



# 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 E IMPLEMENTACION DE UN DISPOSITIVO  
HÁPTICO PARA EL MANIPULADOR ROBÓTICO INDUSTRIAL  
KUKA KR16

AUTORES:

CHAVEZ PAZMIÑO, ANGEL WLADIMIR  
AGUIAR ORTA, DAVID SALOMON

DIRECTOR:

ING. IBARRA JÁCOME, OSWALDO ALEXANDER MSC.

SANGOLQUÍ

2016



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN DISPOSITIVO HÁPTICO PARA EL MANIPULADOR ROBÓTICO INDUSTRIAL KUKA KR16" realizado por los señores ANGEL WLADIMIR CHAVEZ PAZMIÑO y DAVID SALOMÓN AGUIAR ORTA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores ANGEL WLADIMIR CHAVEZ PAZMIÑO y DAVID SALOMÓN AGUIAR ORTA para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 12 de julio de 2016

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alexander Ibarra', enclosed within a large, irregular blue oval scribble.

Ing. Alexander Ibarra  
DIRECTOR



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

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, ANGEL WLADIMIR CHAVEZ PAZMIÑO, con cédula de identidad N° 1717423758 y DAVID SALOMÓN AGUIAR ORTA, con cédula de identidad N° 1722416904, declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN DISPOSITIVO HÁPTICO PARA EL MANIPULADOR ROBÓTICO INDUSTRIAL KUKA KR16" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 12 de julio del 2016

  
\_\_\_\_\_  
Angel Vladimir Chavez Pazmiño  
C.I:1717423758

  
\_\_\_\_\_  
David Salomón Aguiar Orta  
C.I: 1722416904



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

### AUTORIZACIÓN

Nosotros, ANGEL WLADIMIR CHAVEZ PAZMIÑO y DAVID SALOMÓN AGUIAR ORTA, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN DISPOSITIVO HÁPTICO PARA EL MANIPULADOR ROBÓTICO INDUSTRIAL KUKA KR16", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 12 de julio del 2016



Angel Wladimir Chavez Pazmiño  
C.I: 1717423758



David Salomón Aguiar Orta  
C.I: 1722416904

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de titulación a la persona más importante en mi vida, mi madre, ya que ella es la persona que con su ejemplo y dedicación me ha guiado día a día hasta lograr este objetivo. Gracias por el apoyo, firmeza y constancia que siempre me ha demostrado ya que estos valores son las principales razones para haber cumplido esta meta.

También dedico este trabajo a mi familia, que siempre han estado a mi lado y siempre me han brindado su apoyo, confianza y buenos consejos. Gracias de todo corazón por confiar en mí.

Angel W. Chavez

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi madre y a mi familia quienes son las personas más importantes en mi vida y además la principal motivación para ser una mejor persona cada día, por todo su apoyo y consejos mis sinceros agradecimientos.

A mi compañero David Aguiar con quien tuve la suerte de poder llevar a cabo este proyecto, gracias por la paciencia y dedicación para lograr el feliz término de este proyecto.

A mis compañeros con los cuales compartí aprendí no solo de ciencia sino también lo que es amistad, hermandad y unión sincera.

A los ingenieros Alexander Ibarra y Lenin Abatta quienes con sus conocimientos supieron guiarnos para concluir de la mejor manera este trabajo.

Angel W. Chavez

## **DEDICATORIA**

A Dios quien me ha guiado y acompañado durante toda mi trayectoria de formación profesional.

A mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional y han sido el pilar fundamental para cumplir con este objetivo de gran importancia en mi vida, quienes con amor supieron instruirme y formarme como persona.

A mis hermanos, que con sus consejos y palabras de ánimo me ayudaron a enfrentar los retos que se presentaron en el camino.

A mis familiares que han estado presentes en mi vida compartiéndome con cariño sus consejos para superarme cada día.

David Aguiar Orta.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi infinita gratitud hacia mis padres que con su esfuerzo y dedicación han sabido apoyarme en cada instante de mi vida, su sacrificio me ha permitido llegar al cumplimiento de una de mis metas con lo cual me siento muy honrado.

Agradezco a mis tutores Ing. Alexander Ibarra e Ing. Lenin Abata por compartir su conocimiento y preparación para llevar a cabo con éxito este trabajo, su esfuerzo también forma parte del objetivo que he logrado.

A mi compañero Wladimir Chavez por su constancia y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos con los cuales compartí gratos momentos y quienes también nos otorgaron su ayuda no solo en las aulas sino también en el diario vivir.

David Aguiar Orta.

## Tabla de contenido

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
DEDICATORIA .....	vii
AGRADECIMIENTO .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	1
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	2
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO.....	3
1.5. OBJETIVOS .....	4
1.5.1. Objetivo General .....	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO II.....	5
ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1. MANIPULADORES ROBÓTICOS INDUSTRIALES .....	5
2.1.1. Robot Industrial .....	5
2.1.2. Estructura mecánica de un robot industrial .....	6
2.1.3. Configuraciones de robots industriales .....	8
2.1.4. Principales especificaciones de un robot industrial .....	8
2.1.5. Principales configuraciones de robots industriales.....	11
2.2. ROBOT KUKA KR16 .....	12

2.2.1.	Componentes del robot industrial KUKA KR 16 .....	13
2.2.2.	Características del robot industrial .....	13
2.2.3.	Lenguaje de programación KRL.....	14
2.3.	DISPOSITIVOS HÁPTICOS .....	16
2.3.1.	Háptica.....	16
2.3.2.	Teleoperación .....	17
2.3.3.	Aplicaciones.....	18
2.3.4.	Dispositivos hápticos comerciales.....	20
CAPÍTULO III .....		23
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....		23
3.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE .....		23
3.1.1.	Diseño Mecánico de la cadena cinemática. ....	23
3.1.2.	Geometría del Dispositivo Háptico. ....	23
3.1.3.	Análisis estático de la estructura mecánica.....	25
3.1.3.1.	Análisis estático del Eje 1. ....	26
3.1.3.2.	Análisis estático del Eje 2. ....	30
3.1.3.3.	Análisis estático de columna giratoria. ....	34
3.1.4.	Diseño de engranes. ....	37
3.1.4.1.	Selección del sensor. ....	38
3.1.5.	Cálculo del esfuerzo flector en la raíz del diente del engrane. ....	42
3.1.6.	Análisis estático de partes de la estructura.....	48
3.1.6.1.	Análisis estático eslabón 3.....	48
3.1.6.2.	Análisis estático eslabón 2.....	50
3.1.6.3.	Análisis estático eslabón 1.....	51
3.1.7.	Implementación del diseño mecánico. ....	53
3.1.7.1.	Procedimiento para ensamble de piezas. ....	55
3.1.8.	Diseño del sistema eléctrico y electrónico .....	60
3.1.8.1.	Calculo de corriente en el circuito. ....	60
3.1.8.2.	Diseño del estabilizador de voltaje.....	61
3.1.8.3.	Selección de la tarjeta DAC. ....	62
3.1.8.4.	Tarjeta DAC NI USB 6008. ....	65

3.1.8.5. Cálculo de la resolución del dispositivo háptico. ....	66
3.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE. ....	67
3.2.1. Selección de puerto serial .....	69
3.2.2. Adquisición de datos. ....	70
3.2.3. Procesamiento de datos .....	72
3.2.4. Definir cadena de datos. ....	76
3.2.5. Enviar datos. ....	77
3.3. PROGRAMACIÓN DEL ROBOT INDUSTRIAL KUKA KR16. ....	78
3.3.1. Programación a nivel experto.....	78
3.3.2. Apertura del puerto serial del robot KUKA KR16. ....	80
3.3.3. Verificación de Comunicación serial. ....	81
3.3.4. Programa para girar los eslabones del robot KUKA.....	84
3.4. DISEÑO DEL HMI. ....	89
CAPÍTULO IV.....	90
PRUEBAS Y RESULTADOS .....	90
4.1. PRUEBAS .....	90
4.1.1. Prueba de Precisión.....	90
4.2. RESULTADOS .....	93
4.2.1. Exactitud de posición angular .....	93
4.2.2. Repetibilidad .....	93
CAPÍTULO V.....	95
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	95
5.1. CONCLUSIONES.....	95
5.2. RECOMENDACIONES .....	96
REFERENCIAS .....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales morfologías de los robots industriales .....	11
Tabla 2 Principales características del KUKA KR16 .....	13
Tabla 3 Datos de los ejes del KUKA KR16 .....	14
Tabla 4 Dispositivos hápticos comerciales .....	21
Tabla 5 Comparación de potenciómetros BOURNS .....	39
Tabla 6 Datos del sensor Burns 3540-1-202L .....	40
Tabla 7 Parámetros del piñón .....	40
Tabla 8 Propiedades mecánicas del Aluminio PRODAX .....	48
Tabla 9 Propiedades físicas del Aluminio PRODAX. ....	48
Tabla 10 Características DAC OMB-DAQ-54 .....	63
Tabla 11 Características DAC MC USB 230 SERIES.....	63
Tabla 12 Características NI USB 6008 .....	64
Tabla 13 Ponderaciones .....	64
Tabla 14 Ponderaciones a criterios de selección.....	65
Tabla 15 Características NI USB 6008 .....	65
Tabla 16 Resolución de eslabones .....	90
Tabla 17 Datos de las pruebas de precisión y exactitud.....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación del robot industrial con el cuerpo humano.....	6
Figura 2. Elementos mecánicos del robot industrial.....	7
Figura 3. Tipos de articulaciones.....	7
Figura 4. Configuraciones frecuentes de robots industriales.....	8
Figura 5. Espacio de trabajo de robots industriales.....	9
Figura 6. Kuka TITAN.....	10
Figura 7. Componentes del robot industrial KUKA KR16.....	13
Figura 8. Rotación de los ejes.....	14
Figura 9. Interfaz gráfica de programación.....	15
Figura 10. Dispositivo háptico.....	17
Figura 11. Componentes de un sistema de tipo maestro –esclavo.....	18
Figura 12. Sojourner (rover).....	18
Figura 13. Predator B.....	19
Figura 14. Sistema quirúrgico da Vinci.....	19
Figura 15. Phantom OMNI.....	21
Figura 16. HapticMaster. Fuente: (VRLAB, s.f.).....	21
Figura 17. Área de trabajo HapticMaster.....	21
Figura 18. Omega.3 Haptic device.....	21
Figura 19. Dimensiones del robot KUKA.....	24
Figura 20. Dimensiones de la estructura del dispositivo háptico.....	24
Figura 21. Modelo del dispositivo Háptico.....	25
Figura 22. Estructura del dispositivo sometido a una fuerza de 100N.....	25
Figura 23. Eje 1 analizado como viga.....	26
Figura 24. Diagramas de fuerza cortante y momento flector eje 1.....	26
Figura 25. Esfuerzo producido en eje de 5mm de diámetro.....	28
Figura 26. Geometría del eje 1.....	29
Figura 27. Esfuerzo generado en eje 1 al aplicar la fuerza de 100N.....	29
Figura 28. Acoplamiento del eje al dispositivo háptico.....	30
Figura 29. Eje 2 analizado como viga.....	30
Figura 30. Diagramas de fuerza cortante y momento flector eje 2.....	31
Figura 31. Esfuerzo producido en el eje de 6mm de diámetro.....	32

