.9 SIMULACION.....	40
2.10 ALGORITMO DE CONTROL.....	44
2.10.1 CONTROL DE IMPEDANCIA.....	45
2.11 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA.....	46
2.12 DISEÑO ELECTRONICO.....	53
2.13 PRUEBAS Y CALIBRACION:.....	55
3. IMPLEMENTACION Y DESARROLLO.....	57
3.1 IMPLEMENTACION Y DESARROLLO.....	57
4. RESULTADOS.....	58
4.1 PRUEBAS DE VALIDACIÓN.....	61
5. CONCLUSIONES.....	64

5.1 Trabajo Futuro .....	64
6. RECOMENDACIONES .....	65
7. REFERENCIAS .....	66
8. BIBLIOGRAFÍA .....	68
9. ANEXOS.....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Primer robot industrial construido.....	18
Figura 2. Puma “Maquina Universal Programable para Montaje” .....	19
Figura 3. Robot de Configuracion SCARA.....	19
Figura 4. Ejemplo de interfaz háptica hombre-maquina.....	24
Figura 5. Sistema protésico-brazo biónico, prótesis de mano Michelangelo. ....	27
Figura 6. ROBOT COBOT.....	28
Figura 7 . Arquitectura sistema háptico maestro - esclavo.....	30
Figura 8. Esquema sistema esclavo .....	31
Figura 9. Esquema sistema maestro.....	32
Figura 10. Modelo cinemático para la resolución directa del problema. ....	33
Figura 11. Modelo cinemático para la resolución inversa del problema. ....	34
Figura 12. Análisis de fuerzas de cuerpo libre. ....	36
Figura 13. Pentagono con medidas básicas sistema háptico maestro-esclavo .....	38
Figura 14. Dibujo con medidas básicas esclavo. ....	39
Figura 15. Dibujo con medidas básicas maestro.....	40
Figura 16. Gráfico de Espacio de trabajo de los sistemas Maestro y Esclavo.....	41
Figura 17. Pantografo MK-II.....	41
Figura 18. Estructura sistema maestro en 3 dimensiones.....	42
Figura 19. Estructura sistema esclavo en 3 dimensiones.....	43
Figura 20. Sistema háptico Maestro-Esclavo.....	43
Figura 21. Estructura para el flujo de control bilateral. ....	44
Figura 22. Controlador por impedancia.....	45
Figura 23. Servomotor.....	46
Figura 24. Motores de corriente directa. ....	47
Figura 25. Sensor de fuerza. ....	48
Figura 26. Reostato.....	48
Figura 27. Tarjeta Arduino Uno.....	49
Figura 28. Tarjeta Hapkit.....	50
Figura 29. Shield arduino.....	51
Figura 30. Kit educativo Lego.....	52
Figura 31. Fuente de alimentación de 12 voltios.....	52
Figura 32. Piezas sistema maestro en Polimetilmetacrilato.....	52
Figura 33. Circuito eléctrico sistema esclavo.....	53
Figura 34. Estructura mecánica sistema maestro.....	53
Figura 35. Estructura mecánica sistema esclavo.....	54
Figura 36. Diagrama de flujo calibración del sistema Esclavo.....	55
Figura 37. Diagrama de flujo calibración sistema Maestro.....	56
Figura 38. Sistema Háptico parte Esclavo.....	57

Figura 39. Sistema Maestro.....	58
Figura 40. Sistema Esclavo. ....	58
Figura 41. Sistema Háptico Universidad de Nariño.....	59
Figura 42. Sistema dibujador. ....	60
Figura 43. Pruebas sistema háptico maestro-esclavo.....	61
Figura 44. Curva característica sensor de fuerza.....	70
Figura 45: Gráfica Angulo $\theta_5$ vs posición efector en X. ....	70
Figura 46: Gráfica Angulo $\theta_1$ vs posición efector en X. ....	71
Figura 47: Gráfica Angulo $\theta_1$ vs posición efector en Y. ....	71
Figura 48: Gráfica Angulo $\theta_5$ vs posición efector en Y. ....	72
Figura 49: Gráfica Barrido efector en el área de trabajo. ....	72

## **ANEXOS**

Código en Matlab Cinematica Inversa. ....	73
Código en Arduino Cinematica Inversa. ....	75
Código en Matlab Cinematica Directa. ....	76
Código en Arduino Cinematica Directa. ....	77
Código en Matlab® Analisis y procesamiento de Imagen. ....	78
Imágenes asistentes Diplomado de Informatica y Robótica. ....	78

## RESUMEN

En esta investigación se presenta el desarrollo de un sistema háptico que se fundamenta en un manipulador plano paralelo de dos grados de libertad. Se investiga sobre las características de los sistemas hápticos y su funcionalidad, se realizan simulaciones de cinemática directa e inversa utilizando el programa Matlab® con la intención de analizar el movimiento dentro de un espacio de trabajo, se diseña la estructura del sistema en el programa de diseño mecánico Inventor de Autodesk™, además se utiliza un kit de robótica Lego®, elementos de electrónica como motores de corriente continua, sensores resistivos y una tarjeta inteligente Arduino®. La finalidad del análisis, diseño y construcción del sistema es para que sea utilizado en la enseñanza y aprendizaje de robótica dentro del aula de clase y que sirva como base de futuras investigaciones en el área de robótica especialmente en el área de robots manipuladores de dos o más grados de libertad.

## **ABSTRACT**

This research presents the development of a haptic system that is grounded in a two degree of freedom planar parallel manipulator. We research the characteristics of haptic systems and their functionality, are performed simulations of direct and inverse kinematics using Matlab® program with the intention of analyze the movement inside of a workspace, the design of system is realize in Inventor of Autodesk® program, moreover is used a Lego® kit of robotics, electronics elements as motors DC, resistive sensors and arduino smard card. The purpose of analysis, design and making of system it's to be utilized in the teaching and learning robotics inside the classroom and that serves as base of future research in robotics specially in the study area of two or more degree freedom robots manipuladors.

## GLOSARIO

**Cinemática directa:** Tiene como objetivo determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, se tiene en cuenta los valores de los parámetros geométricos y articulaciones de los elementos del robot.

**Cinemática Inversa:** Consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot, para que su extremo se posicione y oriente según una determinada configuración deseada.

**Efactor final:** Se refiere a un dispositivo de en el extremo de un brazo o sistema robótico que interactúa con el ambiente de trabajo.

**Gdl:** Grados de libertad.

**Haptics:** hace referencia al sentido kinestésico

**Kinestésico:** relacionado con la rama de la ciencia que estudia el movimiento humano, es decir percepción o sensación de movimiento.

**Transductor:** dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta a una magnitud física, propiedad o condición específica que se desea medir, generalmente se trata de un dispositivo utilizado para convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica.

## INTRODUCCIÓN

La robótica es una rama de la ingeniería que se encarga del diseño, construcción y programación de robots. Uno de los fines es crear sistemas que posean características semejantes a los seres humanos, que sirvan como elementos de utilidad para trabajos peligrosos donde la vida constantemente esté en riesgo, la noción actual de robótica implica una concepción de una máquina capaz de adaptarse a diferentes acciones con alta precisión.

Dentro de este trabajo se aborda el diseño de un prototipo de sistema háptico que integra un sistema maestro – esclavo. Se realiza una investigación de diferentes sistemas hápticos y sus características generales de diseño mecánico y funcionalidad, además se desarrolla el análisis de la dinámica y cinemática de un robot de dos grados de libertad.

Se proyecta un sistema háptico que utiliza piezas de un kit educativo de robótica, elementos electrónicos como motores de corriente continua y una tarjeta inteligente, además se ve la necesidad de diseñar y construir una estructura mecánica propia de un robot manipulador plano paralelo de dos grados de libertad, se ejecuta simulaciones en Matlab® donde se calcula la dinámica, cinemática y pruebas para validar el sistema utilizando análisis y procesamiento de imágenes. Se obtiene un sistema háptico en base a un sistema de robot manipulador plano paralelo de dos grados de libertad que ayudará a la enseñanza y aprendizaje de robótica y que además servirá para futuras investigaciones en el área de los robots manipuladores plano paralelos de dos o más grados de libertad.

Este documento está compuesto de nueve capítulos: Antecedentes, Metodología, Implementación y desarrollo, resultados, conclusiones, recomendaciones, referencias, bibliografía y anexos, en donde se da a conocer de una manera detallada del desarrollo del trabajo denominado Diseño y desarrollo de un sistema háptico para enseñanza y aprendizaje de robótica.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y desarrollar un prototipo de sistema háptico para enseñanza y aprendizaje en robótica.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Describir el estado del arte en las tecnologías hápticas y sus aplicaciones.
- Explorar la clasificación de las interfaces hápticas de acuerdo a sus características técnicas.
- Diseñar y desarrollar un prototipo de sistema háptico en donde se integran técnicas de control, programación, comunicaciones y diseño mecánico

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

El nacimiento de la robótica se les atribuye a los antiguos egipcios quienes diseñaron e incorporaron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses para representar algunas partes del cuerpo humano. La robótica actual comienza en el siglo XVIII, cuando el comerciante Joseph Jacquard, inventa una maquina textil programable con tarjetas perforadas, con el comienzo de la revolución industrial se da un desarrollo en la industria debido a la tecnificación de las empresas, en esta época los robots eran llamados autómatas porque tenían las características y movimientos de un ser animado. En el año de 1920, la palabra Robot se introdujo en la literatura por el Checoslovaco Karel Capek, quien la utilizo por primera vez en su obra de teatro llamada "Robots Universales de Rossum" (Albala, David, 2007), a partir de esta obra se escribieron varios libros con la temática de robots, los cuales actuaban en contra de los humanos. Uno de los principales escritores de este tipo de literatura fue Isaac Asimov quien escribió tres leyes de la robótica que se las utiliza en las obras de ciencia ficción:

- Un robot no hará daño a un ser humano, por inacción, permitir que un ser humano sufra daño.
- Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, excepto si estas leyes entraran en conflicto con la primera ley.
- Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no entre en conflicto con la primera y segunda ley.

La tecnología militar desarrollada en la segunda guerra mundial produjo un gran avance en el campo de la robótica, se crearon dispositivos electrónicos que utilizaban electrones u otros portadores de carga confinados dentro de un material sólido, los cuales se conocían como electrónica de estado sólido. "Lo anterior combinado con la ciencia ficción origina la creación de una máquina de propósito general la cual tenía una aplicación original o una vasta diversidad de aplicaciones, en donde el control cíclico es deseado". (Sanchez, 2002).

En 1946 George C. Devol patentó un dispositivo para controlar maquinas, Devol experimento con la automatización hasta conseguir otro invento en 1954, en cuya patente redacto lo siguiente: "*el presente invento, hace posible que por primera vez una máquina de más o menos propósito general cuya aplicación es universal, se desempeñe de una manera deseada*" (Sanchez, 2002). Este invento fue llamado *Universal Automation*, con esto se consolido el nacimiento del Robot Industrial (Figura. 1 Universal Automation).

**Figura 1. Primer robot industrial construido.**



Fuente: [www.robotics.org/joseph-engelberger/timeline.cfm](http://www.robotics.org/joseph-engelberger/timeline.cfm)

La utilización de los robots en la industria fue creciendo debido a que estos eran capaces de realizar tareas de manufactura, pintura y soldadura. En 1969, General Motors incorporo de manera permanente robots para ensamblar autos (Albala, David, 2007). En 1967, Japón Importo su primer robot industrial que fue utilizado en la industria automotriz y en 1972, Kawasaki instalo la primera línea robotizada, compuesta por robots *Unimation* en la planta de Nissan en Japón. Lo anterior introdujo en países como Japón y Estados Unidos progreso, evolución y un proceso de trasformaciones en donde se incrementó significativamente la productividad especialmente en la industria automotriz.

En los años setenta surgieron dos acontecimientos importantes que produjeron grandes transformaciones en el campo de la robótica, el primero fue en 1974 con la invención del primer brazo de robot controlado por una computadora llamado "*vicarm*", Unimation compró *Vicarm* en 1977 y utilizando dicha tecnología desarrolló el PUMA, Maquina Universal Programable para Montaje conocida por sus siglas en Ingles "*Programmable Universal Machine for Assembly, or Programmable Universal Manipulation Arm*" (R. Iñigo ; E. Vidal , 2002), (Figura 2. Puma "*Maquina Universal Programable para Montaje*") .

**Figura 2. Puma “Maquina Universal Programable para Montaje”**



Fuente. [www.robotics.org/joseph-engelberger/timeline.cfm](http://www.robotics.org/joseph-engelberger/timeline.cfm)

En 1979, se da un acontecimiento importante se crea un sistema cinemático de un robot en la Universidad de Yamanashi en Japón en conjunto con las empresas IBM y Sankio, el resultado fue el desarrollo el robot de configuración SCARA, Brazo Robot Para Montaje Selectivo, conocido por sus siglas en inglés “*Selective Compliant Assembly Robot Arm o Selective Compliant Articulated Robot Arm*”, el cual se sigue utilizando en la actualidad, debido a su funcionalidad y economía (A. Ollero , 2001) (Figura 3. Robot Tipo SCARA).

**Figura 1. Robot de Configuración SCARA.**



Fuente. [www.robothalloffame.org/inductees/06inductees/scara.html](http://www.robothalloffame.org/inductees/06inductees/scara.html)  
Carnegie Mellon University

Los procesos de automatización han venido avanzado vertiginosamente debido a su alta utilización en la industria, aspecto que se refleja en la eficiencia y en la producción de las empresas generando alta rentabilidad a menor costo; en la actualidad existen empresas como ABB, Mitsubishi, Panasonic, Epson que se dedican a la producción y comercialización de robots industriales, así mismo

existen centros de investigación e innovación en el área de la robótica e inteligencia artificial las cuales han creado nuevos prototipos de robots que han sido utilizados en la industria y la academia.

## **1.2 SISTEMAS HÁPTICOS**

La palabra “*Haptics*” hace referencia al sentido kinestésico. Las interfaces hápticas permiten al operador mantener la sensación de interacción con el entorno remoto. La diferencia en la frecuencia de las señales kinestésicas, visuales y sonoras, da como resultado que la realimentación háptica se combine fácilmente con la realimentación óptica o acústica (A. Jarillo, 2014) .

### **1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS HÁPTICOS**

Existen dos clasificaciones de dispositivos Hápticos:

- **Dispositivos de tres dimensiones.**

Permite tocar y manipular objetos virtuales tridimensionales los cuales se utilizan en simulaciones quirúrgicas o también para tele-manipulación en ambientes peligrosos (Martin, 2006). En el mercado existen interfaces hápticas de tridimensionalidad de tipo guante que facilitan al usuario tocar objetos generados por un ordenador y experimentar fuerzas de realimentación reales. Estos guantes tienen características táctiles y son apropiados en simulación virtual donde se requiere múltiples puntos de contacto, libertad de movimiento, e información del estado para sujetar objetos y texturas mecánicas, son más ligeros que los de realimentación de fuerza y típicamente usan vibradores electromecánicos para transmitir los datos de textura.

- **Dispositivos de dos dimensiones.**

De tipo lápiz o ratón. Este tipo de sistema permite al usuario sentir texturas de objetos de dos dimensiones, sirven como apoyo para usuarios de ordenador que son invidentes o con limitaciones de vista. Este sistema puede proporcionar un sentido del tacto en objetos bidimensionales como imágenes de mapas o dibujos (Lopez, 2007).

## **1.3 DISPOSITIVOS HÁPTICOS SEGÚN EL OBJETIVO DE DISEÑO**

- **Sistemas diseñados específicamente para una sola aplicación.**

En este sistema se han optimizado sus características, en esta clasificación se encuentran los diseños para aplicaciones médicas.