Figura 32. Geometría del eje 2 .....	33
Figura 33. Esfuerzo generado en el eje 2 al aplicar fuerzas de 50N.....	33
Figura 34. Acoplamiento del eje 2 a la estructura .....	34
Figura 35. Columna sometida a la fuerza de 100N .....	34
Figura 36. Fuerza y momento según el método de la secante. ....	35
Figura 37. Dimensiones de la sección transversal de la columna.....	35
Figura 38. Dimensiones de la columna.....	37
Figura 39. Estado de esfuerzos en la columna giratoria.....	37
Figura 40. Acoplamiento del piñón al sensor. ....	41
Figura 41. CAD del Engrane 2.....	41
Figura 42. Acoplamiento de los engranes.....	42
Figura 43. Torque máximo en el tren de engranes. ....	43
Figura 44. Factor de sobrecarga AGMA. ....	44
Figura 45. Relación de apoyo sugerida por AGMA.....	46
Figura 46. Forma del engrane para el factor del espesor del aro. ....	46
Figura 47. Selección del factor de geométrico de resistencia a la flexión. ...	47
Figura 48. Eslabón 3 sometido a una fuerza de tracción de 100N.....	48
Figura 49. Estado de esfuerzo del eslabón 3 para 100N .....	49
Figura 50. Factor de seguridad del eslabón 3 al aplicar la carga.....	49
Figura 51. Eslabón 2 sometido a una fuerza de 50N .....	50
Figura 52. Estado de esfuerzos del eslabón 2.....	50
Figura 53. Factor de seguridad del eslabón 2 al aplicar la carga.....	51
Figura 54. Eslabón 1 sometido a una fuerza de tracción de 50N. ....	51
Figura 55. Estado de esfuerzos del eslabón 1.....	52
Figura 56. Factor de seguridad del eslabón 1 al aplicar la carga.....	52
Figura 57. Diseño final del dispositivo háptico. ....	53
Figura 58. Componentes de la cadena cinemática .....	53
Figura 59. Conjunto de engranes de la cadena cinemática .....	54
Figura 60. Ensamblaje de los eslabones 2 y 3 .....	54
Figura 61. Acoplamiento de los rodamientos axiales a la base .....	55
Figura 62. Ensamble de la base y el eslabón 1 mediante tornillos. ....	55
Figura 63. Vista en explosión de componentes de los eslabones 1 y 2.....	56

Figura 64. Ensamble entre los eslabones 2 y 3 .....	56
Figura 65. Vista en explosión de componentes del eslabón 1. ....	57
Figura 66. Conjunto de eslabones 1, 2 y 3 ensamblados. ....	57
Figura 67. Vista en explosión de componentes que conforman la base. ....	58
Figura 68. Base del dispositivo háptico ensamblada. ....	58
Figura 69. Cadena cinemática del dispositivo háptico ensamblada. ....	59
Figura 70. Diagrama de bloques del circuito a implementarse. ....	60
Figura 71. Circuito estabilizador de voltaje con diodo zener. ....	61
Figura 72. Diagrama del circuito eléctrico. ....	62
Figura 73. Tarjeta DAC OMB-DAQ-54. ....	62
Figura 74. Tarjeta DAC MC USB 230 SERIES .....	63
Figura 75. Tarjeta NI USB 6008. ....	64
Figura 76. Despiece de la tarjeta DAC. ....	66
Figura 77. Diagrama de flujo de la implementación del software. ....	68
Figura 78. Bloque de selección de puerto serial en el programa. ....	69
Figura 79. Configuración del puerto serial en el software. ....	69
Figura 80. Configuración del puerto serial en el computador. ....	70
Figura 81. Bloque de programación para configurar la tarjeta DAC. ....	70
Figura 82. Parámetros de configuración de la tarjeta DAC. ....	71
Figura 83. Conexión de los bloques referentes a la tarjeta DAC. ....	71
Figura 84. Diagrama de procesamiento de datos. ....	72
Figura 85. Coordenadas en el plano cartesiano de dos puntos. ....	73
Figura 86. Posición HOME del Robot KUKA KR16. ....	74
Figura 87. Antebrazo del dispositivo háptico perpendicular a la base. ....	74
Figura 88. Antebrazo del dispositivo háptico a $0^{\circ}$ . ....	75
Figura 89. Función matemática para el antebrazo. ....	76
Figura 90. Función matemática para la base. ....	76
Figura 91. Función matemática para el brazo. ....	76
Figura 92. Conversión de un número a string. ....	76
Figura 93. Formato de la cadena de caracteres. ....	77
Figura 94. Conexión de bloques para realizar la concatenación de datos. ...	77
Figura 95. Bloques para envío de cadena de caracteres. ....	77

Figura 96. Procedimiento para elegir grupo de usuario .....	78
Figura 97. Selección de programador experto .....	79
Figura 98. Ingreso de contraseña .....	79
Figura 99. Procedimiento para visualizar archivos .DAT .....	81
Figura 100. Visualización de los archivos extensión DAT.....	82
Figura 101. Procedimiento para abrir la pantalla TELNET.....	84
Figura 102. Ingreso de la dirección para TELNET .....	84
Figura 103. Encendido de motores .....	85
Figura 104. Selección modo automático.....	85
Figura 105. Diagrama de flujo para controlar motores del KUKA .....	86
Figura 106. Interfaz de comunicación .....	89

## **RESUMEN**

Actualmente el desarrollo de mandos a distancia que permiten la teleoperación en tiempo real de dispositivos y maquinarias eléctricas o electrónicas se encuentra auge, por este motivo en el presente proyecto nos planteamos desarrollar un dispositivo háptico de tres grados de libertad que permita la teleoperación de un manipulador robótico industrial de arquitectura cerrada como es el KUKA KR16, para lograr tareas de posicionamiento y así mostrar a los estudiantes de una forma tangible uno de los métodos de programación contemplados en el sílabo de la materia de robótica industrial. El presente proyecto de titulación propone desarrollar un dispositivo que permita realizar la teleoperación de tipo maestro - esclavo, la cual consiste en que el robot industrial imite los movimientos que el operador configure en el dispositivo háptico. Para llevar a cabo la ejecución se utilizó el modo experto de programación con el que cuenta el controlador KR C2, lo cual permitió lograr la comunicación serial con la interfaz del dispositivo.

### **Palabras clave:**

- **ROBÓTICA**
- **TELE OPERACIÓN**
- **HÁPTICO**
- **GRADOS DE LIBERTAD**
- **COMUNICACIÓN SERIAL**

## **ABSTRACT**

Nowadays the development of remote controls that allow remote operation in real-time of devices and electrical or electronic machines is booming, for this reason, in this project we plan to develop a haptic device with three degrees of freedom that allows remote operation of an industrial robot of closed architecture as is the KUKA KR16, to achieve positioning tasks and this way show to students a tangible form about programming methods listed in the syllabus of the subject of industrial robotics. This project proposes to develop a device that allows for teleoperation type master - slave, which consist that the industrial robot imitates the movements that the operator to set in the haptic device. To carry out the execution, we used expert mode programming which possesses the KR C2 controller, which allowed to achieve serial communication with the device interface.

### **Key words:**

- **ROBOTICS**
- **TELEOPERATION**
- **HAPTICS**
- **DEGREES OF FREEDOM**
- **SERIAL COMMUNICATION**

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se redacta sobre la robótica industrial, sus antecedentes, importancia y desarrollo. Además se plantea la justificación y alcance del presente proyecto de titulación. Se establecen también los objetivos que se esperan obtener a la finalización del proyecto con el dispositivo háptico para el manipulador robótico industrial KUKA KR16.

### **1.2. ANTECEDENTES**

En los últimos 30 a 40 años hemos sido testigos del gran desarrollo que ha tenido la tecnología en cada una de sus ramas, el impulso de la electrónica, telecomunicaciones y computación han sido de gran ayuda para desarrollar varios dispositivos que hace algunos años parecían ser de un futuro lejano. La robótica ha pasado de ser ciencia-ficción a ser una materia de enseñanza en varias ingenierías. Es por este motivo que la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE posee varios robots, de distintos tipos y morfologías para el aprendizaje de sus estudiantes.

Es importante enmarcar que al adquirir un manipulador robótico industrial de cierta marca, el usuario está obligado a adquirir únicamente hardware y software autorizado por la empresa proveedora. Esto es debido a la arquitectura cerrada con la se fabrican no solo los robots sino también otros dispositivos, encareciendo así su costo final.

El Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DECEN) cuenta con tres manipuladores robóticos industriales de la marca KUKA, los cuales están destinados al desarrollo de prácticas de laboratorio por parte de los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica, en estas prácticas ellos pueden interactuar con un manipulador robótico de manera directa y así profundizar sus conocimientos en cuanto a robots industriales.

La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE como líder en la gestión del conocimiento y la tecnología, ha apoyado al desarrollo de varios proyectos que siguen la línea de la robótica y la teleoperación. Como ejemplo se puede citar los siguientes proyectos:

- “Diseño e implementación de un sistema de teleoperación para el manipulador CRS A255 utilizando un dispositivo háptico de dos dimensiones”. (Gómez & Hernández, 2011)

El manipulador CRS A255 es un robot que consta de cinco grados de libertad, mientras que el dispositivo háptico implementado consta de dos articulaciones, se utiliza el controlador propio del robot C500, por lo que se utiliza lenguaje de programación RAPL-II.

- “Diseño y construcción de una plataforma robótica para exteriores teleoperada, para el laboratorio de manufactura”. (Guano & Sevilla, 2015).

Es un robot móvil diseñado para resistir a factores externos adversos, su software se basa en una plataforma libre para ser compatible con el sistema operativo ROS. La orientación del robot móvil se la realiza mediante teleoperación.

- “Diseño y construcción de un cambiador automático para tres herramientas del brazo robótico KUKA KR 16-2 en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L”. (González & Morales, 2015)

Se realiza un efector final que consta de tres distintos tipos de herramientas, el robot industrial sobre el que se basa este trabajo es el KUKA KR 16, el mismo que va a ser utilizado para la implementación del dispositivo háptico.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente el desarrollo de mandos a distancia que permiten la teleoperación en tiempo real de dispositivos y maquinarias eléctricas o electrónicas se encuentra en uno de sus puntos más altos. Existen varios motivos que justifican el auge de estos productos, por ejemplo: comodidad del operador, facilidad de trabajo, seguridad al trabajar en ambientes peligrosos, etc. Por esta razón se plantea desarrollar un dispositivo háptico de tres grados

de libertad que permita la teleoperación del manipulador robótico industrial KUKA KR16 para tareas de posicionamiento.

Mediante el diseño e implementación del proyecto, se pretende dar a conocer a los alumnos que toman la materia de Robótica industrial el método de programación de tipo Aprendizaje Directo del manipulador industrial KUKA KR16. El tipo de programación guiada (aprendizaje directo) consta como contenido de estudio en el sílabo de la materia antes mencionada y es importante realizar el refuerzo de la teoría vista en clase con prácticas de laboratorio.

El proyecto aportará al desarrollo de líneas de investigación de la Universidad, ya que éste sería el primer dispositivo háptico desarrollado para un manipulador robótico industrial de características robustas por parte del Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica (DECEM). Además con la aplicación de este proyecto se pretende profundizar los estudios en el campo de la teleoperación por parte del departamento.

#### **1.4. ALCANCE DEL PROYECTO**

El proyecto abarca el diseño e implementación de un dispositivo háptico de tres grados de libertad para el manipulador robótico industrial KUKA KR16. Normalmente el dispositivo háptico debe tener las características del manipulador robótico que se desea controlar, pero en este caso, debido a la dificultad en la arquitectura del KUKA KR16 y sus seis grados de libertad se plantea un prototipo que conste de tres articulaciones, las mismas que son requeridas como el número mínimo de grados de libertad para el posicionamiento de un robot industrial.

El dispositivo se constituirá de tres componentes:

- Componente Mecánico
- Componente Eléctrico/Electrónico y
- Componente de Control.

El componente mecánico consistirá en una cadena cinemática de configuración rotacional, rotacional, rotacional (RRR), a una escala de reducción respecto del robot KUKA KR16, de tal forma que el movimiento del robot KUKA sea el mismo que el usuario configure en el dispositivo háptico.

El componente eléctrico y de control permitirán el acondicionamiento de señales que entreguen los sensores y la adquisición de datos necesarios para medir el movimiento angular que se genere en las articulaciones del dispositivo háptico, por otro lado está el desarrollo de la interfaz que servirá de nexo entre el controlador del KUKA KR16 y el dispositivo háptico.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo General**

- Diseñar e implementar un dispositivo háptico que permita el control de posicionamiento manual del robot industrial KUKA KR16.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar una cadena cinemática de tres grados de libertad a una escala de reducción respecto del robot industrial KUKA KR16.
- Realizar el acondicionamiento de las señales emitidas por los sensores de cada articulación.
- Realizar una interfaz de comunicación entre el dispositivo háptico y el software de control del robot KUKA KR16.
- Realizar pruebas de funcionalidad.

## **CAPÍTULO II**

### **ESTADO DEL ARTE**

#### **2.1. MANIPULADORES ROBÓTICOS INDUSTRIALES**

##### **2.1.1. Robot Industrial**

Dentro del estudio de la materia de robótica se revisan varios conceptos como inicio de esta asignatura, entre los cuales se tiene varias definiciones que describen a un "robot industrial" o "manipulador industrial", a continuación se citan algunos conceptos generados por reconocidas asociaciones y organizaciones internacionales, como por ejemplo:

- La "Asociación de Robots Industriales, RIA" dice: "Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas" (Robotic Industry Association, 1990).
- La "Organización de Estándares Internacionales, ISO" realizó ligeros cambios a la definición anterior y expresa lo siguiente acerca de un robot industrial: "Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas" (International Organization for Standardization, 2012).

En comparación con el concepto expuesto por la RIA, en esta definición aparecen las palabras "Grados de libertad", haciendo referencia a la constitución mecánica y formas de movimiento del robot industrial.

- La definición de la "Federación Internacional de Robótica, IFR" presenta una definición que separa el concepto de "Robot industrial" con respecto a otros robots: "Por robot industrial de manipulación se entiende una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar

materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento” (Federación Internacional de Robótica, 1988).

Después de revisar las tres definiciones se observa que tienen en común ciertos criterios para describir a un robot industrial, en los tres conceptos citados lo ven como un mecanismo reprogramable poli-funcional de varios grados de libertad.

### 2.1.2. Estructura mecánica de un robot industrial

La constitución física de un robot industrial tiene cierto grado de similitud con la parte superior del cuerpo humano como se presenta en la Figura 1, dependiendo de los grados de libertad que el robot posea, tal es así que la mayoría de robots industriales poseen las siguientes partes:

- Tronco
- Hombro
- Brazo
- Codo
- Muñeca

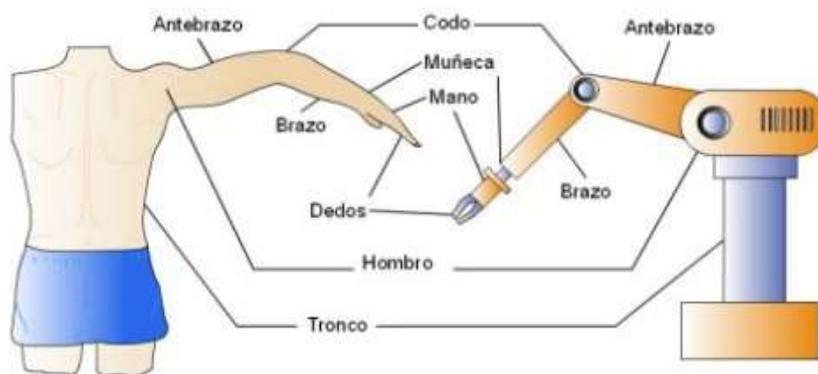


Figura 1. Comparación del robot industrial con el cuerpo humano.  
Fuente: (streamkiller, 2013)

Mecánicamente el robot se constituye de un mecanismo sólido formado por eslabones y articulaciones. Los eslabones se unen mediante articulaciones, las cuales “permiten el movimiento relativo entre cada dos

eslabones consecutivos". (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1997). Un esquema breve de un robot industrial se muestra en la Figura 2.

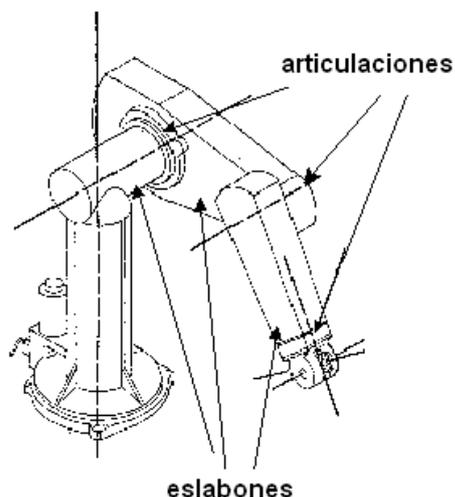


Figura 2. Elementos mecánicos del robot industrial.  
Fuente: (González V. , 2002)

Las articulaciones pueden realizar varios tipos de movimientos, como por ejemplo de rotación, desplazamiento, esférico entre otros. Los tipos de articulaciones se muestran en la Figura 3, pero en el diseño de robots industriales se consideran principalmente las articulaciones de movimiento rotacional y prismático respectivamente.

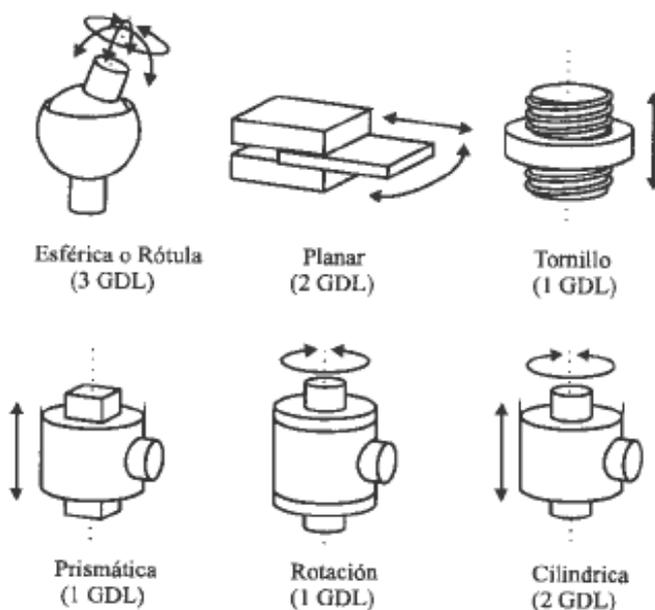


Figura 3. Tipos de articulaciones.  
Fuente: (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1997)

### 2.1.3. Configuraciones de robots industriales

La combinación de varios tipos de articulaciones generan distintos tipos de configuraciones a la hora de diseñar un robot industrial, creando una variedad de movimientos que ayudan a su polifuncionalidad en la realización de tareas. En la figura 4 se muestra las principales configuraciones utilizadas en el desarrollo de robots industriales, tomando en cuenta únicamente el posicionamiento del efector final; es decir utilizando tres grados de libertad.

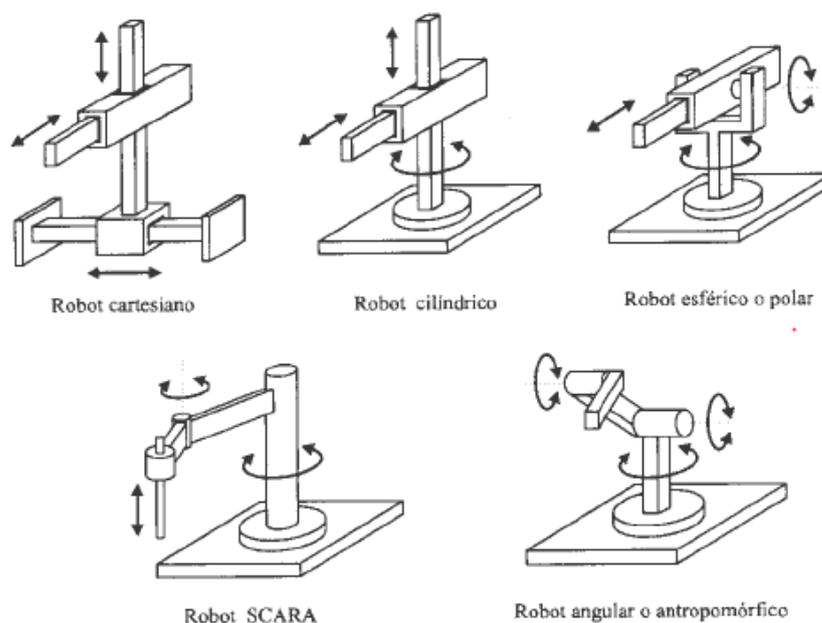


Figura 4. Configuraciones frecuentes de robots industriales.  
Fuente: (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1997)

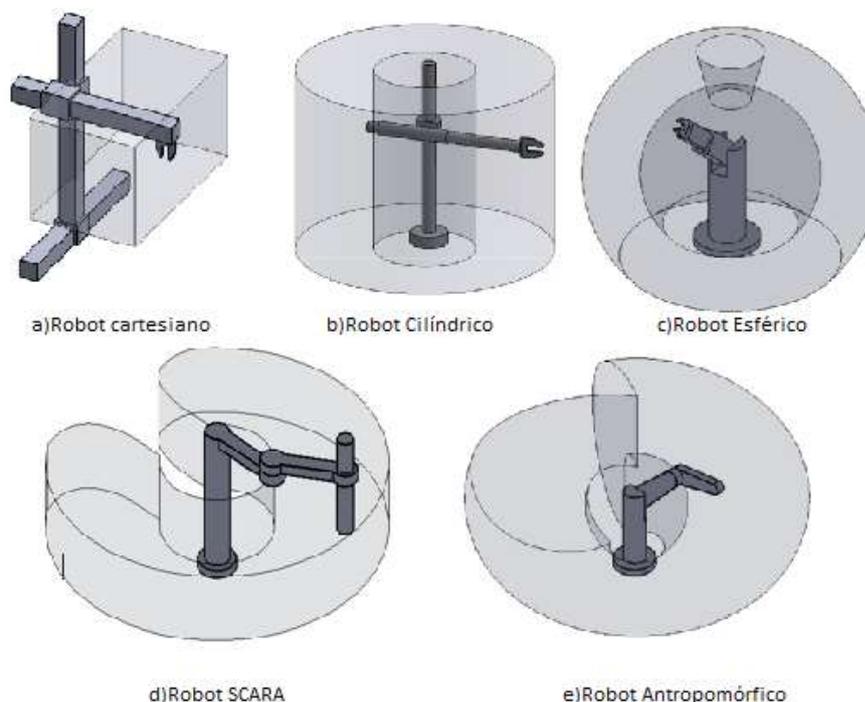
### 2.1.4. Principales especificaciones de un robot industrial

Entre las principales características para elegir un robot industrial encontramos las siguientes:

#### 2.1.4.1. Espacio de Trabajo

Es el volumen del campo de acción dentro del cual se puede mover el extremo de la muñeca del robot industrial, es decir sin tomar en cuenta su efector final. Este volumen depende de las dimensiones de los eslabones, el tipo de articulaciones y los grados de libertad con los que cuenta el manipulador.

El robot cartesiano genera un espacio de trabajo regular cubico, el robot cilíndrico y esférico presentan un espacio de trabajo semejante a sus nombres mientras que el robot antropomórfico y SCARA generan espacios de trabajo irregulares, esto se muestra en la Figura 5.



*Figura 5. Espacio de trabajo de robots industriales.*

#### **2.1.4.2. Grados de libertad**

Se considera grado de libertad a “cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior”. (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1997).

El número de grados de libertad por los que un robot industrial está constituido, es el resultado de la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen. Es importante resaltar que para lograr posicionar y orientar un objeto se necesita de al menos seis grados de libertad, tres para posicionamiento y los tres restantes para la orientación del objeto. También es importante señalar que el aumento de articulaciones en un robot significa un aumento en su coste, tanto monetario como computacional, esto se debe a la complejidad de su modelamiento matemático.

### 2.1.4.3. Precisión del movimiento

Existen tres factores de los cuales depende la precisión del movimiento de un manipulador robótico industrial, estos factores son:

- Resolución espacial: “La resolución representa el mínimo incremento que puede aceptar la unidad de control del robot.” (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1997).
- Exactitud: “Se refiere a la capacidad de un robot para situar el extremo de su muñeca en un punto señalado dentro del volumen de trabajo”. (González V. , 2002)
- Repetibilidad: es la característica que permite a un robot dirigirse a una posición específica y volver las veces que el programador lo solicite a una misma posición.

### 2.1.4.4. Capacidad de carga

Es el peso máximo con el cual puede trabajar el manipulador sin perder su precisión al realizar un movimiento. Esta característica depende principalmente del tipo de actuadores con los que está constituido el manipulador robótico industrial.

En la Figura 6 se muestra al KUKA TITAN el cual posee una capacidad de carga de 1000 Kg.



*Figura 6. Kuka TITAN.  
Fuente: (KUKA Robot Group, 2015)*

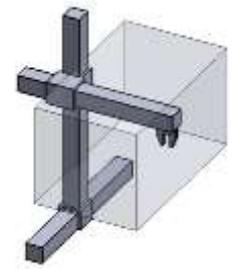
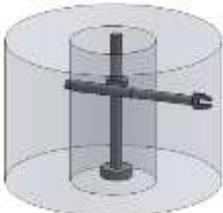
### 2.1.4.5. Velocidad

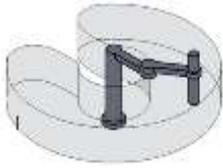
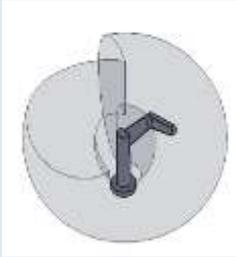
Esta característica de los robots industriales influye directamente en la eficiencia de un proceso, ya que a mayor velocidad se reduce el tiempo necesario para realizar una tarea. “Los rangos normales de velocidad están en el rango de 1 a 4 m/s con carga máxima”. (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1997).