- **Dispositivos de propósito general.** Con ellos se busca mayor versatilidad en las aplicaciones, de manera que necesitarán de alguna pequeña modificación y que son fácilmente adaptable a varios roles y propósitos (**Lopez, 2007**).
- **Dispositivos que son construidos con la forma de un robot.** Estos son tele- manipulados, normalmente para aplicaciones con robots industriales como el WYSIWYF (**Yokokohji, Hollis, & Kanade, 1999**), donde se utiliza un Robot PUMA 560 (**Parejo, 2008**) como dispositivo háptico (**Macia, 2000**).

#### 1.4 TECNOLOGÍAS DE SISTEMAS HÁPTICOS

- **Indicadores de superficie activa.** Tratan de presentar una primera aproximación al sentido del tacto, de manera que se definen las variaciones en una superficie simulada mediante la activación de micro-actuadores, este display se divide en tres categorías (Martin, 2006) :
- ***Feelex Haptic Screen.*** Sobre una superficie de actuadores se posiciona un objeto o una mano, los actuadores recogen la interacción con el objeto y este proyecta una imagen sobre una pantalla en una superficie definida (Martin, 2006).
- ***Tactile Shape Displays for Small Scale Shape Feedback.*** Es un display hecho de una superficie sobre una fila de actuadores. A medida que se pasa un objeto o la mano por la línea de los actuadores se recoge la modificación de la superficie (Martin, 2006).
- ***Elastic Force Sensor.*** Este sistema utiliza un sensor de fuerzas que permite el modelado de piezas o de formas en tres dimensiones (Martin, 2006).

#### 1.5 EJEMPLOS DE DISPOSITIVOS HÁPTICOS

- **Brazos Hápticos.** Mecanismos constituidos por varios brazos que permiten el movimiento del extremo del dispositivo a lo largo de un espacio de trabajo (Martin, 2006).
- ***Sarcos Dextrous Arm.*** Este dispositivo tiene 10 grados de libertad y una compleja estructura dinámica, a medida que el usuario actúa sobre una serie de sensores de movimientos situados sobre el brazo, donde cada acto se refleja en un movimiento del actuador (**Martin, 2006**).

- **Phantom.** Es un dispositivo háptico muy popular, utiliza una interfaz de realimentación háptica, posee seis grados de libertad, y tres actuadores eléctricos que sirven para posicionar virtualmente un punto en un espacio tridimensional (**Martin, 2006**).
- **WYSIWYF Display.** En este sistema se utiliza el robot PUMA como dispositivo háptico (**Yokokohji, Hollis, & Kanade, 1999**), se sitúa una pantalla portátil TFT, “*Thin Film Transistor*” para manipular el robot con un pequeño joystick, de manera que sigue los movimientos de la mano del usuario y se visualiza en la pantalla una recreación de movimiento virtual (**Martin, 2006**).
- **Haptic Master.** Es un brazo robótico con control de fuerza por admitancia, su comportamiento dinámico lo hace constructivamente muy singular, es un dispositivo comercial (**Martin, 2006**).
- **Force Dimension DELTA-OMEGA.** Son dispositivos hápticos de tres grados de libertad en translación para suministrar información kinésica y táctil con un gran espacio de trabajo (**Martin, 2006**).
- **Guantes.** El uso de guantes hápticos permitirá al diseñador manipular modelos y objetos mientras siente su dureza. Son muy útiles para la manipulación sobre grandes volúmenes, incluyendo simulación de objetos sin peso (**Martin, 2006**).
- **Exoesqueleto.** Es una especie de guante que permite cerrar completamente la mano, pero necesita remotamente actuadores en una caja de control, en algunos casos el peso del guante es bastante alto, lo cual produce fatiga con un uso prolongado (**Martin, 2006**).
- **Haptic Master.** Permite el movimiento de una superficie plana con varios grados de libertad dentro de un espacio de trabajo limitado (**Martin, 2006**).
- **Magnetic Levitation Haptic Interfaces.** Este dispositivo de interfaz háptico se basa en las fuerzas magnéticas de Lorentz. El usuario sujeta una manija que levita por el efecto de estas fuerzas, para interactuar con un ambiente virtual (**Martin, 2006**).
- **Cobot.** Es un robot para interacción física directa con un operador humano, dentro de un espacio de trabajo compartido. Uno de los dispositivos produce la realimentación de fuerza por medio de una rueda, y el otro emplea tres ruedas (**Martin, 2006**).

- ***The Pen Based Force Display***. Se trata de un pequeño dispositivo diseñado para ser usado con un actuador tipo lápiz o tipo dedo. Tiene tres grados de libertad, dos de ellos utilizados para posicionar y el tercero para simular un botón (Martin, 2006).
- ***Neumatic Haptic Interface***. El dispositivo es un manipulador unilateral de aluminio con cuatro uniones en rótula, de esta manera el usuario que este sentado realiza una serie de movimientos de su brazo, aplicando una manija, que son recogidos en el hombro y en el codo (Martin, 2006).
- **2DOF serial flexible joint**. Es un mecanismo serie de dos grados de libertad, es un modelo simplificado de brazo robótico que es utilizado para enseñar conceptos de control básico y avanzado. Es un sistema que sirve para diseñar algoritmos de control donde se busca posicionar un efector final o herramienta sobre un espacio y área determinada con vibraciones mínimas (Quanser, 2016).
- **Pantógrafo MK-II**. Es un instrumento háptico desarrollado por investigadores de la Universidad de McGill University, este dispositivo se basa en un mecanismo plano paralelo de dos grados de libertad (Gianni Campion, 2005).

## 1.6 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS HÁPTICOS

Las interfaces hápticas permiten una interacción humano-computadora estimulando el sentido del tacto a través de fuerzas, vibraciones o movimientos. Un ejemplo sencillo de estimulación háptica es el modo vibrador de los teléfonos móviles. En un entorno más general, las interfaces hápticas son bidireccionales, la estimulación temporal se da en respuesta a movimientos del usuario (Figura 4. Ejemplos de Interfaces Hápticas), el resultado permite incrementar el flujo de información entre la computadora y el usuario al percibir la sensación de tocar un objeto o de un efecto físico, como las fuerzas de torque empleadas en un proceso de ensamblaje.

**Figura 4. Ejemplo de interfaz háptica hombre-maquina.**



Fuente. [www.msl.ri.cmu.edu/projects/haptic/](http://www.msl.ri.cmu.edu/projects/haptic/)

Las interfaces hápticas al comienzo eran sumamente costosas y solo se las utilizaba en ambientes científicos e industriales para simulación o modelado, el avance de estos sistemas ha provocado el surgimiento de interfaces hápticas de bajo costo, un ejemplo son los juegos de computadora en donde se utilizan manijas, volantes y pedales con retorno de fuerza para dar una mayor sensación de realismo todo esto sirve para aumentar la experiencia del usuario. A través del sentido del tacto se puede informar sobre elementos que podrían pasar desapercibidos a la vista, por lo que se han incorporado sistemas hápticos a interfaces multimodales en aplicaciones multidimensionales, minería de datos, microscopios y escáner. Estas interfaces aun presentan muchos retos a resolver como por ejemplo: problemas de sincronización cuando se trabaja con muchos grados de libertad o al momento de manipular múltiples objetos a la vez en un

ambiente virtual. También presenta resultados satisfactorios en ambientes donde se requiere de alta sensibilidad como por ejemplo: intervenciones quirúrgicas remotas o manipulación de órganos vivos.

### 1.6.1 APLICACIONES MÉDICAS

- **Interfaces Cerebro-Computadora.** Durante la década de los años sesenta se demostró que la actividad cerebral captadas por un electroencefalógrafo correspondían a eventos de procesos cognitivos; se consideró la idea de utilizar estas señales para controlar dispositivos, o bien para medir el desempeño de los usuarios. Con los avances en neurociencias, neurobiología, robótica y ciencias computacionales se comenzaron a dar los primeros resultados satisfactorios. Las interfaces Cerebro-Computadora son dirigidas especialmente a personas con alguna discapacidad física, de acuerdo a la forma en que interactúan con el cerebro, se pueden clasificar en tres categorías:
  - **Invasivas.** Se implantan directamente en la materia gris del cerebro. La calidad de la interacción es muy alta, pero algo negativo es el riesgo de causar infecciones. En algunos casos se puede sufrir rechazos del implante, también debido a la plasticidad del cerebro, los electrodos pueden dejar de funcionar.
  - **No invasivas.** Captan la actividad neuronal mediante dispositivos externos y métodos indirectos. Son las más seguras pero el cráneo genera interferencia en las señales, lo que causa dificultad determinar el área específica de donde provienen. La técnica invasiva más utilizada es la electro-encefalografía (EEG).
  - **Parcialmente invasivas.** Es la mezcla de las dos técnicas anteriores, se colocan bajo el cráneo sin penetrar el cerebro, reduciendo los riesgos de las invasivas y generando una mejor calidad de señal que las no invasivas.
- **Prótesis Neuronales.** Las neuro - prótesis o implantes neuronales consisten en la integración de dispositivos electrónicos con el sistema nervioso con el fin de aumentar, restaurar o modificar su funcionalidad, a continuación se presentan algunos resultados exitosos en el campo médico aplicados a los sistemas óptico, auditivo y motor.
  - **Prótesis Visuales.** Básicamente se han desarrollado tres tipos de prótesis visual:
  - **Implantes en la corteza visual:** Existen 35 centros de visión en el cerebro humano: el encargado de reconocer patrones gruesos, es la llamada corteza

visual primaria y es en esta región en la que se ha experimentado con implantes visuales. Desde 1968 se encontró que al aplicar impulsos eléctricos directamente en la corteza visual a pacientes ciegos, éstos percibían formas luminosas llamadas fosfenos.

- **Implantes Epi-retinales:** En este tipo de sistemas existe un arreglo de electrodos que se implantan a los axones del nervio óptico en la retina. Una videocámara toma las imágenes que son procesadas por una pequeña computadora que envía pulsos eléctricos a los electrodos los cuales generan impulsos transportados por el nervio óptico hacia el cerebro.
- **Implantes sub-retíales:** Estos sistemas no requieren de cámaras o procesadores externos. Basado en un circuito delgado formado por un arreglo de foto celdas conectadas a micro electrodos y que sustituyen la función de los conos y bastones dañados en la retina. La estimulación realizada por la luz llega al ojo, generando impulsos eléctricos capturados con el nervio óptico. Se espera que con los avances en nanotecnología estos implantes mejoren en los siguientes años.
- **Prótesis Auditivas.** La neuro-prótesis auditivas buscan compensar la pérdida auditiva cuando la cóclea es incapaz de transformar señales auditivas en impulsos neuronales. Esta prótesis está formada por un micrófono que capta las señales sonoras y las envía a un procesador de voz, este dispositivo envía impulsos eléctricos a un arreglo de electrodos conectados al nervio auditivo. El cerebro se adapta a la prótesis y aprende a interpretar las señales artificiales. Lamentablemente la calidad de sonido es muy pobre en ambientes ruidosos.
- **Prótesis Motoras.** Las prótesis neuro motoras buscan sustituir o reestablecer funciones motoras de personas discapacitadas. Sensan la actividad generada cuando se tiene la intención de realizar algún movimiento y emiten señales hacia dispositivos externos o hacia extremidades del cuerpo para que la acción deseada se realice. Un ejemplo de estas prótesis son los brazos biónicos que son implantados y estimulados con impulsos eléctricos generados por el deseo de mover el brazo. Los impulsos son tomados desde terminales nerviosas dirigidas al brazo faltante, aunque de forma limitada, el brazo artificial funciona como interfaz háptica.

En este tipo de sistema háptico se utiliza sensores en el brazo artificial que han sido conectados a un zona de la piel bajo el pecho que permite a los pacientes percibir un impulso. Se espera que con esta forma de retroalimentación que es superior a la obtenida únicamente por la vista, la plasticidad del cerebro asimile y acepte con mayor naturalidad las prótesis artificiales (Lebedev, Nicolelis, 2006).

**Figura 5. Sistema protésico-brazo biónico, prótesis de mano Michelangelo.**



Fuente. [www.ottobock.es](http://www.ottobock.es)

### **1.6.2 APLICACIONES INDUSTRIALES**

En el área industrial las interfaces hápticas conforman un componente de investigación relacionada con el campo de la robótica. Los avances registrados en este campo en las últimas décadas han impulsado el desarrollo de dispositivos que mejoren la comunicación hombre-máquina, facilitando la interacción entre ambos mediante la aplicación de sensaciones táctiles. La interacción háptica es un área de investigación relativamente nueva, dentro de la que varios grupos están desarrollando dispositivos que permiten al usuario la posibilidad de interacción física con un medio virtual o remoto. Las limitaciones del hardware de las interfaces reducen la fidelidad con la que se puede simular la interacción con el mundo real, por ejemplo precisión de los sensores, la capacidad de los actuadores o la transparencia de la transmisión mecánica empleada. Algo a tener en cuenta es la variabilidad de las características del usuario junto con la interfaz que pueden cambiar dinámicamente lo que hace que nos encontremos ante un sistema no lineal.

Las investigaciones se centran en referencia al desarrollo del software y hardware por retroalimentación de fuerzas, en donde se debe tener en cuenta la seguridad del operario ante un mal funcionamiento del dispositivo. Lamentablemente las interfaces proporcionan sensaciones en un área limitada, normalmente en el extremo de los dedos, por lo que se hacen necesarios estudios que identifiquen los tipos de retroalimentación de tipo táctil para aplicaciones específicas dentro de la industria en donde se desarrolle una tecnología adecuada.

**Figura 2. ROBOT COBOT.  
Sistema háptico en la industria del diseño y modelado.**



Fuente. [www.rethinkrobotics.com](http://www.rethinkrobotics.com)

### **1.6.3 APLICACIONES EN LA EDUCACIÓN**

Las aplicaciones de sistemas hápticos en la educación se relacionan con las habilidades motrices en donde se utiliza el sentido del tacto de manera propositiva, activa, voluntaria y donde se accede a la información utilizando las manos y dedos (S. Ballesteros, 1994), entregando información acerca de posiciones relativas, facilitando información posicional y kinestésica proporcionada por articulaciones, músculos y tendones (J. Rubilar Medina, 2014).

Existen investigaciones que se centran en el análisis de los distintos dispositivos que le permiten al ser humano interactuar con un mundo virtual, un propósito fue promover la enseñanza del idioma inglés en México (M. A. Garcia Ruiz, 2010). Para enseñanza y aprendizaje de matemáticas se ha desarrollado un sistema que consiste en un tablero que simboliza un plano cartesiano sobre el que se colocan piezas que representan funciones matemáticas. El diseño está optimizado para facilitar el aprendizaje interactivo por medio de actividades hápticas, el dispositivo es utilizado principalmente para personas con discapacidad visual (Eduardo E. Rodríguez, 2016).

### **1.6.4 LA ROBÓTICA EN COLOMBIA**

Durante las dos últimas décadas Colombia ha demostrado un avance significativo en la investigación que se dedica a la robótica, siendo una gran herramienta en la educación dentro de las Universidades y Colegios, los docentes que estudian y trabajan este tema se encargan de aplicar conocimientos para enseñar robótica con sencillos prototipos en donde se introduce al estudiante en el mundo de la

mecánica, la electrónica y la programación, en las Universidades se trabaja en Laboratorios modernos en donde se diseñan robots aéreos, de competencia, de seguridad, industriales y para la agricultura, además se cuenta con plataformas robóticas educativas como Lego® o Vex Robotics® que facilitan el aprendizaje y enseñanza dentro de las aulas de clase.