### 2.1.5. Principales configuraciones de robots industriales

En la Tabla 1 se presentan las principales configuraciones morfológicas de los manipuladores robóticos industriales.

**Tabla 1**  
**Principales morfologías de los robots industriales**

Nombre	Configuración geométrica	Ventajas	Desventajas
<b>Robot cartesiano</b> Articulaciones: - Prismática - Prismática - Prismática		Presenta buena precisión y velocidad constante en todo su espacio de trabajo. Modelamiento matemático simple	Necesita de mayor espacio para su instalación respecto a otras morfologías.
<b>Robot cilíndrico</b> Articulaciones: - Rotacional - Prismática - Prismática		Presenta un modelamiento matemático de nivel medio.	Su inercia varía dependiendo de la distancia del eje.
<b>Robot esférico</b> Articulaciones: - Rotacional - Rotacional		Volumen de trabajo grande.	Modelamiento matemático complejo.

- Prismática			
<p><b>Robot SCARA</b></p> <p>Articulaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rotacional</li> <li>- Rotacional</li> <li>- Prismática</li> </ul>		<p>Se puede conseguir alta precisión y rapidez.</p>	<p>Presenta inercia alta cuando se encuentra extendido.</p>
<p><b>Robot antropomórfico</b></p> <p>Articulaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rotacional</li> <li>- Rotacional</li> <li>- Rotacional</li> </ul>		<p>Puede realizar trayectorias complejas. Alta maniobrabilidad.</p>	<p>Modelamiento matemático complejo. Su inercia es alta cuando se encuentra totalmente extendido</p>
<p><b>Robot delta</b></p> <p>Formado por más de una cadena cinemática independiente</p>		<p>Brinda estabilidad estructural. Posee mejor precisión que los robots serie.</p>	<p>Su análisis cinemático y esquemas de control son más complejos. Su espacio de trabajo es limitado.</p>

## 2.2. ROBOT KUKA KR16

El robot KUKA KR 16 es uno de los manipuladores robóticos más utilizados a nivel industrial, gracias a su diseño robusto, flexibilidad, versatilidad, ahorro de espacio, alta precisión entre otras características. El robot KUKA KR16 está diseñado para trabajar en ambientes extremos como zonas con alto grado de suciedad, altas temperaturas, etc.

### 2.2.1. Componentes del robot industrial KUKA KR 16

En la Figura 7 se muestran los componentes de los cuales se constituye el robot industrial KUKA KR 16, los cuales son:

- Manipulador
- Cables de conexión
- Controlador
- Teach pendant (KCP)

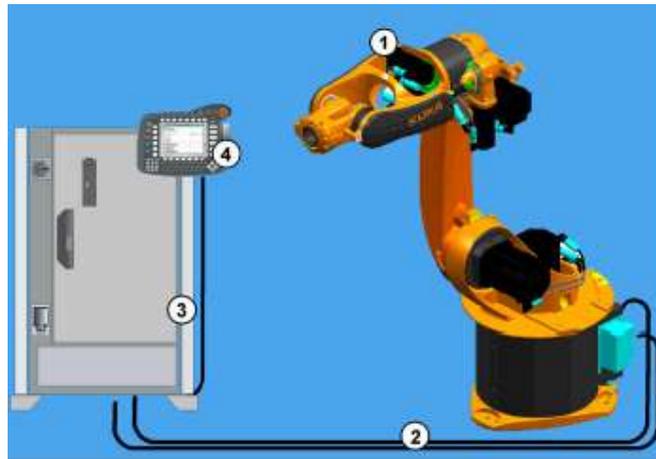


Figura 7. Componentes del robot industrial KUKA KR16.  
Fuente: (KUKA Roboter GmbH, 2013)

### 2.2.2. Características del robot industrial

En la Tabla 2 se indican las principales características del robot industrial KUKA KR16.

**Tabla 2**  
**Principales características del KUKA KR16**

Características Técnicas	
Numero de ejes	6
Volumen de trabajo	15.44 m <sup>3</sup>
Repetibilidad (ISO 9283)	±0.05 mm
Peso	235 Kg
Capacidad de carga	16 Kg
Tipo de protección	IP65
Unidad de control	KR C2

Fuente: (KUKA Robot Group, 2009)

Las articulaciones que posee este robot industrial son de tipo rotacional, en la Figura 8 se puede observar la dirección del movimiento de cada uno de sus ejes y en la Tabla 3 se indican los valores de rotación limitados por el software y velocidad que cada eje puede alcanzar.

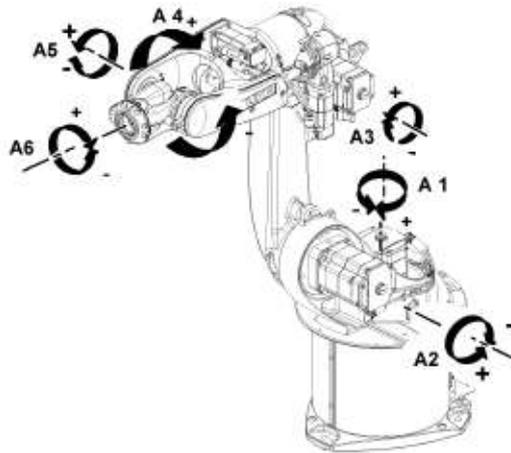


Figura 8. Rotación de los ejes.  
Fuente: (KUKA Roboter GmbH, 2013)

**Tabla 3**  
**Datos de los ejes del KUKA KR16**

Eje	Rango de movimiento	Velocidad
A1	$\pm 185^\circ$	156 °/s
A2	+35° a -155°	156 °/s
A3	+154° a -130°	156 °/s
A4	$\pm 350^\circ$	330 °/s
A5	$\pm 130^\circ$	330 °/s
A6	$\pm 350^\circ$	615 °/s

Fuente: (KUKA Robot Group, 2009)

### 2.2.3. Lenguaje de programación KRL

Existen varias formas para que el operador de un robot industrial pueda comunicarse con el controlador del mismo, con el objetivo de programar el movimiento que deberá cumplir el robot industrial. Dentro de las formas de programación usualmente utilizadas en robots industriales se encuentran las

siguientes: programación utilizando lenguaje de alto nivel y programación guiada o comúnmente llamada de enseñanza y repetición.

El lenguaje de programación de alto nivel utilizado por los robots de la marca KUKA es el lenguaje KRL, estas siglas representan la abreviatura de “KUKA Robot Language”. Este lenguaje de programación permite realizar trayectorias de movimiento, operar con variables y trabajar con entradas y salidas que pueden ser analógicas o digitales, además de otras funciones avanzadas que se detalla en el manual de programación “KR C2 / KR C3 Expert Programming”. (KUKA Roboter GmbH, 2003).

El KRL cumple con las características indispensables para todo lenguaje de programación las cuales son: claridad, sencillez y eficacia, propiedades que hacen que el KRL sea amigable con el programador, disminuyendo así la complejidad de la programación. En la Figura 9 se expone la interfaz gráfica con la que opera el KUKA KR 16.

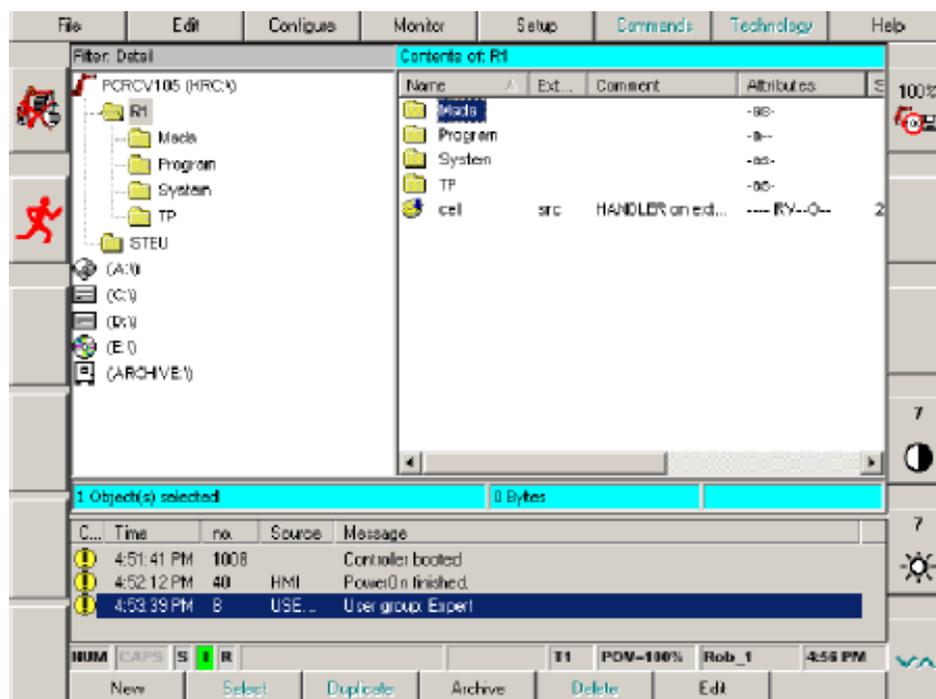


Figura 9. Interfaz gráfica de programación.  
Fuente: (KUKA Roboter GmbH, 2003)

## 2.3. DISPOSITIVOS HÁPTICOS

### 2.3.1. Háptica

Existen varios autores que definen a la háptica de acuerdo a sus respectivos puntos de vista y a las aplicaciones en las cuales han dedicado su estudio. A continuación se presentan dos definiciones, las cuales tienen cierto nivel de concordancia con la aplicación de este proyecto:

- “Se le denomina háptica a las percepciones táctiles que se realizan de manera activa y voluntaria, de modo que es necesario el uso propositivo de dedos y manos durante el descubrimiento de objetos en nuestro entorno para poder afirmar que se está usando el sentido háptico”. (García & Díaz, 2010).
- El término “Háptico”, proveniente de la voz griega “hapteshai” (tacto), es utilizado desde comienzos del siglo XX para referirse a estudios sobre el sentido del tacto en el ser humano. (Fernández, Barreiro, & Cesáreo , 2006)

Estas dos definiciones concuerdan en que háptica o háptico se refiere a la relación directa que existe entre el sentido del tacto de una persona y un objeto.

Uno de los primeros sentidos que desarrolla el ser humano es el sentido del tacto. Este comprende la percepción de estímulos mecánicos, eléctricos, térmicos o químicos, los cuales provienen del entorno en el que la persona se desenvuelve.

“Los sistemas hápticos se enfocan a cuatro tipos de somato-receptores:” (Alvarado, Butrón , Díaz Diego, & González Luis, 2013)

- Termo-receptores: Encargados de reconocer los cambios de temperatura.
- Propioceptores: Su objetivo es informar sobre la posición del cuerpo.
- Mecano-receptores: Se activan ante estimulaciones mecánicas.
- Nocio-receptores.- Se activan mediante estimulaciones extremas que podrían causar daño.

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de un dispositivo háptico.



*Figura 10. Dispositivo háptico.  
Fuente: (Nuño & Basañez , 2004)*

### **2.3.2. Teleoperación**

“Es el conjunto de tecnologías que comprenden la operación o gobierno a distancia de un dispositivo por un ser humano”. (Nuño & Basañez , 2004)

“Los sistemas teleoperados proporcionan al operador humano la capacidad de llevar a cabo tareas en un entorno remoto”. (Fernández, Barreiro, & Cesáreo , 2006).

En su mayoría, los robots industriales mantienen una comunicación de tipo maestro - esclavo, donde un robot industrial u otro dispositivo imita el movimiento que el operador configura en el mecanismo maestro.

Los elementos principales de los cuales se compone un sistema de teleoperación de tipo maestro – esclavo son los que se muestran en la Figura 11 y se detallan a continuación:

- Operador: Es la persona que configura y monitorea el movimiento que se desea obtener en el robot industrial.
- Dispositivo Maestro: Es aquel que genera las señales de referencia para el movimiento del dispositivo esclavo.
- Interfaz de comunicación: “Se trata del conjunto de dispositivos que permiten la interacción entre el operador y el sistema de teleoperación.” (Alvarado, Butrón , Díaz Diego, & González Luis, 2013)

- Dispositivo Esclavo: Reproduce los movimientos que el operador configura en el dispositivo maestro.

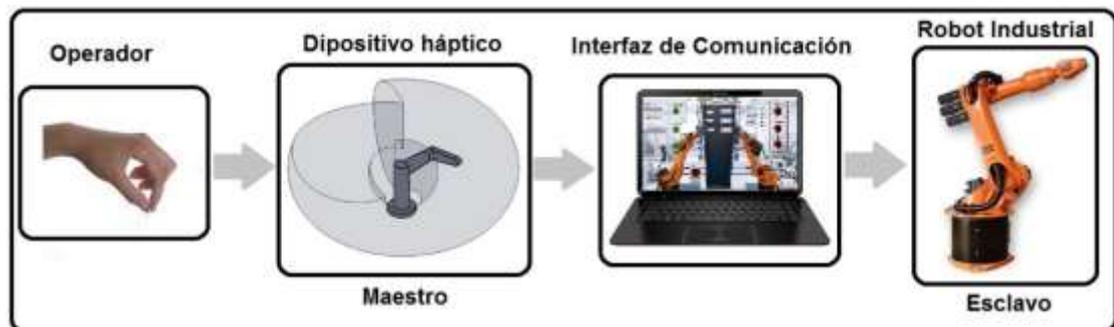


Figura 11. Componentes de un sistema de tipo maestro –esclavo.

### 2.3.3. Aplicaciones

Actualmente uno de los principales campos de aplicación para la teleoperación ha sido la robótica en todas sus áreas de acción, siendo indispensable en lugares o ambientes donde existen peligros activos para las personas. Los principales campos de aplicación de la teleoperación son los siguientes:

- Industria espacial: existen varias razones para el uso de la teleoperación de robots en la industria espacial, por ejemplo resulta más económico enviar un robot en lugar de una persona para explorar otro planeta, además se reduce el riesgo de perder la vida de un astronauta en el cumplimiento de su trabajo. En la Figura 12 se observa una de las sondas enviadas a Marte por parte de la NASA.

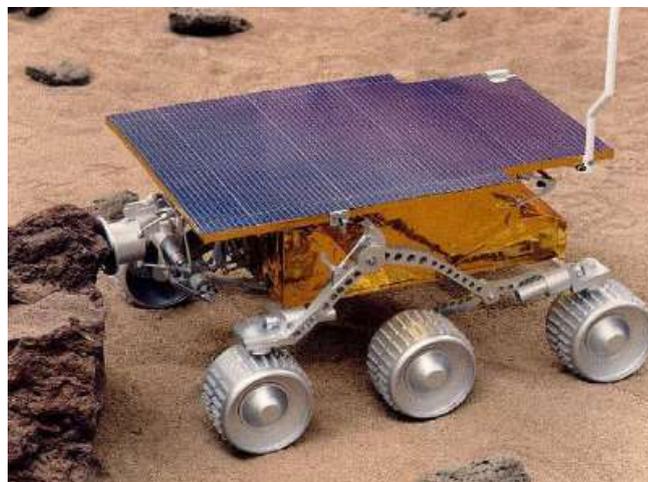


Figura 12. Sojourner (rover).  
Fuente: (NASA, 2012)

- Aplicaciones militares: La industria militar hace uso de la teleoperación tanto en equipos aéreos como en terrestres y marítimos, con el fin de precautelar la vida de las personas que usualmente tripulan estos medios. En la Figura 13 se puede observar un UAV, el cual fue diseñado con el propósito de realizar reconocimiento y localización de objetivos militares.



*Figura 13. Predator B.  
Fuente: (Atomics General, 2016)*

- Aplicaciones médicas: Con la aparición de prótesis y dispositivos de asistencia para discapacitados se ha visto una creciente aplicación de la robótica y la teleoperación en el sector médico, gracias a la precisión con la que cuentan ciertos robots, se ha podido utilizarlos para realizar ciertas cirugías, en las cuales el médico no ha tenido que estar necesariamente presente en el quirófano, sino que ha realizado esta tarea desde otro lugar distinto a la sala de operación, llegando incluso a realizar cirugías desde otra ciudad.

En la Figura 14 se muestra el equipo médico para cirugías de la marca daVinci.



*Figura 14. Sistema quirúrgico da Vinci.  
Fuente: (PALEX MEDICAL S.A., 2016)*

- **Aplicaciones Industriales:** En el campo industrial se utiliza la teleoperación de robots principalmente para el manejo de materiales peligrosos o cuando se trabaja en ambientes contaminados, los cuales son perjudiciales para la salud del operador.

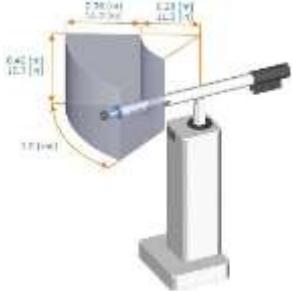
Como se puede ver en cada una de las aplicaciones mencionadas antes, el principal objetivo de la teleoperación de robots es velar por la salud e integridad física del ser humano, evitando su exposición en ambientes peligrosos y en ciertos casos reduciendo el costo monetario como en el caso de aplicaciones espaciales.

#### **2.3.4. Dispositivos hápticos comerciales**

Actualmente existen varias empresas que se encargan de la manufactura y comercialización de dispositivos hápticos, varias de estas empresas presentan como inconvenientes el elevado costo y compleja manufactura de los dispositivos hápticos que distribuyen.

En la Tabla 4 se muestran las características de algunos dispositivos hápticos comerciales de las marcas “Force dimension”, “SensAble” y “FCS Robotics”.

**Tabla 4**  
**Dispositivos hápticos comerciales**

Modelo	Figura	Características
<p><b>Phantom OMNI</b></p>	 <p><i>Figura 15. Phantom OMNI. Fuente: (Sensable, 2016)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área de trabajo: 160 ancho, 120 alto, 120 diámetro [mm]</li> <li>• Peso: 3 lb</li> <li>• Resolución nominal de posición: ~0.055 mm</li> <li>• Tipo de sensores x,y,z: Encoders digitales</li> <li>• Sensores pitch, roll, yaw: Potenciómetros lineales 5%</li> </ul>
<p><b>HapticMaster</b></p>	 <p><i>Figura 16. HapticMaster. Fuente: (VRLAB, s.f.)</i></p>	 <p><i>Figura 17. Área de trabajo HapticMaster. Fuente: (VRLAB, s.f.)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Área de trabajo:</li> <li>• Grados de libertad: 3</li> <li>• Resolución de posición: &lt;0.004 mm</li> <li>• Velocidad máxima: 1 m/s</li> </ul>
<p><b>Force dimensión Omega 3</b></p>	 <p><i>Figura 18. Omega.3 Haptic device. Fuente: (Force Dimension, 2016)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área de trabajo: traslación 160 diámetro x 110 mm</li> <li>• Grados de libertad: 3 en traslación.</li> <li>• Resolución de posición: &lt;0.01 mm</li> <li>• Estructura: Paralela</li> </ul>

De la tabla presentada se puede encontrar ciertas características que ayudaran en el proceso de diseño del dispositivo háptico, entre las que podemos mencionar:

- Su estructura debe ser ergonómica, resistente y ligera, con el objetivo de que el operador se sienta cómodo al manipular el dispositivo.
- Todos los dispositivos hápticos mostrados constan de tres grados de libertad.
- En ninguno de los dispositivos los eslabones sobrepasan los 200 [mm] de longitud.

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

#### **3.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE**

Para el diseño de la cadena cinemática encargada de posicionar del dispositivo háptico es necesario considerar aspectos esenciales que la estructura debe cumplir para que sea ergonómica y de fácil manipulación, convirtiéndose entonces en las necesidades a cumplir las que se detallan a continuación:

- Didáctico.
- Pequeño.
- Resistente ante la manipulación y maniobrabilidad.
- Ligero.
- Un volumen de trabajo aproximado a escala con respecto al KUKA KR16.

##### **3.1.1. Diseño Mecánico de la cadena cinemática.**

Los requisitos referentes al aspecto mecánico para satisfacer las necesidades planteadas anteriormente son los siguientes:

- 3 grados de libertad; los encargados del posicionamiento del robot KUKA KR16.
- Escala 1:5 del robot Industrial.
- Resistencia ante una fuerza de tracción de 100N.
- Carcasas plásticas para otorgarle un aspecto agradable a la vista.
- Material de la estructura en base a aluminio.

##### **3.1.2. Geometría del Dispositivo Háptico.**

Para lograr un volumen de trabajo que se aproxime al del KUKA KR16 es necesario mantener las dimensiones del mismo a escala; después del análisis de las características del KUKA KR16 se eligió una escala de 1:5. La elección de esta escala también se basa en el tamaño de modelos de dispositivos

comerciales que fueron citados con anterioridad, En la figura 19 se muestran las dimensiones de los eslabones que conforman al robot KUKA, a los cuales se efectúa el factor de escala seleccionado y de esta forma obtener las medidas deseadas para la estructura final del dispositivo háptico.

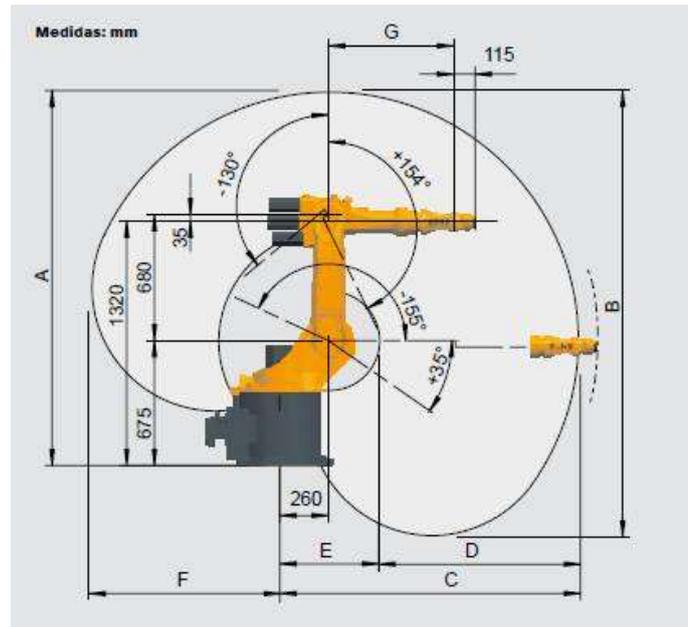


Figura 19. Dimensiones del robot KUKA.  
Fuente: (KUKA Roboter GmbH, 2003)

Se aclara que la medida G en el dispositivo háptico se la considera hasta el final del actuador que más sobresale en el robot KUKA, con el fin de evitar choques con objetos cercanos. Una vez aplicado el factor de escala obtenemos el siguiente modelo con las medidas mostradas a continuación en la Figura 20.

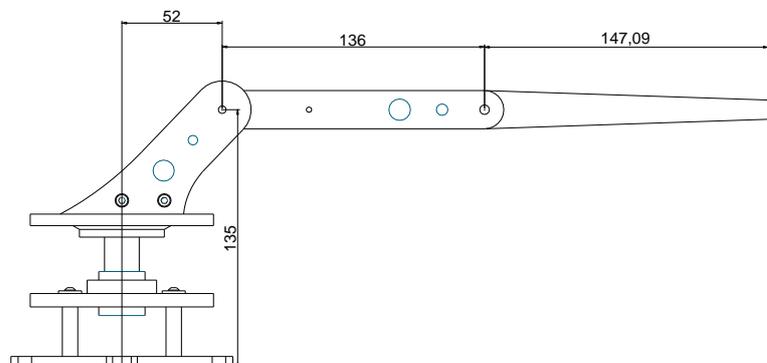


Figura 20. Dimensiones de la estructura del dispositivo háptico.



Figura 21. Modelo del dispositivo Háptico.

### 3.1.3. Análisis estático de la estructura mecánica.

El análisis estático de la estructura se realiza bajo la consideración del peso y propiedades de cada uno de los componentes que conforman el dispositivo y además se toma en cuenta una fuerza de tracción de 100N sobre el dispositivo como muestra la figura 22.