En Colombia hay grupos de investigación que se destacan en la creación de robots que son utilizados para competencias, seguridad industrial, educación y agricultura. Un ejemplo de esta investigación es el Grupo de Robótica de la Universidad de Nariño, quien ha venido trabajando en este tema en beneficio de la educación y de la investigación en el departamento de Electrónica de la Universidad de Nariño. En el año 2015 se viene ejecutando el proyecto de Robótica denominado: “Desarrollo y promoción de competencias científicas y tecnológicas en robótica e informática en la universidad de Nariño y establecimientos del municipio de Pasto, departamento de Nariño”, en el cual se impulsa el desarrollo de la Robótica en la academia generando habilidades útiles en los maestros para la enseñanza de esta rama de la ingeniería, con el proyecto se pretende la creación y apropiación de tecnología para la construcción del conocimiento y así promover el desarrollo de la región. (Fajardo, 2016).

## 2 METODOLOGÍA

El desarrollo del sistema háptico para enseñanza y aprendizaje de robótica es un trabajo sistemático que involucra matemáticas, física, electrónica y programación. Se espera crear un prototipo de robot que permitirá dibujar en dos dimensiones percibiendo la fuerza aplicada por un operador. Este sistema se desarrolló en 13 etapas que posteriormente serán unificadas en un solo mecanismo.

### 2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Se realizó consultas en bases de datos especializadas como IEEE Xplore®, en donde se encontró información relevante sobre sistemas hápticos enfocados en la industria, la medicina y educación sobre todo en el tema de enseñanza y aprendizaje de robótica, se recopiló un amplio contenido bibliográfico que sirvió de base para la planificación, desarrollo y operación de este sistema.

### 2.2 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS.

El sistema requiere de las siguientes características:

- Sistema maestro-esclavo de 2 gdl, no se requiere de otra dimensión.
- Dispositivo cuya utilidad será enfocada para enseñanza y aprendizaje de fundamentos básicos de robótica, utilizando piezas de un kit Lego®.
- Su principio de control estará basado en realimentación de fuerza.
- La área máxima de trabajo será de 100 mm x 100 mm.
- Contará con una fuente de alimentación de 5~8 voltios.
- Incorporará un sistema inteligente o embebido.
- El dispositivo será diseñado para trabajar con fuerzas máximas a 7 Newton (Deniz, 2006).

El sistema háptico maestro-esclavo se basará en la siguiente arquitectura:

Figura 7 . Arquitectura sistema háptico maestro - esclavo

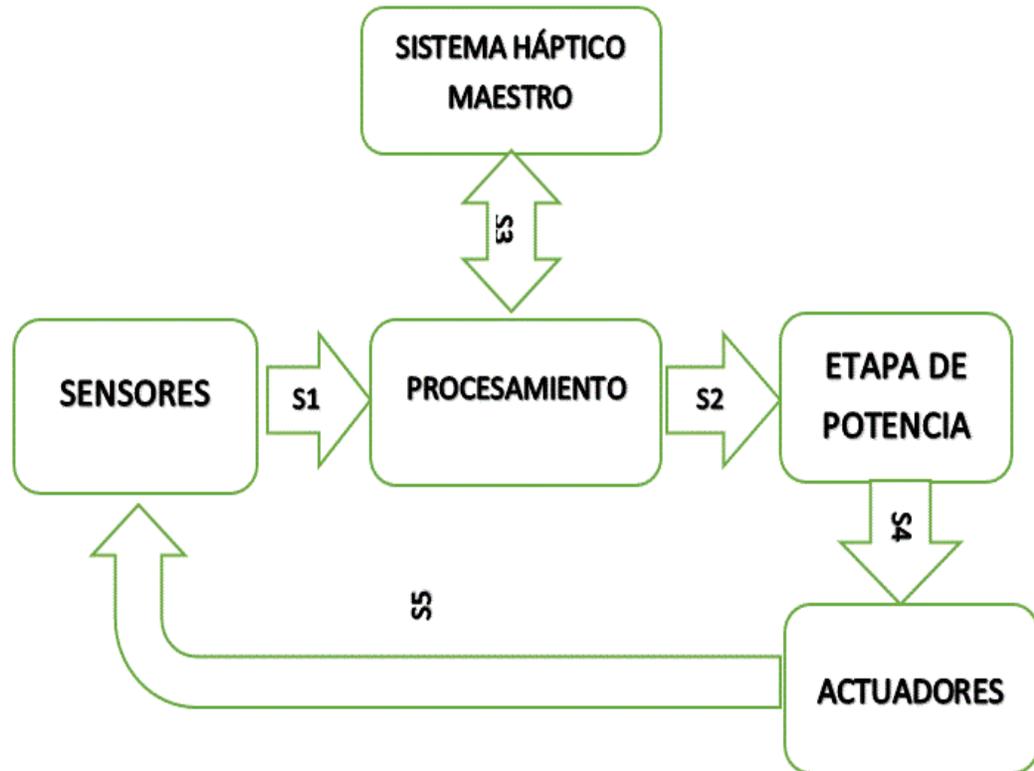


Fuente esta investigación.

A continuación se muestran los dos esquemas que componen el sistema háptico.

### 2.3 DIAGRAMA ESCLAVO

Figura 8. Esquema sistema esclavo



Fuente esta investigación.

Donde:

S1: canal de comunicación, protocolo RS232.

S2: señal de modulación por ancho de pulso *PWM*.

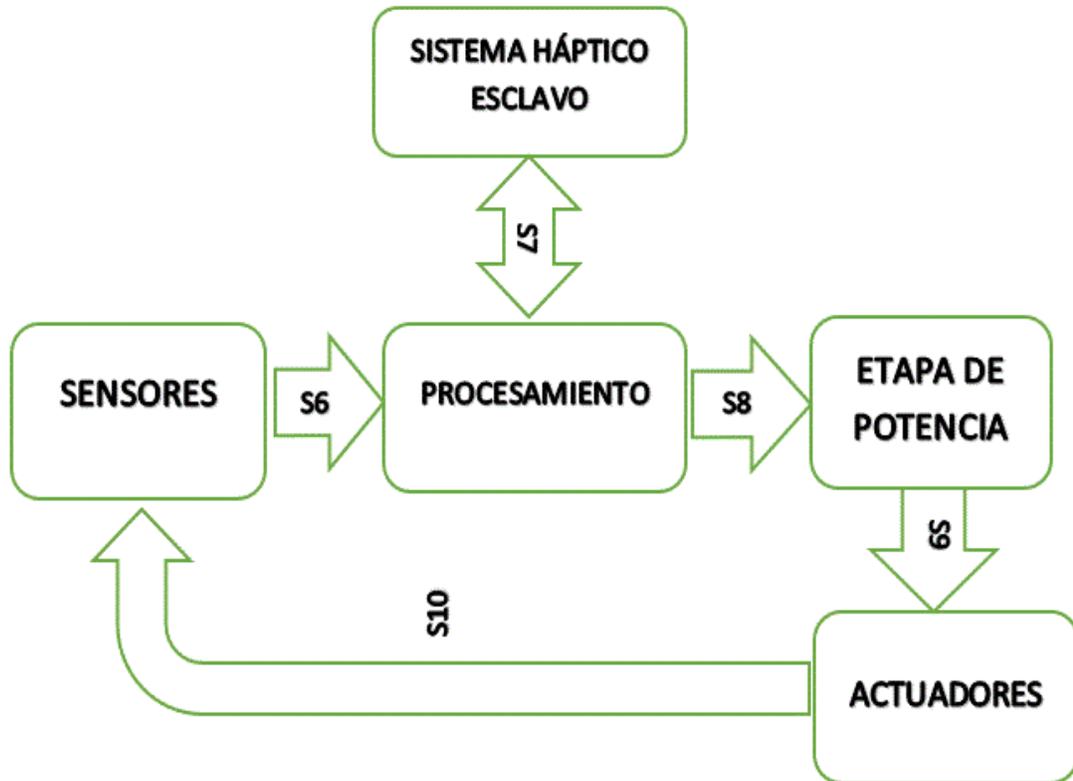
S3: señal sensor de posición angular.

S4: señal de potencia.

S5: Transductor de posición angular

## 2.4 DIAGRAMA MAESTRO

Figura 9. Esquema sistema maestro.



Fuente esta investigación.

Donde:

S6: canal de comunicación, protocolo RS232.

S7: señal de modulación por ancho de pulso *PWM*.

S8: señal sensor de posición angular y de fuerza.

S9: señal de potencia.

S10: Transductor de posición angular.

Analizando la revisión bibliográfica se elige la información obtenida del dispositivo "*The Pantograph Mk-II: A haptic instrument*", que es una estructura paralela de dos grados de libertad (Gianni Campion, 2005). Las ventajas de esta estructura son:

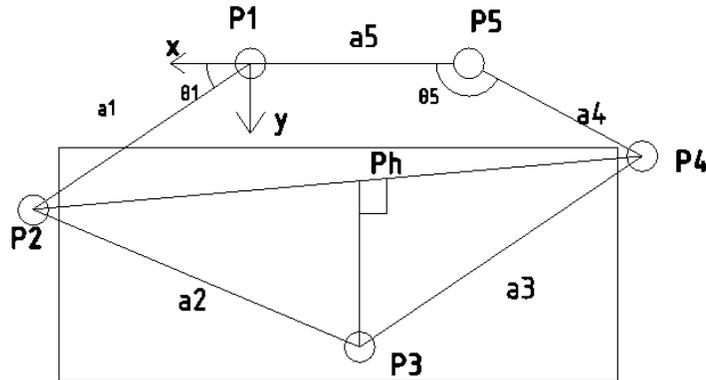
- Bajo costo de construcción
- Portátil
- Relativamente fácil de usar y programar
- Buena fuerza de trabajo
- Área de trabajo razonable

De la información obtenida se realizó un análisis matemático, con el fin de obtener las ecuaciones de cinemática y dinámica que serán de utilidad para elaborar el algoritmo de control del sistema háptico maestro-esclavo que se propone en esta investigación.

## 2.5 ANÁLISIS CINEMÁTICA DIRECTA

El problema de la cinemática directa del pantógrafo consiste en encontrar la posición del punto  $P_3$ , a partir de la medición de los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_5$ . Uno de los enfoques para la resolución del problema es que en  $P_3$  se ubica la intersección de dos círculos de radio  $a_2$  y  $a_3$ , centrados en  $P_2$  y  $P_4$  respectivamente, donde se centran con respecto a  $P_1$ .

Figura 10. Modelo cinemático para la resolución directa del problema.



## Cinemática Directa

Fuente esta investigación.

Las coordenadas de  $P_2$  y  $P_4$  están dadas por:

$$P2(x_2, y_2) = [a_1 \cos(\theta_1), a_1 \sin(\theta_1)] \quad (1)$$

$$P4(x_4, y_4) = [a_4 \cos(\theta_5) - a_5, a_4 \sin(\theta_5)] \quad (2)$$

Sea  $P_3 = (x_3, y_3)$  y  $P_h = (x_h, y_h)$  la intersección entre el segmento  $\overline{P_2P_4}$  y la altura del triángulo  $\overline{P_2P_3P_4}$ .

Con estos criterios se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\|P_2 - P_h\| = \frac{a_2^2 + a_3^2 + \|P_4 - P_2\|^2}{2\|P_4 - P_2\|} \quad (3)$$

$$P_h = P_2 + \frac{\|P_2 - P_h\|}{\|P_2 - P_4\|} (P_4 - P_2) \quad (4)$$

$$\|P_3 - P_h\| = \sqrt{a_2^2 - \|P_2 - P_h\|^2} \quad (5)$$

Con el desarrollo de las ecuaciones (3), (4) y (5) se obtienen las coordenadas del efector final en  $P_3(x_3, y_3)$ :

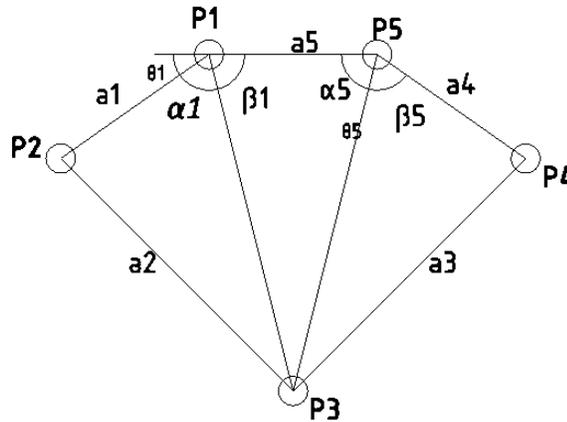
$$x_3 = x_h + \frac{\|P_3 - P_h\|}{\|P_2 - P_4\|} (y_4 - y_2) \quad (6)$$

$$y_3 = y_h - \frac{\|P_3 - P_h\|}{\|P_2 - P_4\|} (x_4 - x_2) \quad (7)$$

## 2.6 ANÁLISIS CINEMÁTICA INVERSA

Los manipuladores paralelos con frecuencia tienen una cinemática inversa, aunque en ciertas ocasiones se presenten singularidades, pero para el pantógrafo es la excepción. El problema a solucionar es encontrar los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_5$  dada la posición del punto  $P_3$ . Para este caso tomamos el ejemplo de un pentágono que se divide en 3 triángulos (véase figura 9).

Figura 11. Modelo cinemático para la resolución inversa del problema.



### Cinematica Inversa

Fuente esta investigación.

De este modelo se tiene:

$$\theta_1 = \pi - \alpha_1 - \beta_1, \theta_5 = \alpha_5 + \beta_5 \quad (8)$$

Donde:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{a_1^2 - a_2^2 + \|P_1 - P_3\|^2}{2a_1\|P_1 - P_3\|}\right) \quad (9)$$

$$\beta_1 = \arctan2(y_3, -x_3) \quad (10)$$

$$\alpha_5 = \arctan2(y_3, x_3 + a_5) \quad (11)$$

$$\beta_5 = \arccos\left(\frac{a_4^2 - a_3^2 + \|P_5 - P_3\|^2}{2a_1\|P_5 - P_3\|}\right) \quad (12)$$

Los valores de  $\alpha_1$  y  $\beta_5$  deben tomar valores mayores a 0 para que el efector final se ubique en el espacio de trabajo permitido.

## 2.7 DINÁMICA DEL SISTEMA HÁPTICO

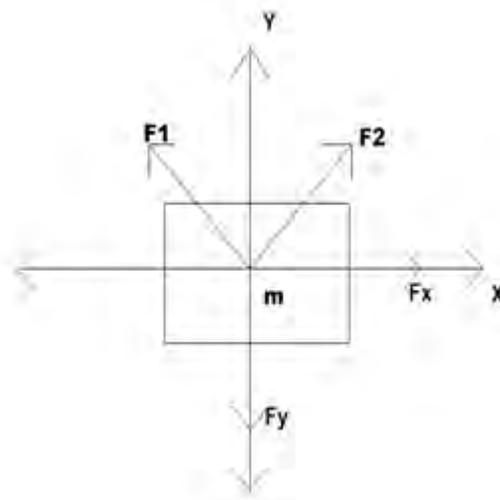
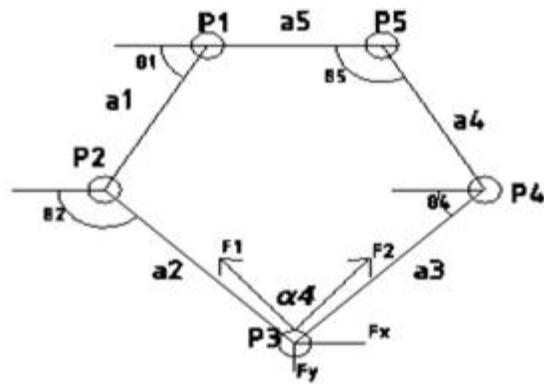
El sistema propuesto en esta investigación tiene como base la dinámica de un manipulador plano paralelo de dos grados de libertad, en la figura 12 se muestra el plano de un sistema que puede desarrollar utilizando los siguientes métodos:

- Método de Euler – LaGrange
- Método de Newton – Euler

Para toda construcción de robots es necesario obtener el modelo dinámico del sistema, en esta investigación no se realiza en forma detallada la obtención del modelo dinámico ya que es uno de los aspectos complejos de la robótica siendo no pedagógico para las personas que inician en el área (Toro, Silva-Ortigoza, & Ramos-Silvestre, 2011) (Ider, 2008).