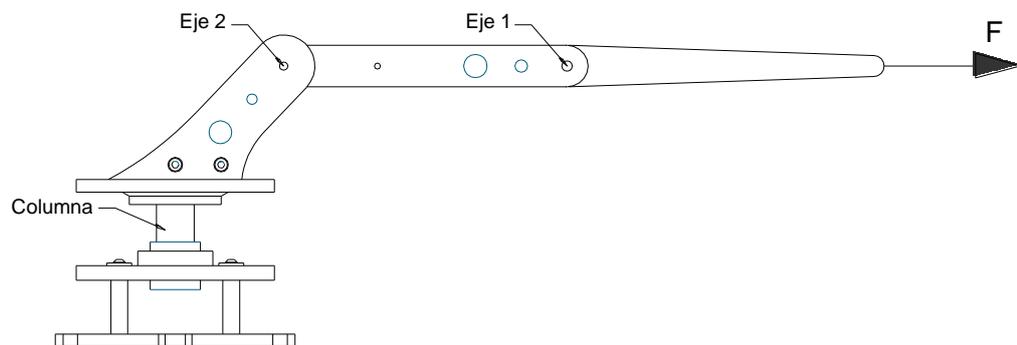


Figura 22. Estructura del dispositivo sometido a una fuerza de 100N.

### 3.1.3.1. Análisis estático del Eje 1.

Consideraciones:

- Diámetro mínimo del eje 5mm (para acoplamiento de engrane).
- Fuerza aplicada 100N.
- Material AISI 1018.

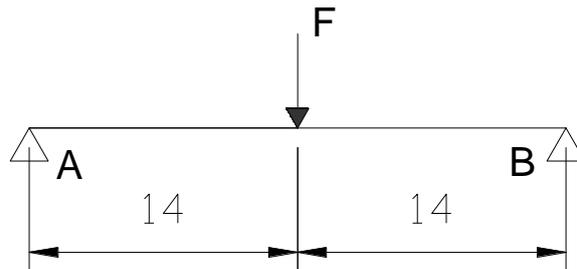


Figura 23. Eje 1 analizado como viga.

Donde:

$$F = 100N$$

$$R_A = R_B = \frac{F}{2}$$

$$V = 50N$$

$$M_{m\acute{a}x} = R_A * (0.014) = 0.7Nm$$

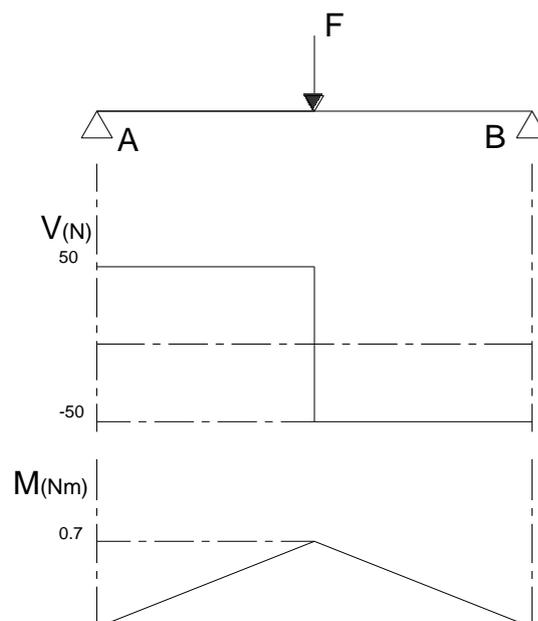


Figura 24. Diagramas de fuerza cortante y momento flector eje 1.

**Esfuerzo Flector:**

$$\sigma = \frac{M_{m\acute{a}x}(c)}{I} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo flector.

$M_{m\acute{a}x}$ : Momento máximo.

$c$ : Distancia hacia la superficie externa de la sección transversal.

$I$ : Momento de inercia de la sección transversal.

**Esfuerzo cortante para vigas de sección circular:**

$$\tau = \frac{4V}{3A} \quad (2)$$

Donde:

$\tau$ : Esfuerzo cortante.

$V$ : Fuerza cortante.

$A$ : rea de la sección transversal.

**Acero AISI 1018**

$$S_u = 400 \text{ MPa}$$

$$S_y = 200 \text{ MPa}$$

Esfuerzo Flector:

$$\sigma = \frac{M_{m\acute{a}x}(c)}{I} = \frac{0.7Nm(r)}{\frac{1}{4}\pi r^4} = \frac{0.7Nm}{\frac{1}{4}\pi(2.5 \times 10^{-3})^3} = 57.04 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{4V}{3A} = \frac{4(50N)}{3\pi r^2} = \frac{4(50N)}{3\pi(2.5 \times 10^{-3})^2} = 3.39 \text{ MPa}$$

**Esfuerzo cortante máximo:**

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (3)$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{57.04}{2}\right)^2 + 3.39^2}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 28.72 \text{ MPa}$$

**Factor de seguridad:**

$$FS = \frac{0.5(S_y)}{\tau_{m\acute{a}x}} \quad (4)$$

Donde:

$FS$ : Factor de seguridad.

$S_y$ : Esfuerzo de fluencia del material.

$\tau_{m\acute{a}x}$ : Esfuerzo cortante máximo.

$$FS = \frac{0.5(200)}{28.72} = 3.48$$

Para comprobar que los cálculos realizados son correctos se procede a efectuar una simulación con software CAE para un eje de 5mm en acero AISI 1018 y verificar el esfuerzo que se genera en el eje con la carga aplicada.

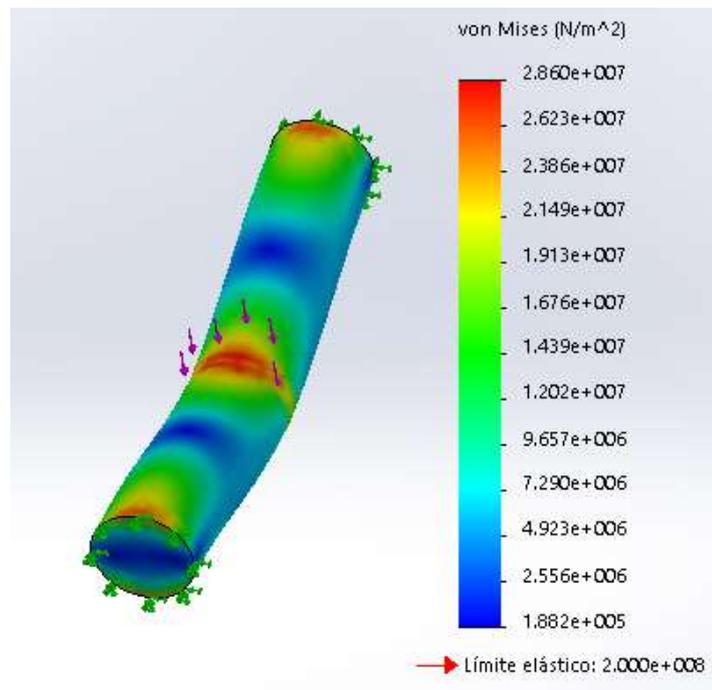


Figura 25. Esfuerzo producido en eje de 5mm de diámetro.

A continuación se muestra el diseño del eje 1 considerando como diámetro mínimo 5mm, que es la sección donde se apoyarán los engranes. Los cambios de diámetros en el eje sirven como apoyo y referencia para el acople de las demás piezas, para mantener las distancias que se necesitan en el dispositivo háptico.

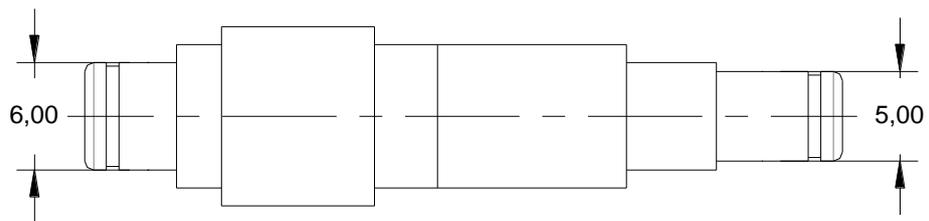


Figura 26. Geometría del eje 1

En la Figura 27 se muestra la simulación realizada para el análisis estático del eje 1 considerando su geometría final.

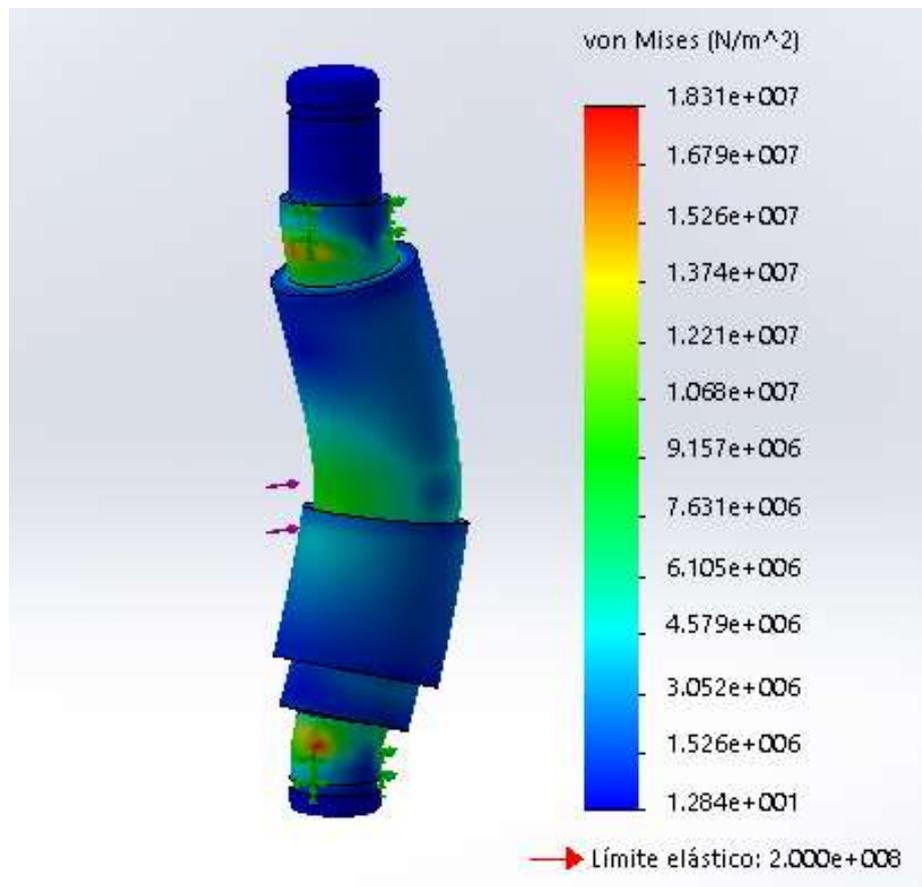


Figura 27. Esfuerzo generado en eje 1 al aplicar la fuerza de 100N

### Acoplamiento del Eje 1 a la estructura

En la Figura 28 se muestra el acoplamiento del eje 1 a la cadena cinemática del dispositivo háptico.

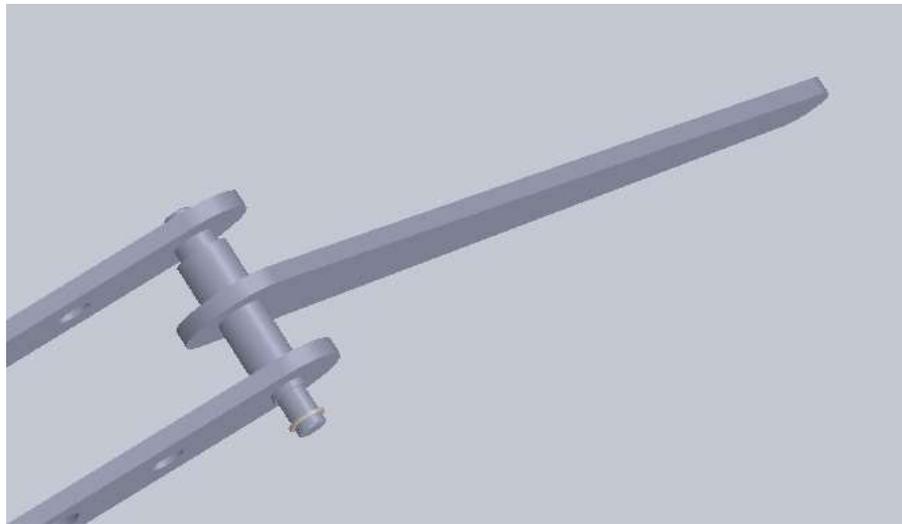


Figura 28. Acoplamiento del eje al dispositivo háptico.

#### 3.1.3.2. Análisis estático del Eje 2.

Consideraciones:

- Diámetro mínimo del eje 5mm (para acoplamiento de engrane).
- Fuerza aplicada 100N al extremo de la estructura.
- Material AISI 1018.
- Perforación de 2.5 mm para cruce de cables.

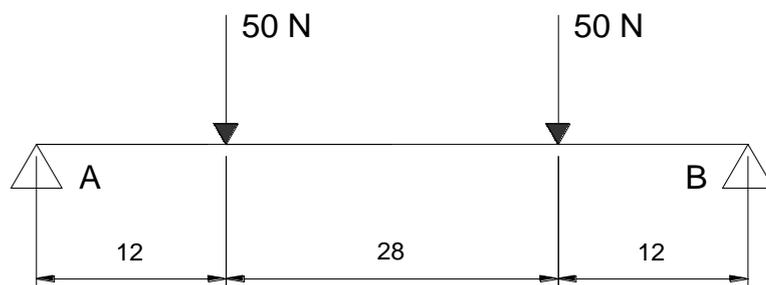


Figura 29. Eje 2 analizado como viga

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A + R_B + 50N + 50N = 0$$

$$\sum M_A = 0$$

$$R_B(0.052) - 50N(0.040) - 50N(0.012) = 0$$

$$R_B = \frac{50N(0.040) + 50N(0.012)}{0.052} = 50N$$

$$R_A = 50N$$

$$V = 50N$$

$$M_{m\acute{a}x} = R_A * (0.012) = 0.6Nm$$

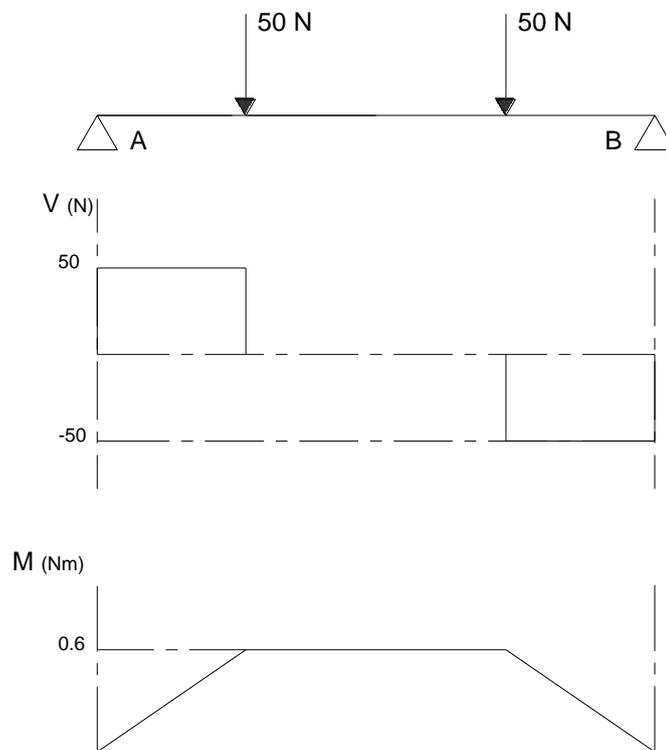


Figura 30. Diagramas de fuerza cortante y momento flector eje 2.

**Esfuerzo flector:**

$$\sigma = \frac{M_{m\acute{a}x}(c)}{I} = \frac{0.6Nm(r)}{\frac{1}{4}\pi r^4} = \frac{0.6Nm}{\frac{1}{4}\pi(3 \times 10^{-3})^3} = 28.29 MPa$$

**Esfuerzo cortante:**

$$\tau = \frac{4V}{3A} = \frac{4(50N)}{3\pi r^2} = \frac{4(50N)}{3\pi(3 \times 10^{-3})^2} = 2.35 MPa$$

**Esfuerzo cortante máximo:**

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{28.29}{2}\right)^2 + 2.35^2}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 14.33 \text{ MPa}$$

Para comprobar que los cálculos realizados son correctos procedemos a realizar una simulación para un eje de 6mm en Acero AISI 1018 y verificar el esfuerzo que se genera en el eje con la carga aplicada.

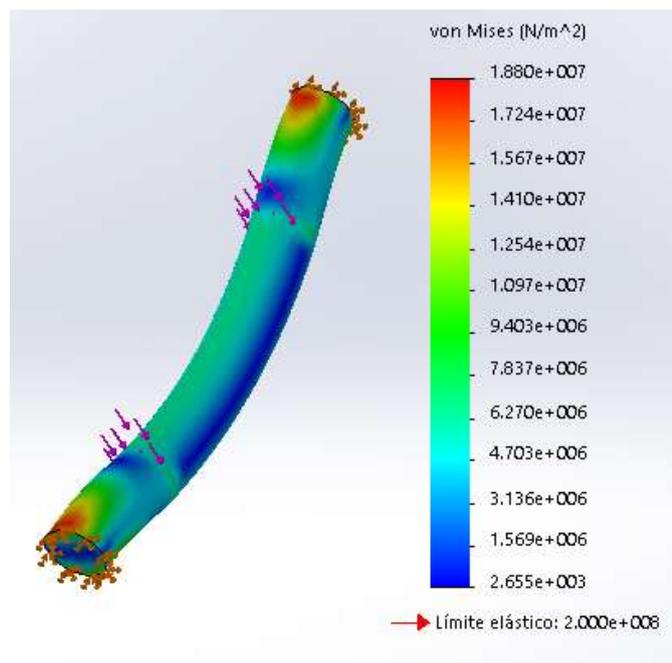


Figura 31. Esfuerzo producido en el eje de 6mm de diámetro.

Con la simulación obtenemos un esfuerzo diferente al aplicar las fuerzas de 50N sobre el eje; con este valor de esfuerzo obtenido en la simulación calculamos el factor de seguridad.

**Factor de seguridad:**

$$FS = \frac{0.5(S_y)}{\tau_{m\acute{a}x}}$$

$$FS = \frac{0.5(200)}{18.8} = 5.32$$

A continuación se muestra el diseño del eje 2 considerando como diámetro mínimo 5mm donde se acoplaran los engranes; la variación de diámetros en el eje sirve como apoyo y referencia para el acople de las demás piezas para mantener las distancias que se necesitan en el dispositivo háptico.

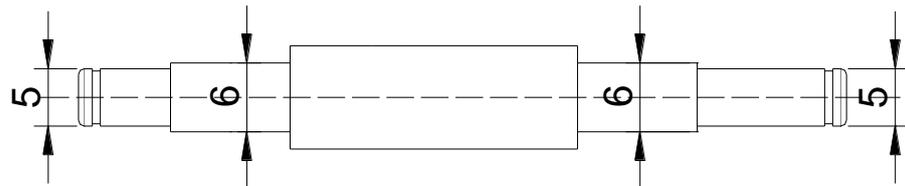


Figura 32. Geometría del eje 2

En la figura 33 se muestra la simulación para el eje 2 bajo las consideraciones previstas anteriormente.

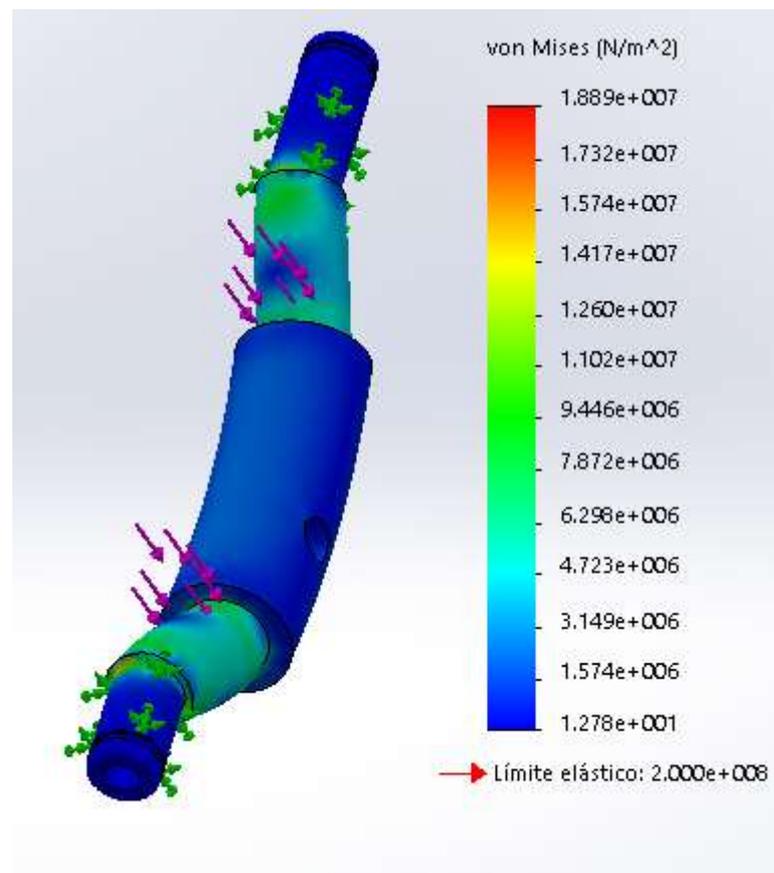


Figura 33. Esfuerzo generado en el eje 2 al aplicar fuerzas de 50N.

### Acoplamiento del Eje 2 a la estructura.

En la Figura 34 se muestra el acoplamiento del eje 2 a la estructura.

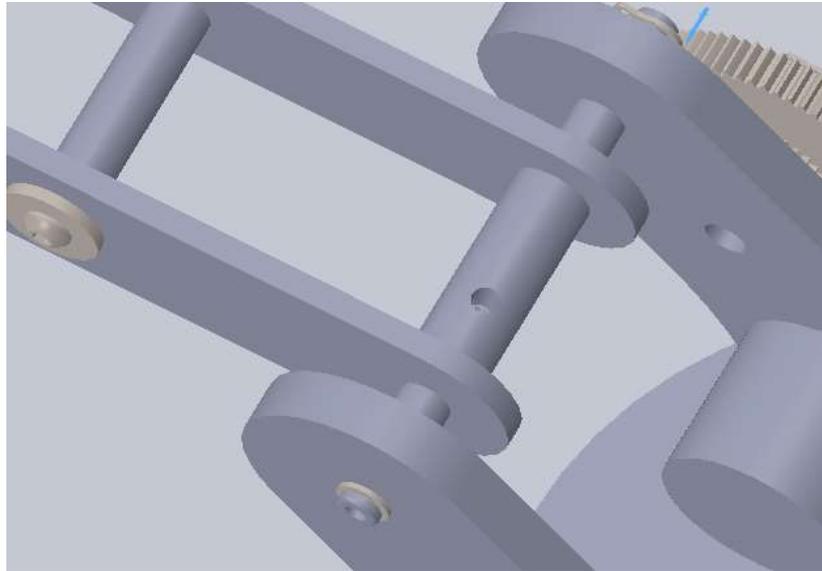


Figura 34. Acoplamiento del eje 2 a la estructura

### 3.1.3.3. Análisis estático de columna giratoria.

Consideraciones:

- Perforación pasante de diámetro 5mm (para cruce de cables)
- Fuerza aplicada 100N al extremo de la estructura.
- Material AISI 1018.
- Acoplamiento con rodamiento axial de diámetro interno 10 mm.

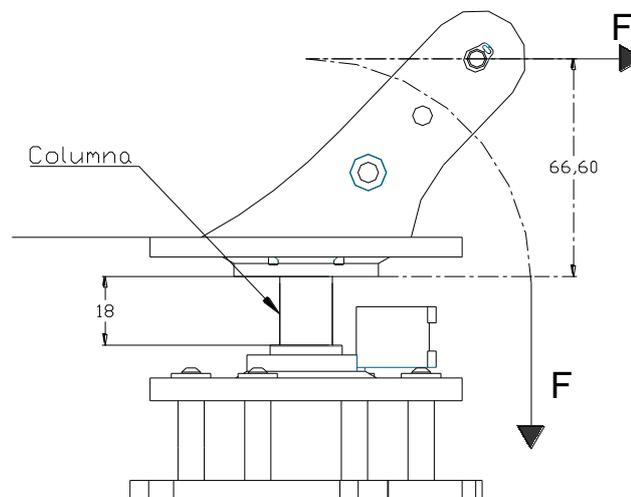


Figura 35. Columna sometida a la fuerza de 100N

La columna se encuentra empotrada con 1 extremo libre, para el análisis se emplea el método de la secante.