Por tanto dentro de la investigación se considerara las fuerzas estáticas que son calculadas de acuerdo al área de trabajo que se eligió anteriormente. Teniendo en cuenta lo anterior se procede a realiza un análisis de fuerzas, el objetivo del análisis de fuerza es encontrar los torques para cada motor que deben aplicarse para generar las fuerzas deseadas en  $P_3$  (figura 12). El sistema es dividido en un diagrama de cuerpo libre y se calculan las fuerzas que actúan sobre el efector en el sistema esclavo, como se indica la figura 12.

Figura 12. Análisis de fuerzas de cuerpo libre.



Fuente esta investigación.

Las ecuaciones para calcular los torques que se generan son las siguientes (Okamura, 2014) :

$$F_x = m * a_x = m * \ddot{x}$$

$$F_y = m * a_y = m * \ddot{y}$$

$$F_{ref} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

Donde se asume que  $m$  es una masa concentrada en el efector del sistema esclavo.

$$\theta_2 = \pi - \theta_1 - \arccos\left(\frac{a_1^2 - a_2^2 + \|\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_3\|^2}{2a_1a_2}\right) \quad (13)$$

$$\theta_4 = \theta_5 - \pi + \arccos\left(\frac{a_3^2 - a_4^2 + \|\mathbf{P}_5 - \mathbf{P}_3\|^2}{2a_3a_4}\right) \quad (14)$$

Con los ángulos  $\theta_2$  y  $\theta_4$  se calculan las fuerzas  $F_2$  y  $F_4$ :

$$F_2 = \frac{F_x + F_y \cot \theta_4}{\sin \theta_2 \cot \theta_4 - \cos \theta_2} \quad (15)$$

$$F_4 = \frac{F_y + F_2 \sin \theta_2}{\sin \theta_4} \quad (16)$$

Y al final se calculan los torques:

$$\tau_1 = F_2 a_1 \sin(\theta_2 - \theta_1) \quad (17)$$

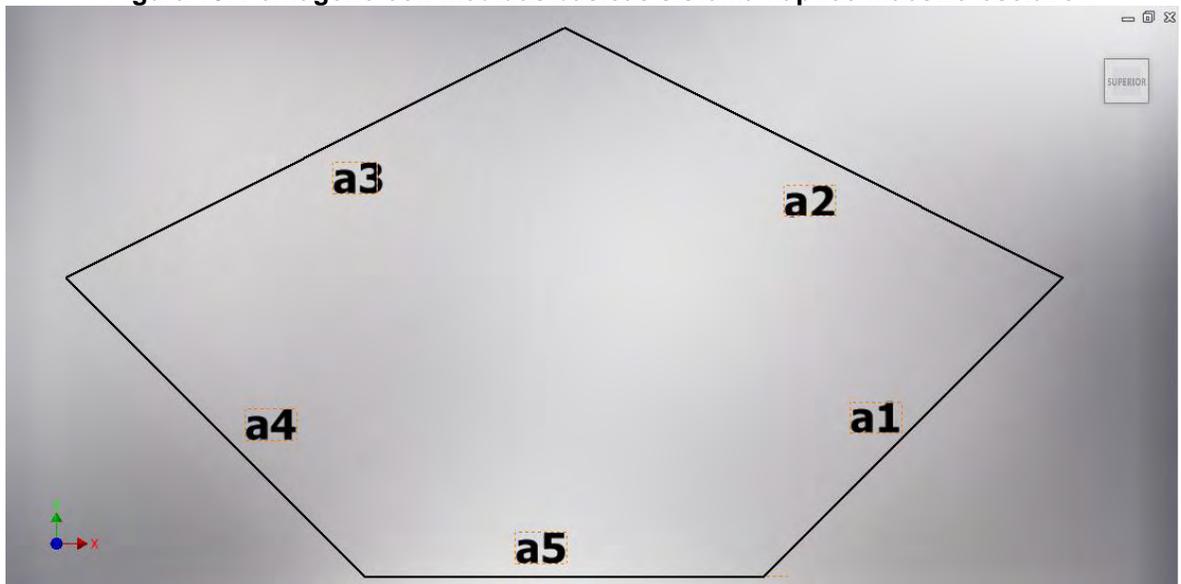
$$\tau_5 = -F_2 a_4 \sin(\theta_5 - \theta_4) \quad (18)$$

El análisis realizado anteriormente servirá para la aplicación del control, utilizando la cinemática inversa para encontrar las coordenadas de junta del sistema esclavo y calcular unos torques de referencia.

## 2.8 DISEÑO

### 2.8.1 DISEÑO MECANICO

Figura 13. Pentagono con medidas básicas sistema háptico maestro-esclavo



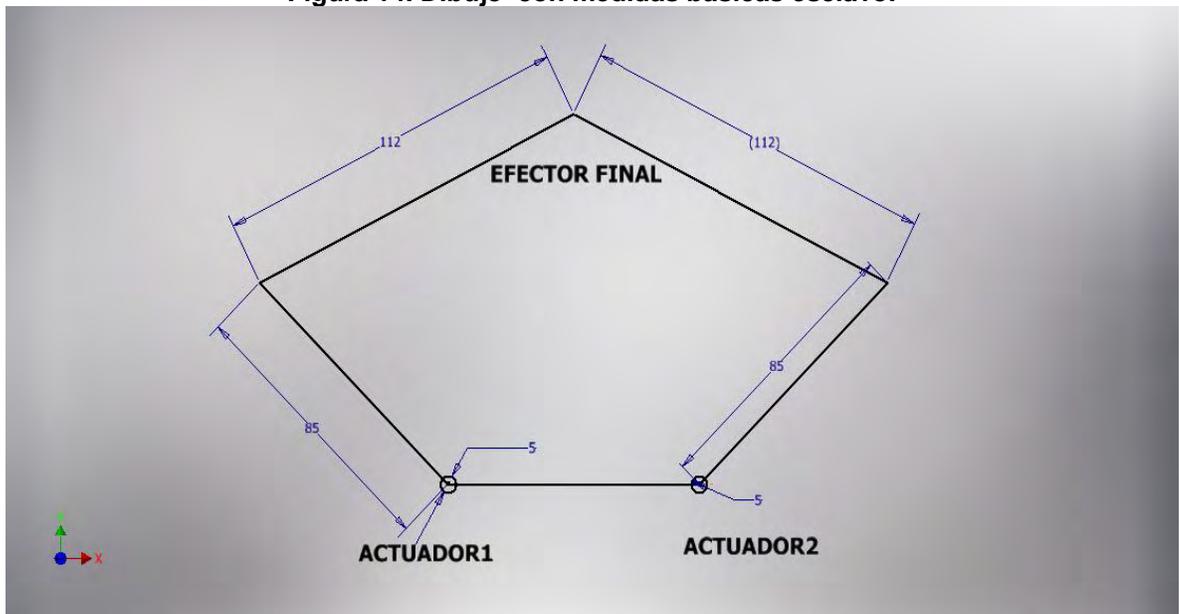
Medidas  $a_5=80$ ,  $a_4=85$ ,  $a_3=112$ ,  $a_2=112$  y  $a_1=85$ .  
Fuente esta investigación.

Las medidas de los dibujos de los componentes del sistema háptico maestro – esclavo se encuentran en milímetros.

### 2.8.2 SISTEMA ESCLAVO

Teniendo en cuenta las medidas de las fichas Lego® a utilizar se propone el siguiente esquema básico:

**Figura 14. Dibujo con medidas básicas esclavo.**



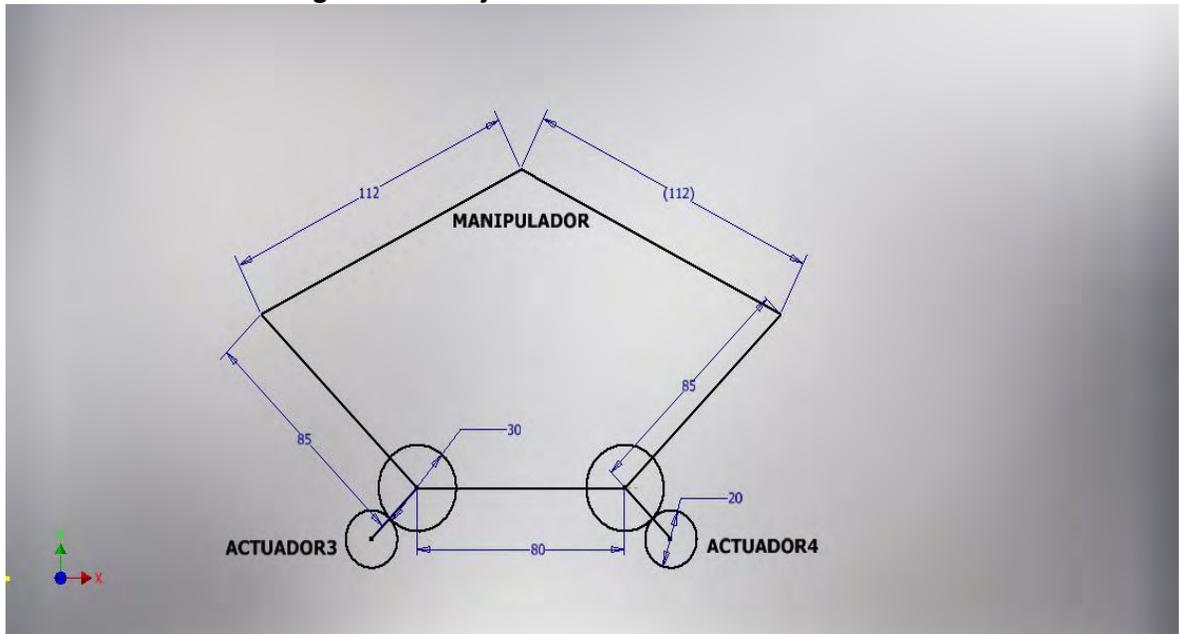
Fuente esta investigación.

Los actuadores 1 y 2 proporcionarán los ángulos de posicionamiento para el efector final.

### **2.8.3 SISTEMA MAESTRO**

El sistema se basaría de la siguiente forma:

**Figura 15. Dibujo con medidas básicas maestro.**



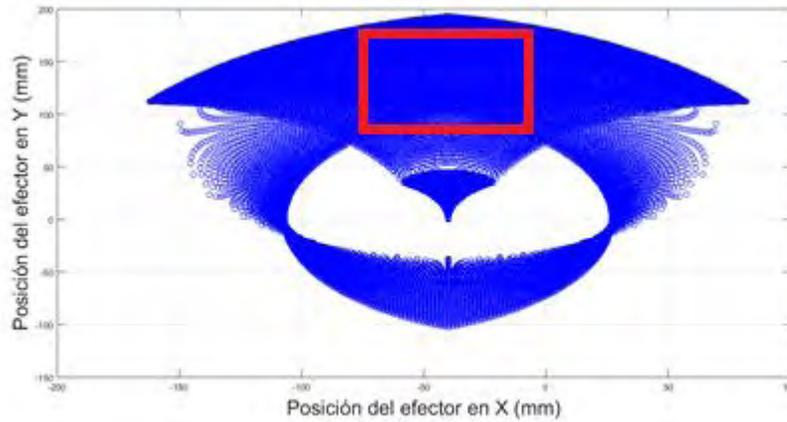
Fuente esta investigación.

En el sistema maestro los actuadores 3 y 4 entregarán el posicionamiento del manipulador y la realimentación de fuerza.

## **2.9 SIMULACION**

Para verificar el espacio de trabajo del sistema compuesto por un sistema maestro-esclavo, se utilizó el programa Matlab®. Se realizó simulaciones de cinemática directa con un barrido de cada ángulo de 0 a 180 grados, obteniendo la siguiente gráfica.

**Figura 16. Gráfico de Espacio de trabajo de los sistemas Maestro y Esclavo.**



Fuente. Esta investigación.

**Figura 17. Pantografo MK-II.**

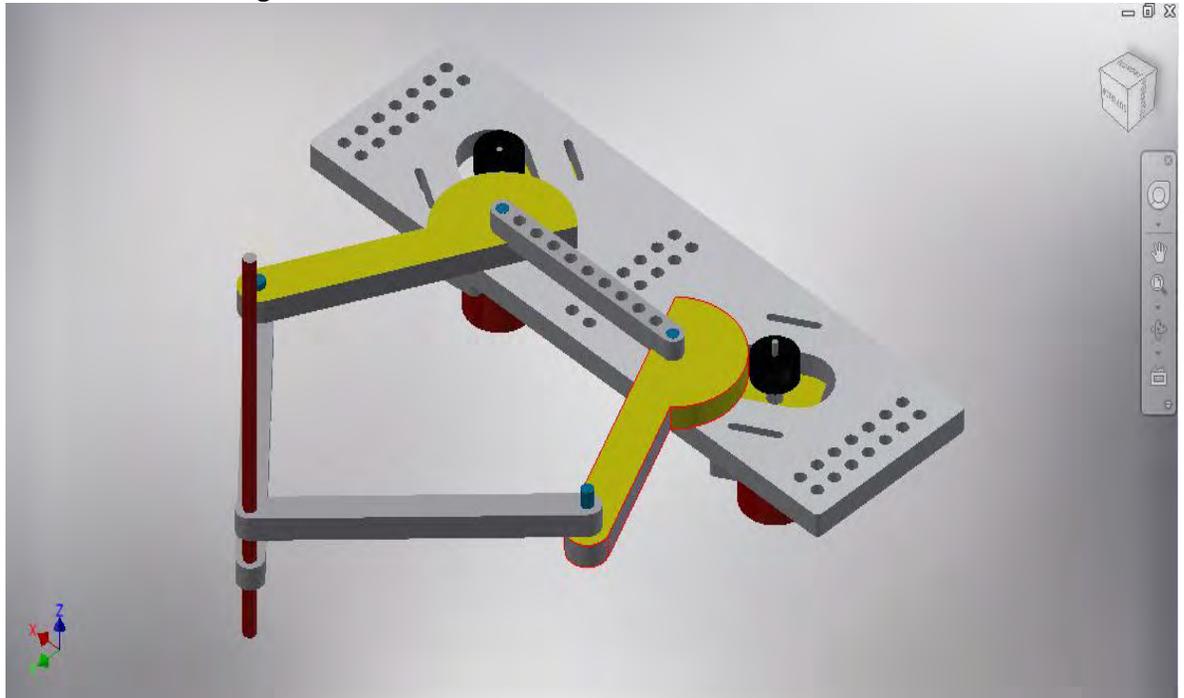


Fuente. [link.springer.com/chapter/10](http://link.springer.com/chapter/10).

Con el resultado de la simulación obtenemos una área de trabajo máxima de 70 mm x 70 mm, esta zona de trabajo se obtiene ingresando los datos de las medidas del pentágono de la figura 13.

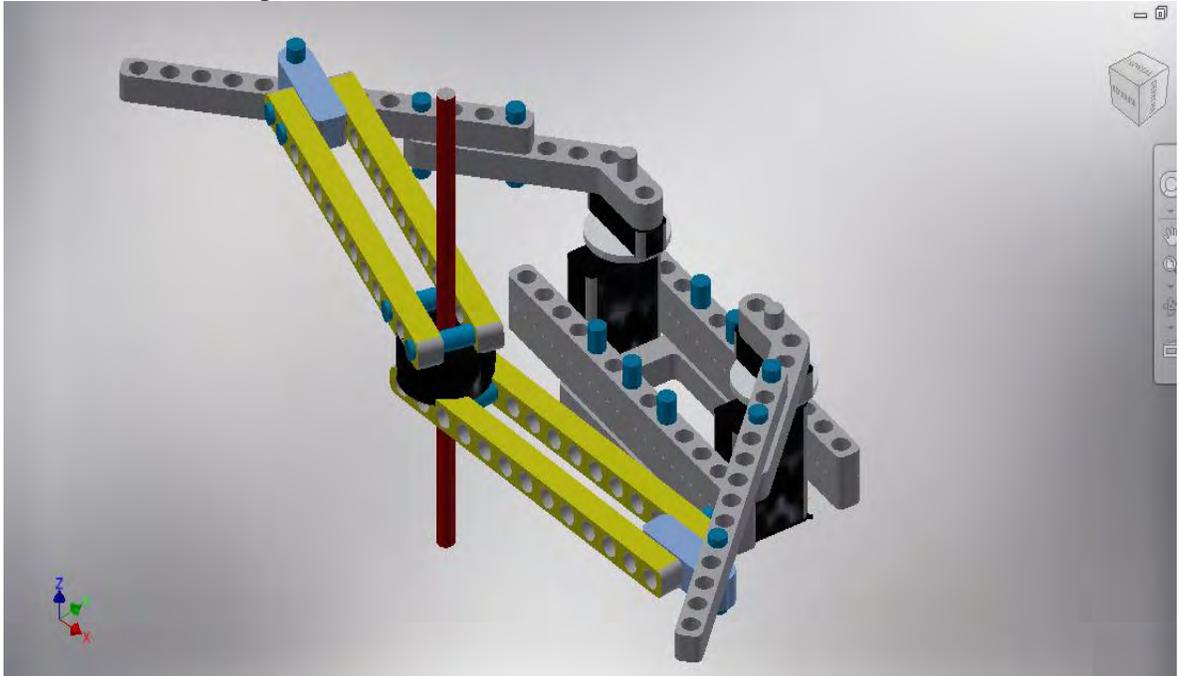
Además se realizó el diseño en 3 dimensiones para conocer la estructura final del sistema háptico Maestro-Esclavo con las medidas del pentágono de la figura 13.

Figura 18. Estructura sistema maestro en 3 dimensiones.



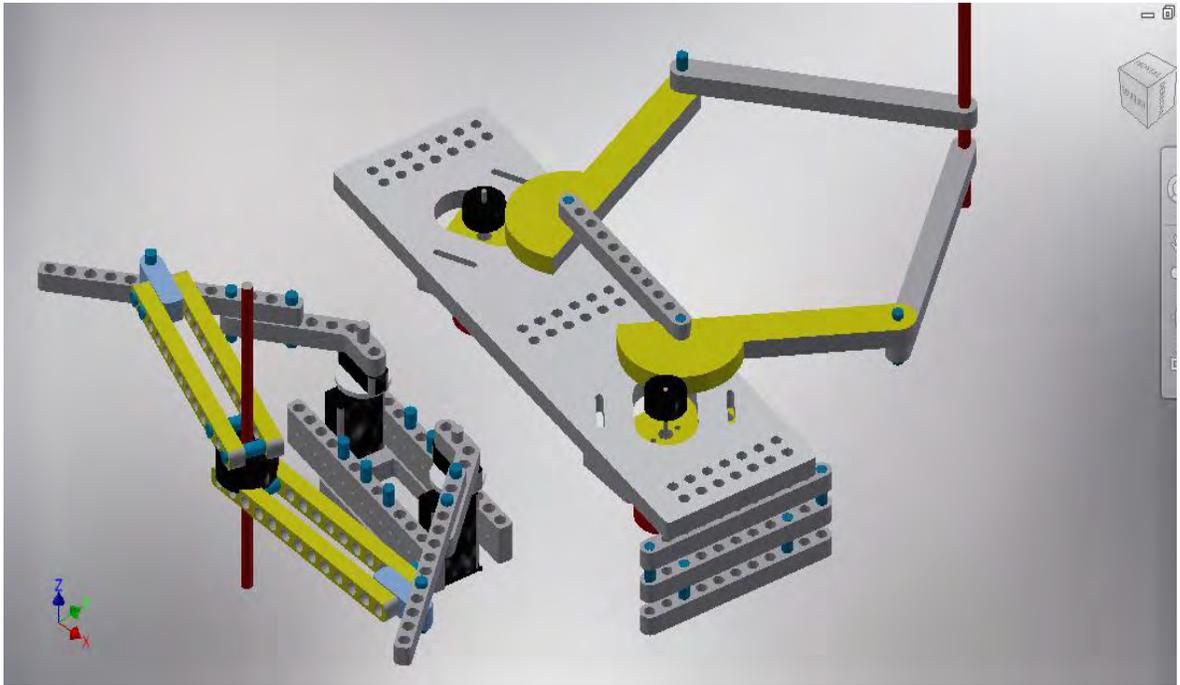
Fuente. Esta investigación.

**Figura 19. Estructura sistema esclavo en 3 dimensiones.**



Fuente. Esta investigación.

**Figura 20. Sistema háptico Maestro-Escavo.**



Fuente. Esta investigación.

## 2.10 ALGORITMO DE CONTROL

Los algoritmos de control que se utilizan para la mayoría de sistemas hápticos se basan en la siguiente estructura.

Figura 21. Estructura para el flujo de control bilateral.



Fuente esta investigación.

Donde:

$u_f$ : entrada de fuerza.

$u_p$ : entrada de posición.

$e_f$ : error de fuerza.

$e_p$ : error de posición.

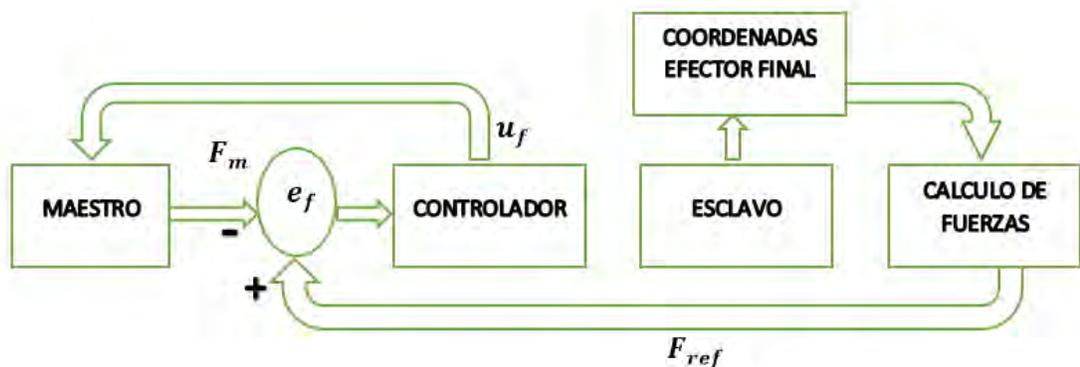
En esta estructura la posición del sistema maestro se envía al sistema esclavo como referencia de posición, mientras las fuerzas externas en el sistema esclavo se realimentan a lado maestro como referencia de fuerza, esto se denomina flujo de control bilateral.

Para el aprendizaje y enseñanza de robótica se examinará un algoritmo de control conocido como control de impedancia.

### 2.10.1 CONTROL DE IMPEDANCIA

El controlador de impedancia está orientado para establecer una relación dinámica deseada entre la posición del efector final y la fuerza a ejercer sobre el manipulador. La simplicidad en la implementación y la fácil comprensión en el sistema háptico hacen que este controlador cumpla con los requerimientos para la enseñanza y aprendizaje de conceptos básicos de robótica, debido a que cualquier usuario mueve el manipulador y el sistema reaccionara con una fuerza de ser necesario, en este sistema la entrada es desplazamiento y la salida es la fuerza ejercida en el maestro.

Figura 22. Controlador por impedancia.



Fuente esta investigación.

Donde:

$F_m$ : fuerza medida.

$F_{ref}$ : fuerza de referencia.

$u_f$  : entrada de fuerza.

**2.11 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA.** Para la elaboración del sistema háptico se utilizaron elementos electrónicos y elementos de un kit de robótica Lego®. A continuación se da a conocer en una tabla con los elementos utilizados:

**Tabla número 1. Elementos sistema háptico maestro-esclavo.**

<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>
2	Servomotor
2	Motor
1	Sensor
2	Reóstato
1	Tarjeta Arduino
1	Tarjeta Hapkit
1	Shield Arduino
1	Kit de robótica Lego
1	Fuente de Voltaje
1	Placa de Polimetilmetacrilato

- **Servomotor.** Es un motor eléctrico de corriente directa, una de sus características es la capacidad que posee para posicionarse en cualquier ubicación y mantenerse estable dentro de su rango de trabajo, puede ser controlado tanto en velocidad como en posición. El sistema háptico en la parte del sistema esclavo cuenta con dos servomotores que se encargan de proporcionar movimiento y posición al efector final, el voltaje aplicado es proporcional a la distancia que se necesita recorrer, el intervalo de operación es de 0 a 180 grados, su voltaje de funcionamiento es de 5 voltios y su corriente de operación es de 0.25 amperios. Se enfatiza que este elemento electrónico es frecuentemente utilizado en robótica debido a sus características como precisión, control de posición y velocidad.

Características Técnicas.

- Peso: 9g
- Dimensión: 23 × 12.2x27mm
- Par de torsión: 2.5kg /cm (4.8v)
- Tipo de engranaje: POM con fibra de carbono
- Velocidad de funcionamiento: 0.1 s / 60 grados (4.8v)
- Tensión de funcionamiento: 4.8v
- Rango de temperatura: 0 °C - 55 °C
- Ancho de banda muerto: 1us
- Longitud del cable servo: 25 cm

**Figura 23. Servomotor.**



Fuente: [www.didacticaselectronicas.com](http://www.didacticaselectronicas.com)

- **Motor.** Es una maquina rotatoria que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados por sus bobinas. El sistema háptico en la parte del maestro utiliza dos motores de corriente directa, su velocidad es controlada por modulación por ancho de pulso, para este caso la velocidad de los motores es baja, se realizará un movimiento aplicado desde el manipulador que producirá un giro en el eje de los motores.

**Figura 24. Motores de corriente directa.**



Fuente. [roboticagaleras.com](http://roboticagaleras.com)

- **Sensor de fuerza.** Es una resistencia variable que cambia su valor de acuerdo a la detección de fuerza aplicada sobre una membrana. La fuerza que puede percibir va desde un rango de 0 a 20 Newtons, para su correcto funcionamiento se utiliza una fuente de voltaje de 5 voltios, el valor de la resistencia es decreciente de acuerdo a la fuerza aplicada. El sensor de fuerza será ubicado en el sistema esclavo junto al efector final y

proporcionará una señal eléctrica, la fuerza detectada en el efector final será percibida en el manipulador.

Características técnicas.

- Longitud total: 1.75"
- Ancho total: 0.28"
- Rango de fuerza: 10gf~1Kgf
- Área sensible: 0.2"

**Figura 25. Sensor de fuerza.**



Fuente. [www.pololu.com](http://www.pololu.com)

- **Reóstato.** Es una resistencia variable, su principio se basa en la variación de resistencia para el control de variación de corriente. Con la variación del reóstato obtendremos los ángulos de movimiento producidos por el manipulador del sistema maestro.

**Figura 26. Reostato.**



Fuente: [roboticagaleras.com](http://roboticagaleras.com)

- **Tarjeta Arduino Uno.** Es una placa electrónica con un micro controlador de la marca Atmel®, arduino es una plataforma computacional física open-source basada en una simple tarjeta de entradas y salidas, cuenta con un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. El Arduino Uno puede ser utilizado para desarrollar objetos interactivos o puede ser conectado a software de computadora.

Características:

- Micro controlador ATmega328.
- Conversor de 8 bits.
- Voltaje de entrada 7-12V.
- 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
- 6 entradas análogas.
- 32k de memoria Flash.
- Reloj de 16MHz de velocidad.

El sistema háptico en la parte del esclavo utiliza una tarjeta arduino uno, que procesa las instrucciones que son almacenadas en su memoria, las cuales servirán para posicionar, desplazar y proporcionar velocidad a los servomotores que otorgarán movimiento al efector final, otra función será adquirir y procesar las señales provenientes del sensor fuerza.

**Figura 27. Tarjeta Arduino Uno.**



Fuente: [www.arduino.org/products/boards/arduino-uno](http://www.arduino.org/products/boards/arduino-uno)

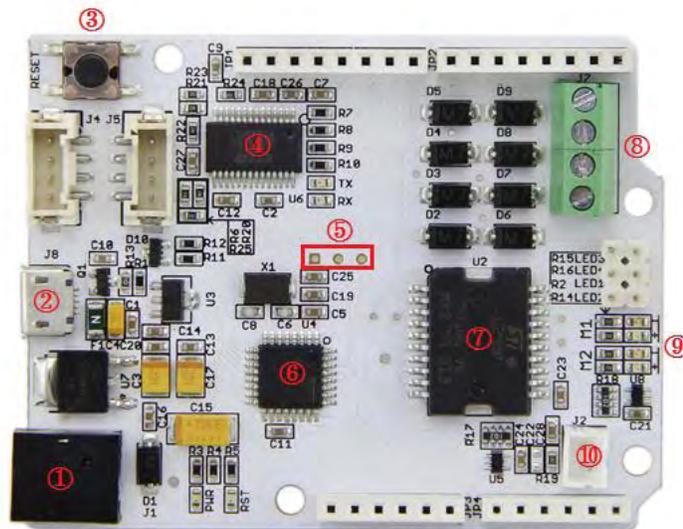
- **Tarjeta Hapkit.** El sistema embebido Hapkit cuenta con un micro controlador Atmega328p, es una tarjeta electrónica que incluye un driver de

potencia L298, que se encarga del control de giro de motores y cuenta con periféricos de entrada y salida. Hapkit permite a los usuarios movimientos de entrada en donde percibe fuerzas de un grado de libertad. En esta investigación la tarjeta electrónica hapkit hace parte del Maestro y procesa los datos de posición y ángulo del manipulador obtenidos mediante la variación del reóstato.

Características:

- Voltage : 5V ~ 15V
- Microcontrolador Atmega328p
- Adaptador de tarjeta micro SD (menos de 2 Gb).
- Máxima corriente de salida por canal 2 amperios.
- Rango de ciclo útil de salida *PWM* : 0%~100%.

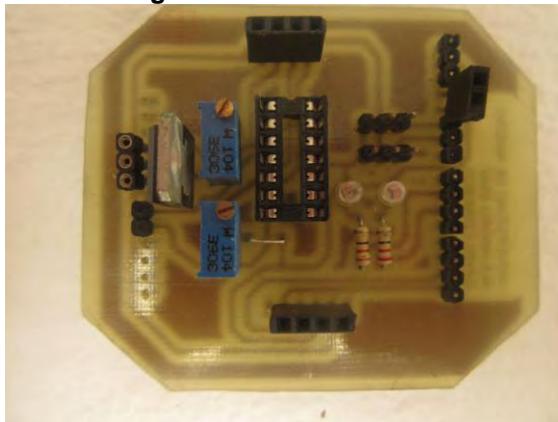
**Figura 28. Tarjeta Hapkit.**



Fuente: hapkit.stanford.edu.co

- **Shield Arduino.** Se desarrolló una tarjeta electrónica llamada *shield* o escudo, que servirá para facilitar las conexiones entre los sensores, servomotores y la tarjeta arduino, este elemento hace parte del sistema esclavo.

Figura 29. Shield arduino.



Fuente esta investigación.

- **Kit de robótica Lego.** Un kit de educación Lego® posee elementos básicos de robótica tales como sensores, servomotores y un sistema inteligente llamado ladrillo o en inglés *brick*. La versión educativa nace debido a la cooperación que existió entre la empresa Lego y el MIT “*Massachusetts Institute of Technology*”. Dentro del trabajo propuesto se utilizan partes del kit pero no Motores, sensores y ladrillo inteligente pero si las demás piezas que por la facilidad que se da al momento del ensamblaje forman parte del sistema háptico maestro-esclavo.

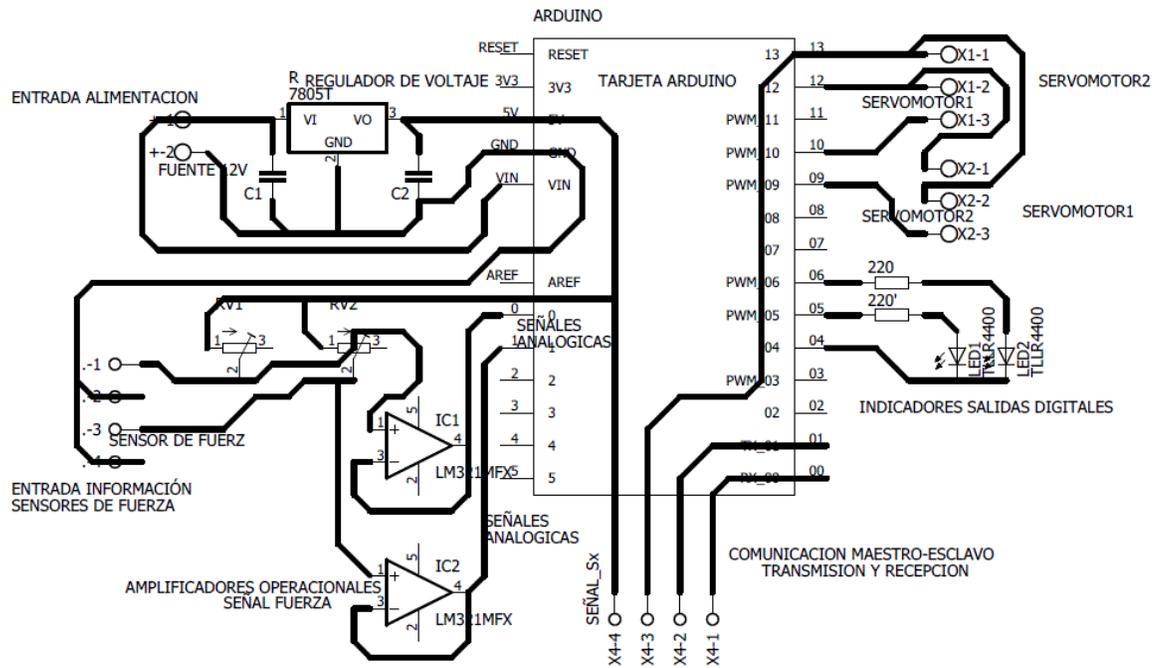




Fuente. Esta investigación.

## 2.12 DISEÑO ELECTRONICO

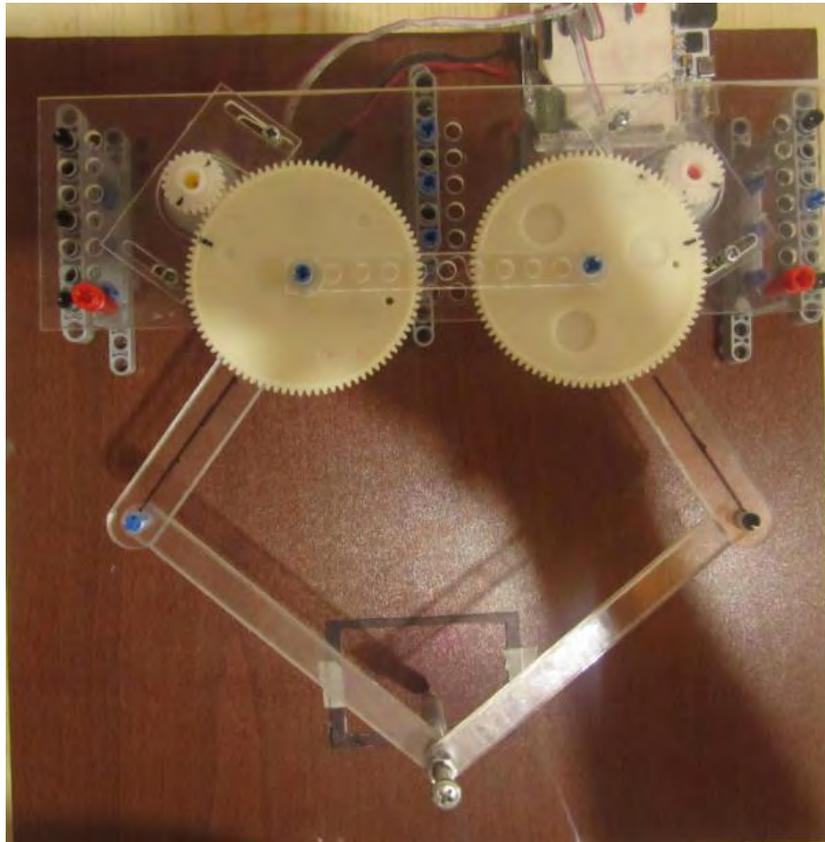
Figura 33. Circuito eléctrico sistema esclavo.



Fuente esta investigación.

- **CONSTRUCCIÓN SISTEMA MAESTRO.** De acuerdo a los diseños mecánicos, componentes eléctricos y kit de robótica Lego se procedió a realizar un ensamblaje de piezas donde se obtiene el siguiente resultado.

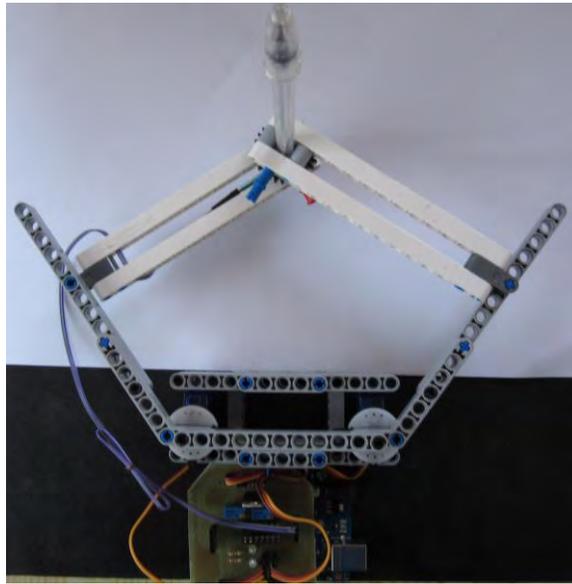
Figura 34. Estructura mecánica sistema maestro.



Fuente esta investigación.

- **CONSTRUCCIÓN ESCLAVO.** Para la construcción de la estructura del sistema esclavo se utilizó piezas del Kit de robótica Lego. A continuación se presenta el resultado.

**Figura 35. Estructura mecánica sistema esclavo.**



Fuente esta investigación.

### 2.13 PRUEBAS Y CALIBRACION:

- **Calibración de posición sistema esclavo**

Para la calibración se utiliza el siguiente diagrama que se muestra en la figura xx:

Figura 36. Diagrama de flujo calibración del sistema Esclavo

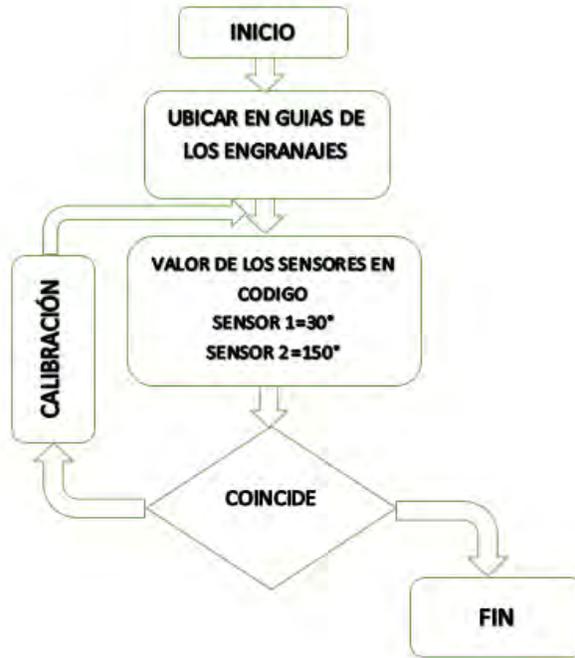


Fuente. Esta investigación.

- **Calibración posición sistema maestro**

La calibración se realiza de acuerdo al siguiente diagrama:

Figura 37. Diagrama de flujo calibración sistema Maestro.



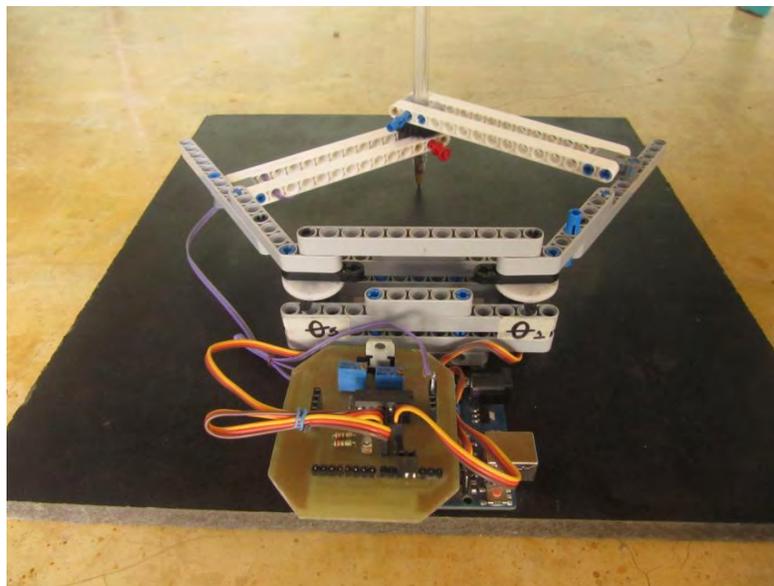
Fuente. Esta investigación.

### 3. IMPLEMENTACION Y DESARROLLO

#### 3.1 IMPLEMENTACION Y DESARROLLO

El diseño que se propone tuvo varias etapas de desarrollo y tuvo cambios a medida que se realizaron pruebas, modificando el diseño mecánico, lo anterior se realizó con ayuda de la herramienta de diseño Inventor de Autodesk® en donde se realizaron varios bocetos para el componente Maestro del sistema háptico. El componente Esclavo del sistema háptico se construyó utilizando fichas de un kit educativo de robótica Lego®.

**Figura 38. Sistema Háptico parte Esclavo.**

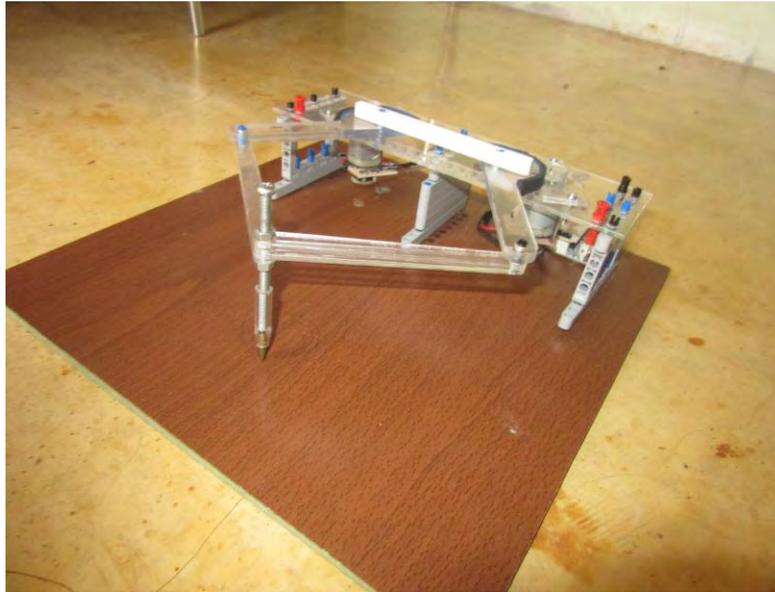


Fuente: Esta investigación.

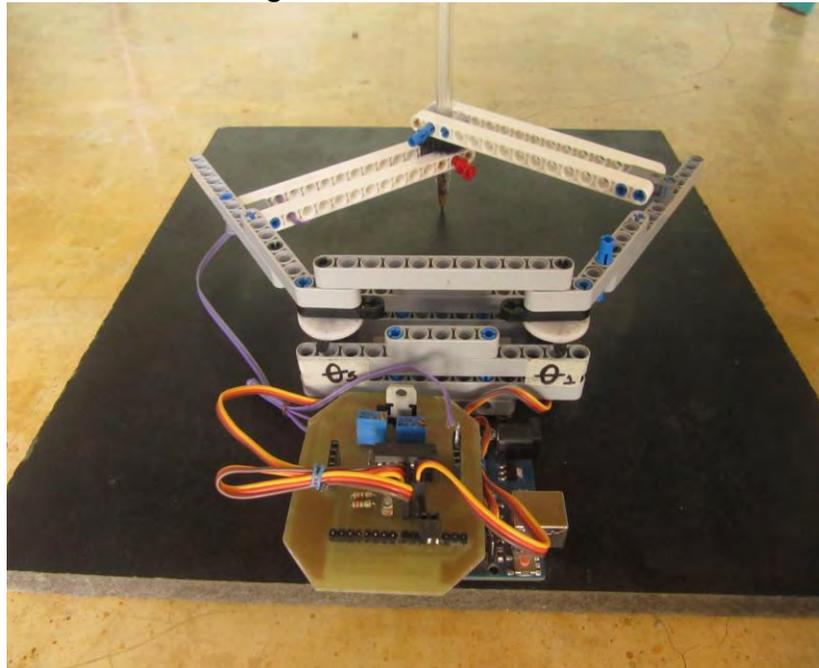
## 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la investigación aplicando la metodología propuesta en el capítulo 2.

**Figura 39. Sistema Maestro.**



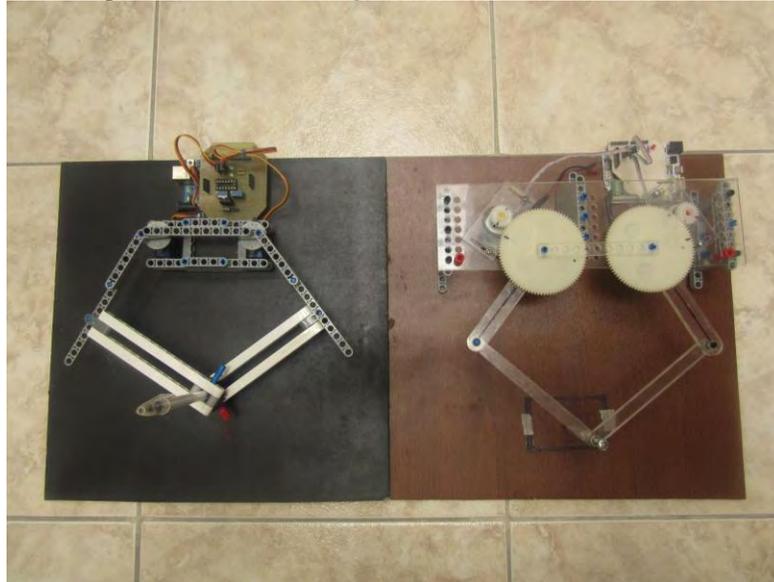
**Figura 40. Sistema Esclavo.**



Fuente. Esta investigación.

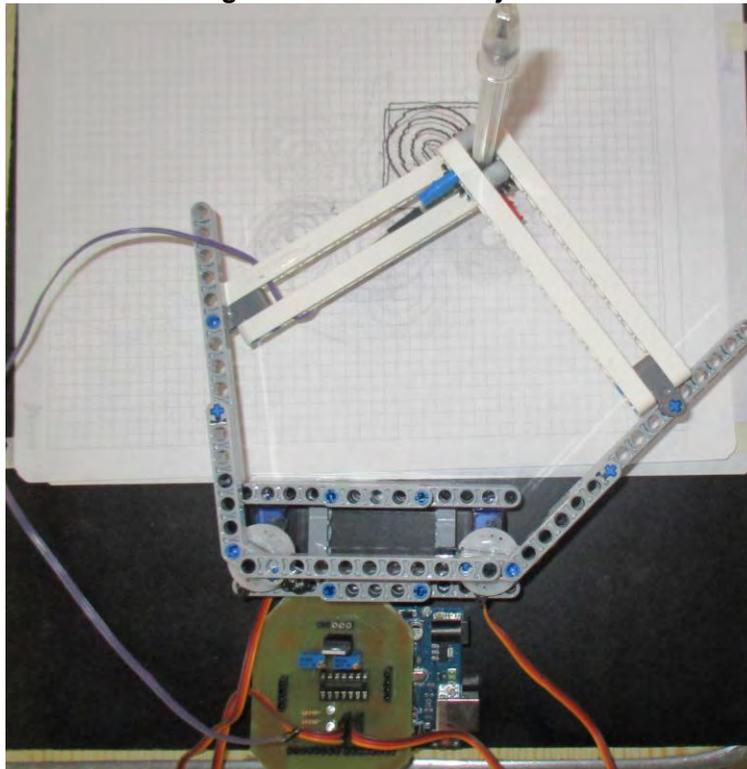
Este diseño es una propuesta en donde se utiliza partes de un kit de robótica educativa LEGO y piezas fabricadas en una maquina CNC, de este modo el sistema háptico tiene un aporte didáctico para la enseñanza y aprendizaje de Robótica.

**Figura 41. Sistema Háptico Universidad de Nariño.**



*Fuente. Esta investigación.*

**Figura 42. Sistema dibujador.**



Fuente. Esta investigación.

## 4.1 PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Para la validación del sistema se realiza un análisis y procesamiento de imágenes en el programa Matlab® en donde se realiza un código para calcular el área que se dibuja en el sistema Maestro y la área de la imagen realizada por el sistema esclavo. El área que se procesa es el color blanco de las imágenes y es calculada en pixeles, además se utiliza la formula (1) para encontrar el error relativo de la medida.

$$Error_{relativo} = \frac{\text{área medida maestro} - \text{área medida esclavo}}{\text{área maestro}} * 100\% \quad (1)$$

**Figura 43. Pruebas sistema háptico maestro-esclavo.  
Prueba 1.**



IMAGEN MAESTRO



IMAGEN ESCLAVO

$$Error_{relativo} = \frac{631864 - 472143}{631864} * 100\% = 25.77\%$$

**Prueba 2.**

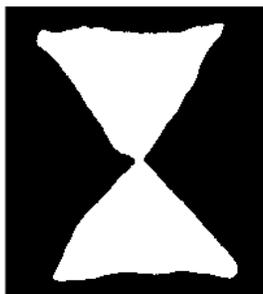


IMAGEN MAESTRO



IMAGEN ESCLAVO

$$Error_{relativo} = \frac{1001472 - 906490}{1001472} * 100\% = 9.48\%$$

Prueba 3.

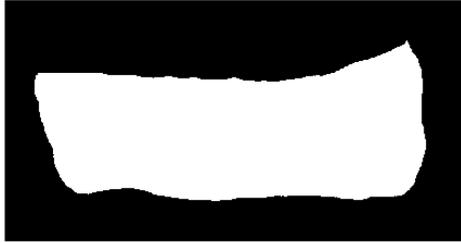


IMAGEN MAESTRO

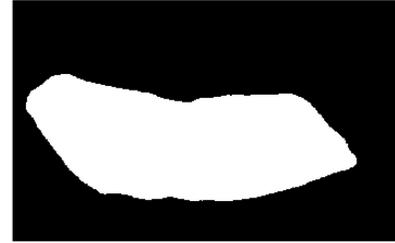


IMAGEN ESCLAVO

$$Error_{relativo} = \frac{795968 - 508974}{795968} * 100\% = 36.05\%$$

Prueba 4.



IMAGEN MAESTRO



IMAGEN ESCLAVO

$$Error_{relativo} = \frac{550226 - 461722}{550226} * 100\% = 16.08\%$$

Prueba 5.



IMAGEN MAESTRO



IMAGEN ESCLAVO

$$Error_{relativo} = \frac{1935727 - 1234395}{1935727} * 100\% = 3.6\%$$

En el análisis de las gráficas se puede concluir que el porcentaje tiene un error aceptable teniendo en cuenta que es un prototipo.

## 5. CONCLUSIONES

- Como resultado de la investigación presentada se concluye que las aplicaciones en robótica son más fáciles de comprender cuando se utilizan herramientas con alto componente didáctico tanto en aprendizaje como en la enseñanza. Particularmente, en este caso se permitió comprender el funcionamiento de los sistemas robóticos en el campo educativo.
- El sistema propuesto y desarrollado dentro de esta investigación tuvo gran acogida en la socialización que se desarrolló para el grupo de profesores asistentes al diplomado de informática y robótica ofrecido por la Universidad de Nariño, sirviendo como herramienta motivacional para el comienzo de estudios e investigaciones que abarquen de la disciplina de la robótica.
- El prototipo basado en un pantógrafo ayuda a comprender y analizar el desarrollo matemático de una cadena cinemática debido a la utilización de conceptos básicos de geometría analítica para dos dimensiones, para una próxima investigación se puede tomar el análisis de un robot paralelo de tres grados de libertad como por ejemplo un robot delta.
- Las aplicaciones sobre sistemas hápticos al abarcar componentes como la mecánica, electrónica, programación, sistemas de control, comunicaciones, entre otros, son propicias para el inicio de la enseñanza y aprendizaje de sistemas robóticos aunque para profundizar se necesitaría tener un alto nivel de conocimiento en el área de mecánica analítica.
- En la búsqueda del estado del arte se encontró información sobre interfaces hápticas (hombre - computador). Sin embargo, el aporte que realizamos en esta investigación se basa en dos sistemas robóticos físicos sin necesidad de una interfaz.

### 5.1 Trabajo Futuro

En este proceso se investigó sobre los componentes fundamentales de un robot, siendo una de las dificultades el análisis dinámico del sistema por su complejidad en el desarrollo matemático:

- Se propone el análisis completo del sistema dinámico de un robot rígido paralelo.
- Explorar controladores con base en la dinámica del robot.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se sugiere a futuro una elaboración del sistema mecánico con elementos que no sean parte de un kit de robótica educativa y utilizar los conceptos desarrollados en esta investigación.
- Se realizó un sistema robótico maestro-esclavo que facilita el estudio de la robótica dentro del aula de clase pero es recomendable que los usuarios que interactúen con el sistema observen como esta herramienta ayuda a la comprensión de conceptos básicos de electrónica, mecánica, programación, diseño.
- Continuar con el apoyo en este tipo de investigaciones ayudará a mejorar los procesos de calidad de educación dentro de las aulas de clase debido a que esta área abarca una amplia temática relacionada con mecánica, electrónica, programación y matemáticas. De esta manera la robótica ayudara a los procesos de aprendizaje relacionados con Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas.

## 7. REFERENCIAS

- A. Jarillo, L. G. (2014). *Sistema háptico para evaluación y rehabilitación motriz: Resultados experimentales*. EAE, 2014.
- A. Ollero . (2001). Robotica: Manipuladores y Robots Moviles . En A. O. Baturone, *Robotica: Manipuladores y Robots Moviles* (págs. 22-23). Barcelona, España: Marcombo AlfaOmega.
- Albala, D. (2007). A history of robots: from science fiction to surgical robotics. En D. Albala, *A history of robots: from science fiction to surgical robotics* (págs. 10-11). London, UK: Springer London.
- Deniz, E. (2006). *Design of Haptic Device for Micro Parts Handling*. Twente-Netherlands: University of Twente.
- Eduardo E. Rodríguez. (2016). *Un dispositivo para hacer matemáticas con los dedos*. Buenos Aires, Argentina: Universidad General de Sarmiento.
- Fajardo, D. F. (1 de Mayo de 2016). *robotica.udenar.edu.co*. Obtenido de <http://robotica.udenar.edu.co/>
- Gianni Campion, Q. W. (2005). *The Pantograph Mk-II: A Haptic Instrument*. Montréal, Québec, Canada: IEEE Xplore.
- Ider, S. K. (2008). *Singular Robust Inverse Dynamics of Parallel Manipulators*. Ankara-Turquia: Jee-Hwan Ryu.
- J. Rubilar Medina. (2014). *HABILIDADES HÁPTICAS EN EDUCACIÓN INICIAL*. Concepción Chile: Universidad de Concepción Chile.
- Lopez, J. S. (2007). *Aportaciones al diseño mecánico de los entrenadores*. Madrid, España: Biblioteca Universidad Rey Juan Carlos de Madrid.
- M. A. Garcia Ruiz. (2010). *DISEÑO Y DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO HAPTICO CON APLICACIONES PARA ENTORNOS EDUCATIVOS*. Colima Mexico : Universidad de Colima - Mexico.
- Macia, F. M.-H. (2000). *roboLABO*. Obtenido de <http://roboLABO.etsit.upm.es/>
- Martin, J. S. (2006). *Clasificación de Dispositivos Hápticos*. Obtenido de Repositorio Universidad Rey Juan Carlos de Madrid: <http://docplayer.es/7115476-Tema-2-clasificacion-de-dispositivos-hapticos.html>
- Okamura, A. M. (2014). *Stanford Mechanical Engineering*. Obtenido de Stanford Mechanical Engineering: [web.stanford.edu/class/me327/lectures/lecture02-kinesthetic\\_design.pdf](http://web.stanford.edu/class/me327/lectures/lecture02-kinesthetic_design.pdf)
- Parejo, J. C. (2008). *Jose Cortes Parejo*. Obtenido de [http://personal.us.es/jcortes/Material/Material\\_archivos/Articulos%20PDF/RobotPUMA.pdf](http://personal.us.es/jcortes/Material/Material_archivos/Articulos%20PDF/RobotPUMA.pdf)
- Quanser. (septiembre de 2016). *www.quanser.com*. Obtenido de [http://www.quanser.com/products/2dof\\_serial\\_flexible\\_joint](http://www.quanser.com/products/2dof_serial_flexible_joint)
- R. Iñigo ; E. Vidal . (2002). Robots Industriales Manipuladores. En R. I. Madrigal, & E. V. Idiarte, *Robots Industriales Manipuladores* (págs. 53-55). Barcelona: Ediciones Universitat Politecnica de Catalunya.

- S. Ballesteros. (1994). Percepción de propiedades de los objetos a través del tacto. En S. Ballesteros, *Percepción de propiedades de los objetos a través del tacto*. (págs. 15, 28 – 38.).
- Sanchez, J. A. (2002). *Avances en Robótica y Vision por Computador*. Cuenca, España: Ediciones Universidad de Castilla y de la Mancha.
- Toro, H. M.-D., Silva-Ortigoza, R., & Ramos-Silvestre, E. R. (2011). *Modelado y simulación de un robot rígido de dos*. Queretaro-Mexico: CIDETEC-IPN, Departamento de Posgrado, Área de Mecatrónica.
- Yokokohji, Y., Hollis, R., & Kanade, T. (1999). *WYSIWYF Display: A Visual/Haptic Interface to Virtual Environment*. Massachussets California: Massachussets Institute Technology.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Son, H. I., Franchi, A., Chuang, L. L., Kim, J., Bulthoff, H. H., & Giordano, P. R. (2013). Human-centered design and evaluation of haptic cueing for teleoperation of multiple mobile robots. *IEEE transactions on cybernetics*, 43(2), 597-609.
  
- Covarrubias, M., Bordegoni, M., Cugini, U., Gatti, E., & Mansutti, A. (2012, August). Pantograph mechanism for increasing the working area in a haptic guidance device for sketching, hatching and cutting tasks. In *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 1377-1384). American Society of Mechanical Engineers.
  
- Tiwari, A. (2016). A Review on Haptic Science Technology and its Applications. *Science [ETEBMS-2016]*, 5, 6.
  
- Salisbury, J. K., & Srinivasan, M. A. (1997). Phantom-based haptic interaction with virtual objects. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17(5), 6-10.
  
- Chan, Sonny, et al. "Virtual reality simulation in neurosurgery: technologies and evolution." *Neurosurgery* 72 (2013): A154-A164.
  
- Scheggi, S., Meli, L., Pacchierotti, C., & Prattichizzo, D. (2015, July). Touch the virtual reality: using the Leap Motion controller for hand tracking and wearable tactile devices for immersive haptic rendering. In *ACM SIGGRAPH 2015 Posters* (p. 31). ACM.
  
- Gonzalez-Badillo, G., Medellin-Castillo, H., Lim, T., Ritchie, J., & Garbaya, S. (2014). The development of a physics and constraint-based haptic virtual assembly system. *Assembly Automation*, 34(1), 41-55.
  
- Israr, A., Kim, S. C., Stec, J., & Poupyrev, I. (2012, May). Surround haptics: tactile feedback for immersive gaming experiences. In *CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1087-1090). ACM.
  
- Otaduy, M. A., Okamura, A., & Subramanian, S. (2016, July). Haptic technologies for direct touch in virtual reality. In *ACM SIGGRAPH 2016 Courses* (p. 13). ACM.
  
- Usevitch, N. S., Khanna, R., Carrera, R. M., & Okamura, A. M. (2016, July). End Effector for a Kinesthetic Haptic Device Capable of Displaying Variable Size and Stiffness. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications* (pp. 363-372). Springer International Publishing.

-Afzal, M. R., Hussain, I., Jan, Y., & Yoon, J. (2013, October). Design of a haptic cane for walking stability and rehabilitation. In Control, Automation and Systems (ICCAS), 2013 13th International Conference on (pp. 1450-1454). IEEE.

## 9. ANEXOS

Figura 44. Curva característica sensor de fuerza

Figure 1 - Typical Force Curve

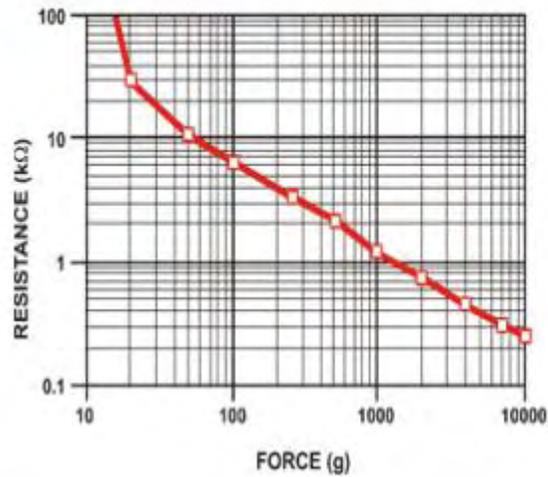
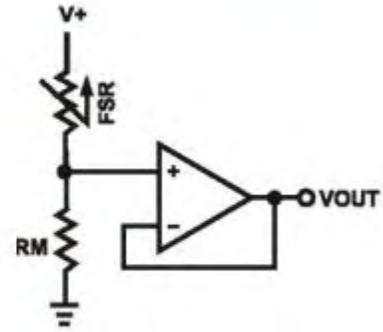
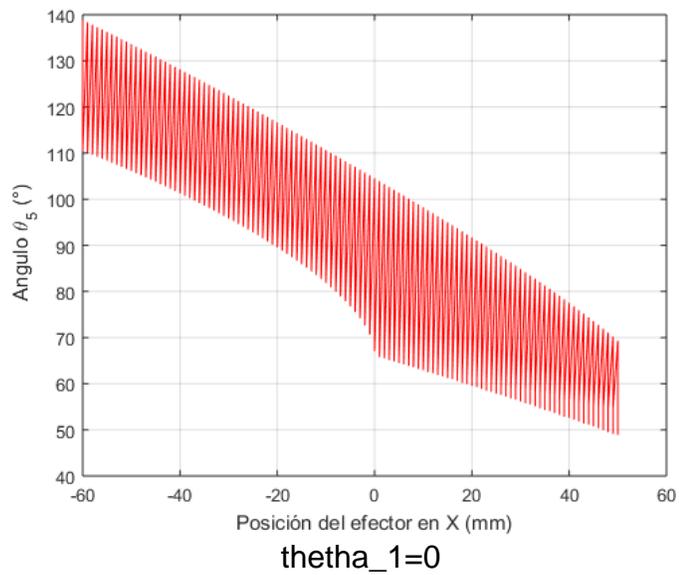


Figure 2 - Typical Schematic

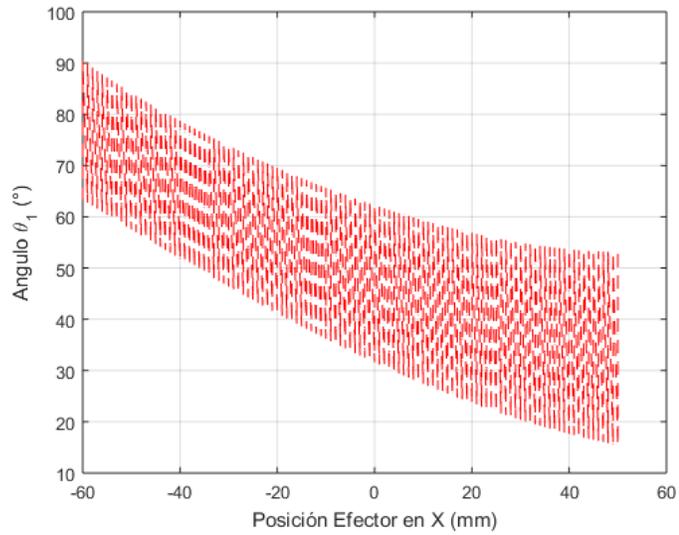


Tomada de [www.pololu.com](http://www.pololu.com)

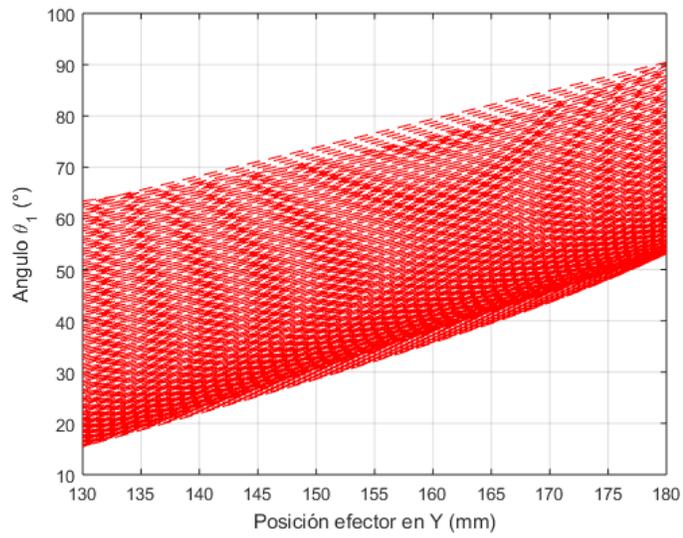
Figura 45: Gráfica Angulo  $\theta_5$  vs posición efector en X.



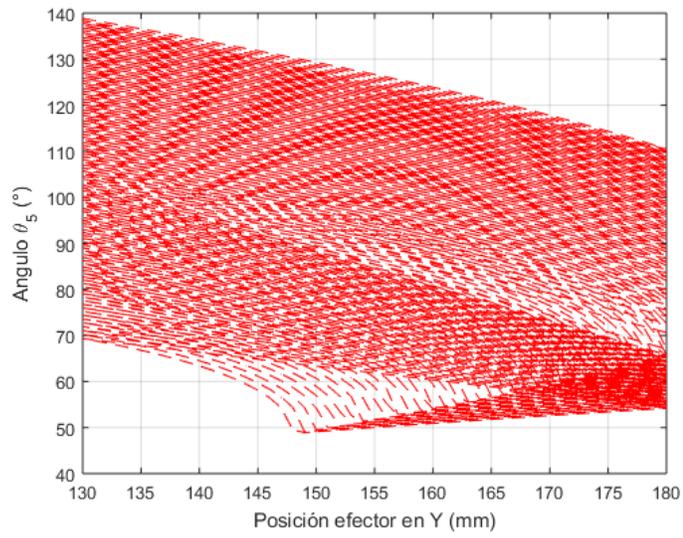
**Figura 46: Gráfica Angulo  $\theta_1$  vs posición efector en X.**  
thetha\_5=0



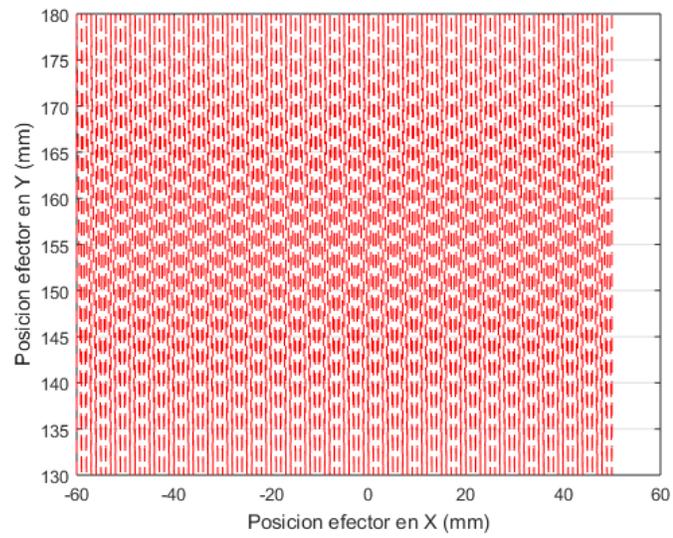
**Figura 47: Gráfica Angulo  $\theta_1$  vs posición efector en Y.**



**Figura 48: Gráfica Angulo  $\theta_5$  vs posición efector en Y.**



**Figura 49: Gráfica Barrido efector en el área de trabajo.**



## Codigo en Matlab Cinematica Inversa.

```
%inverse kinematic pantograhp
close all;
clear;
clc;

syms a1 a2 a3 a4 a5
syms x3 y3

p1=[0,0];
p5=[-a5,0];
p3=[x3,y3];

p3_p1=sqrt(((p3(1)-p1(1))^2)+(p3(2)-p1(2))^2);
p3_p1_2=((p3(1)-p1(1))^2)+(p3(2)-p1(2))^2;

p3_p5=sqrt(((p3(1)-p5(1))^2)+(p3(2)-p5(2))^2);
p3_p5_2=((p3(1)-p5(1))^2)+(p3(2)-p5(2))^2;

alpha_1_num=a1^2-a2^2+p3_p1_2;
alpha_1_den=2*a1*p3_p1;
alpha_1_cos=alpha_1_num/alpha_1_den;

betha_1= atan2(y3,-x3);
alpha_5=atan2(y3,x3+a5);

betha_5_num=a4^2-a3^2+p3_p5_2;
betha_5_den=2*a1*p3_p5;
betha_5_cos=betha_5_num/betha_5_den;
betha_5=acos(betha_5_cos);

%datos

a5=80;
a1=85;
a4=85;
a3=112;
a2=112;

%1
x3_eval=linspace(-60,50,111);
y3_eval=linspace(130,180,51);
coordenadas=[];
coordenadasfinal=[];

for i=1:length(x3_eval)

    for j=1:length(y3_eval)
```

```

    coordenadas=[x3_eval(i),y3_eval(j)];
    coordenadasfinal=[coordenadasfinal;coordenadas];
end

end

x3=coordenadasfinal(:,1);
y3=coordenadasfinal(:,2);

%%x3=-40;
%%y3=170;

p1_p3eval=eval(p3_p1);
p3_p1_2eval=eval(p3_p1_2);
p3_p5eval=eval(p3_p5);
p3_p5_2eval=eval(p3_p5_2);

alpha1cos_eval=eval(alpha_1_cos);
alpha5_eval=eval(alpha_5);
betha1_eval=eval(betha_1);
betha5_eval=eval(betha_5);
t1_eval=pi-alpha_1-betha1_eval;
t5_eval=alpha5_eval+betha5_eval;

t1deg=rad2deg(t1_eval);
t5deg=rad2deg(t5_eval);

figure(1);
plot(x3,t5deg,'-r')
grid on;
xlabel('Efector en X (mm)')
ylabel('Grados')
zoom on;

figure(2);
plot(x3,t1deg,'--r')
grid on;
xlabel('Efector en X (mm)')
ylabel('Grados')
zoom on;

figure(3);
plot(y3,t1deg,'--r')
grid on;
xlabel('Efector en Y (mm)')
ylabel('Grados')
zoom on;

figure(4);
plot(y3,t5deg,'--r')
grid on;
xlabel('Efector en Y (mm)')
ylabel('Grados')
zoom on;

figure(5);
plot(x3,y3,'--r')
grid on;
xlabel('BARRIDO DE COORDENADAS (mm)')
ylabel('Grados')
zoom on;

```

## Codigo en Arduino Cinematica Inversa.

```
cinematicainversapantografo

float a1=85,a2=112,a3=112,a4=85,a5=80;
boolean estado=0;
byte posicion=0;
boolean Datolisto=0;
byte Datos[]={-40,110};

SoftwareSerial portOne(11, 12);
Servo servo5;// create servo object to control a servo
Servo servo1;

void setup() {
  pinMode(13,OUTPUT);
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  Serial.println("datos");

  // Start each software serial port
  Serial.begin(9600);
  portOne.begin(9600);
  servo5.attach(9);// attaches the servo on pin 9 to the servo object
  servo1.attach(10);
  servo1.write(60);
  servo5.write(128);
}
```

## Codigo en Matlab Cinematica Directa.

```
%% pantograph kinematics
clear;
clc;
syms a1 a2 a3 a4 a5
syms t1 t5
p2 = [a1*cos(t1);a1*sin(t1)];
p4 = [a4*cos(t5)-a5;a4*sin(t5)];

% intermediate equation
p4_p2_2 = transpose(p4-p2)*(p4-p2);
p4_p2 = sqrt(p4_p2_2);
% 3
p2_ph = (a2^2-a3^2+p4_p2_2)/2/p4_p2;
% 4
ph = p2 + p2_ph/p4_p2*(p4-p2);
% 5
p3_ph = sqrt(a2^2-p2_ph^2);

% end effector
xh = ph(1);
yh = ph(2);
x2 = p2(1);
y2 = p2(2);
x4 = p4(1);
y4 = p4(2);

x3 = xh + p3_ph/p4_p2*(y4-y2);
y3 = yh - p3_ph/p4_p2*(x4-x2);

x3 = subs(x3,{a4,a3},{a1,a2});
y3 = subs(y3,{a4,a3},{a1,a2});

%datos
a5=80;
a1=85;
a4=85;
a3=112;
a2=112;

t1_eval=linspace(0,pi,181);
t5_eval=linspace(0,pi,181);
angulos=[];
angulosfinal=[];

for i=1:length(t1_eval)

    for j=1:length(t5_eval)

        t1=angulosfinal(:,1);
        t5=angulosfinal(:,2);

        % t1=deg2rad(60);
        % t5=deg2rad(100);

        y3_eval=eval(y3);
        x3_eval=eval(x3);

        plot(x3_eval,y3_eval,'bo');
        grid on;
        xlabel('BARRIDO DE ANGULOS (mm)')
        ylabel('mm')
        zoom on;
    }
}

```

## Codigo en Arduino Cinematica Directa.

```
cinematicadirectamasterhap

float a1=85.00,a2=112.00,a3=112.00,a4=85.00,a5=80.00;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  TCCR1B=1;
  TCCR2B=2;

  //sensado pocicion angular

  int sensormotorlef=1023.00-analogRead(0);
  int sensormotorrig=analogRead(1);

  float deg5=(270.00/1023.00)*sensormotorlef;
  float deg1=(270.00/900.00)*sensormotorrig;

  float theta1=30.00+((22.00/88.00)* deg1);;
  float theta5=150.00-((22.00/88.00)* deg5);

  float theta1rad=(PI/180.00)*theta1;
```

## Codigo en Matlab® Analisis y procesamiento de Imagen.

```
clear all;
close all;
clc;
%% llamo imagen Esclavo
[filename,pathname] = uigetfile('*.jpg;*.tif','Selecciona imagen para abrir');
I=imread([pathname,filename]); %% imagen seleccionada
Ia=rgb2gray(I); %% convierte la Imagen "I" a escala de grises
I2=graythresh(Ia); %% Binarización
Iout=im2bw(Ia,I2); %% Imagen de salida Iout
B=~Iout; %% Imagen negada
area = sum(sum(B)); %% Calculo de área
%% llamo imagen Maestro
[filename,pathname] = uigetfile('*.jpg;*.tif','Selecciona imagen para abrir');
I11=imread([pathname,filename]); %% imagen seleccionada
Iaa=rgb2gray(I11); %% convierte la Imagen "I" a escala de grises
I22=graythresh(Iaa); %% Binarización
Iout2=im2bw(Iaa,I22); %% Imagen de salida Iout
BB=~Iout2; %% Imagen negada
area1 = sum(sum(BB)); %% Calculo de área
%% DIBUJAR IMAGENES
figure (1)
subplot(2,2,1)
imshow(BB)
xlabel('IMAGEN MAESTRO')
subplot(2,2,2)
imshow(B); %% Imagen
grid on;
xlabel ('IMAGEN ESCLAVO')
```

### 1.1 Anexo Imágenes Exposición Diplomado Robótica Universidad de Nariño

Imágenes asistentes Diplomado de Informatica y Robótica.