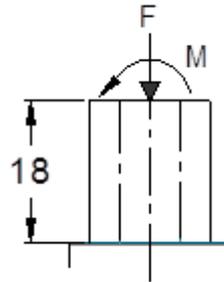


Figura 36. Fuerza y momento según el método de la secante.

Donde  $F = 100N$  y  $M = 100 * 0.0666 = 6.66Nm$

En el catálogo del rodamiento Axial (Anexo 1) se especifica los diámetros que debe tener el eje para garantizar un correcto funcionamiento del rodamiento, con estos parámetros las medidas de la sección transversal se muestran en la figura 37.

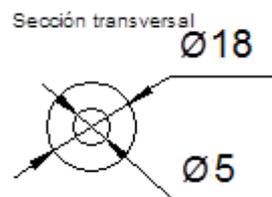


Figura 37. Dimensiones de la sección transversal de la columna.

### Longitud efectiva de la columna.

$$L_e = 2 * L \quad (5)$$

Donde:

$L_e$ : Longitud efectiva de la columna.

$L$ : Longitud de la columna.

$$L_e = 2 * L = 2(0.018) = 0.036 m$$

### Momento de inercia.

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (6)$$

Donde:

$I$ : Momento de Inercia de la sección transversal.

$D$ : Diámetro exterior de la sección.

$d$ : Diámetro interior de la sección.

**Área de la sección transversal.**

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (7)$$

Al reemplazar los valores respectivos en ambas ecuaciones se obtiene lo siguiente:

$$I = 5.119 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$A = 2.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

**Formula de la secante**

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F}{A} + \frac{M * c}{I} \sec \left( \sqrt{\frac{F}{E * I} \frac{L_e}{2}} \right) \quad (8)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ : Esfuerzo máximo en la columna.

$F$ : Fuerza aplicada.

$M$ : Momento en la columna.

$c$ : Distancia al extremo de la sección transversal.

$I$ : Momento de inercia de la sección transversal.

$E$ : Módulo de elasticidad; para acero AISI 1018  $E=205$  GPa.

$L_e$ : Longitud efectiva de la columna.

Al reemplazar los valores en la ecuación se obtiene el siguiente resultado de esfuerzo.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 12.13 \text{ MPa}$$

**Factor de seguridad.**

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{0.5 * S_y}{FS}$$

$$FS = \frac{100}{12.13} = 8.24$$

Las dimensiones de diseño para la columna son:

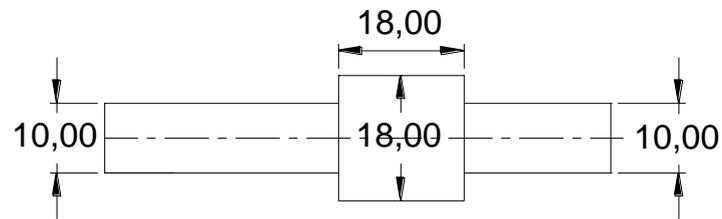


Figura 38. Dimensiones de la columna

Para corroborar el cálculo del esfuerzo producido en la columna se genera una simulación en software CAE.

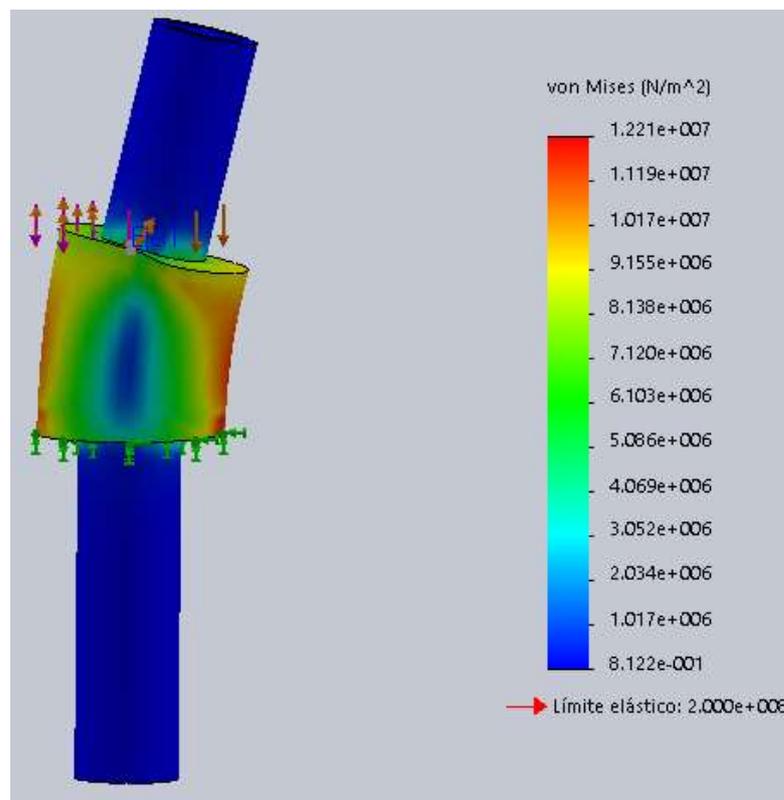


Figura 39. Estado de esfuerzos en la columna giratoria.

### 3.1.4. Diseño de engranes.

Para el diseño de los engranes es necesario conocer las características principales del sensor a utilizar para detectar el ángulo de movimiento de cada eslabón.

### 3.1.4.1. Selección del sensor.

Existen varios tipos de sensores utilizados para medir la posición angular de un dispositivo, para la implementación de este proyecto se consideran dos tipos de sensores, uno de tipo digital (encoder incremental) y otro de tipo analógico (potenciómetro).

#### ➤ **Encoder Incremental**

Generan un número de pulsos definido para una revolución del eje al cual están acoplados.

#### **Ventajas:**

- Fácil acondicionamiento de señal.
- Existe una variedad de tamaños.
- Diseño robusto.

#### **Desventajas:**

- Debe ser recalibrado antes de comenzar su operación

#### ➤ **Potenciómetro lineal**

La variación de su resistencia es aprovechada para generar un cambio de voltaje sobre un divisor de tensión. El ángulo de giro del potenciómetro es directamente proporcional a su resistencia.

#### **Ventajas:**

- Fácil acoplamiento mecánico.
- No necesita calibración previa a su operación.
- Limitación del ángulo de giro.
- Diseño robusto.
- Linealidad del 0.25%

#### **Desventajas:**

- Su señal puede presentar ruido.
- Vida útil limitada debido al desgaste por fricción.

Después de los puntos expuestos se elige utilizar potenciómetros lineales para medir la posición angular de las tres articulaciones, principalmente por la característica de memoria antes de iniciar su

operación, además de su variedad de valores de resistencia y ángulos de giro que estos poseen.

Los potenciómetros fabricados por la empresa Bourns fueron elegidos para la implementación del prototipo, debido a su gran variedad de características y modelos.

En la Tabla 5 se presentan ciertas características de los cuatro potenciómetros considerados para el desarrollo del dispositivo.

**Tabla 5**  
**Comparación de potenciómetros BOURNS**

<b>Modelo:</b>	3540S-1-202L	6538S-1-103	3540S-1-502L	3851A-162-103BL
<b>Rango de temperatura de trabajo:</b>	- 40 C to + 125 C	-	- 40 C to + 125 C	-
<b>Empaquetado:</b>	Tray	Bulk	Tray	Bulk
<b>Régimen de potencia:</b>	2 W	1 W	2 W	1 W
<b>Resistencia:</b>	10 kOhms	10 kOhms	5 kOhms	10 kOhms
<b>Serie:</b>	3540	6538	3540	3851
<b>Coefficiente de temperatura :</b>	50 PPM / C	-	50 PPM / C	-
<b>Tolerancia:</b>	5 %	10 %	5 %	20 %
<b>Número de vueltas:</b>	10	1	10	1
<b>Diámetro del eje:</b>	6.342 mm	-	6.342 mm	6.35 mm
<b>Longitud del eje:</b>	20.62 mm	12.7 mm	20.62 mm	12.7 mm
<b>Linealidad:</b>	0.25%	1%	0.25%	10%

Fuente: (Mouser Electronics Inc, 2016)

Debido a la combinación de características como el número de vueltas, resistencia y principalmente su característica de linealidad se eligió al modelo 340S-1-202L para la aplicación del proyecto. Los detalles del sensor se encuentran en el Anexo 2, y los parámetros de importancia para el diseño del engrane se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6**  
**Datos del sensor Burns 3540-1-202L**

<b>Característica</b>	<b>Magnitud</b>
Rango	2K $\pm$ 5% ohm
Resolución	0.021 ohm
Linealidad	$\pm$ 0.25%
Potencia	2W
<b>Características mecánicas</b>	
Vueltas	10
Diámetro vástago	6.342 mm
Torque (mínimo para que gire)	0.49 N.cm

Fuente: (Mouser Electronics Inc, 2016)

Para encontrar el tamaño de los engranes se inicia de la necesidad de hallar una relación de transmisión que pueda satisfacer la correspondencia de al girar una vuelta de la base del dispositivo, el sensor cumpla sus diez vueltas de recorrido, también consideramos que el tamaño de los engranes sean apropiados para que no excedan considerablemente en tamaño al ancho de los eslabones.

Luego de varias pruebas la relación de transmisión que proporciona el tamaño de engranes adecuados para la estructura consta de dos etapas de 1/3 de relación, lo que se traduce a que cuando el eslabón gira una vuelta completa el sensor habrá girado nueve. Los parámetros del piñón partiendo del diámetro del vástago del sensor se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7**  
**Parámetros del piñón**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Dientes	22
Módulo	0.5

### Acople del piñón al sensor.



Figura 40. Acoplamiento del piñón al sensor.

- **Cálculo de parámetros para el engrane.**

Módulo:  $M = 0.5$

Numero de dientes:  $Z = 3 * 22 = 66$  ; *debido a la relacion de transmición*

Con estos parámetros es posible obtener un modelo CAD del engrane mostrado en la Figura 41 que forma parte del tren de engranes de la etapa de transmisión de movimiento; además el engrane cumple la relación de transmisión antes mencionada.

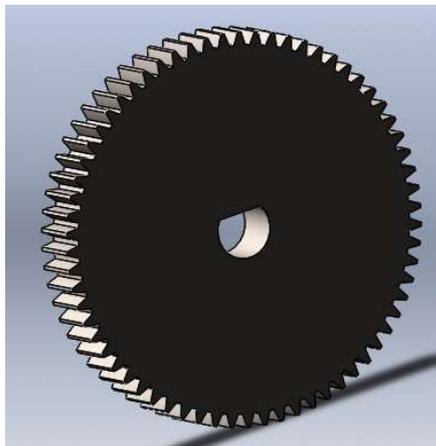


Figura 41. CAD del Engrane 2.

## Acople de engranes

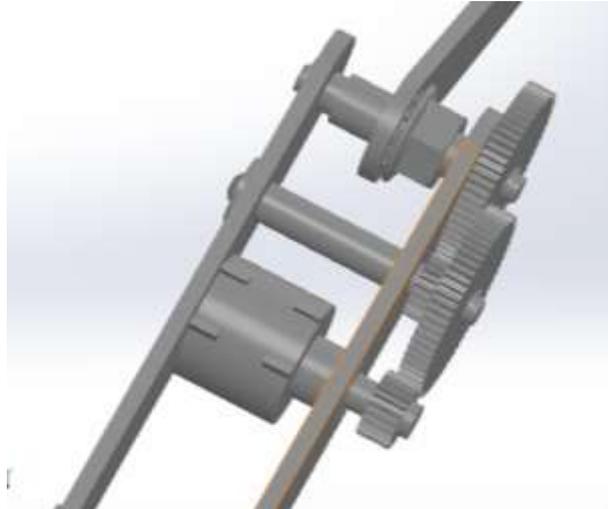


Figura 42. Acoplamiento de los engranes

El tren de engranes es el mismo en cada articulación para mantener la resolución de cada eslabón; con esto se estandariza su fabricación y se reduce costos.

### 3.1.5. Cálculo del esfuerzo flector en la raíz del diente del engrane.

Para realizar el cálculo del esfuerzo flector al que se somete el diente del engrane se emplea la ecuación AGMA en unidades del SI.

$$\sigma = W^t K_o K_v K_s \frac{1}{b m_t} \frac{K_H K_B}{Y_j} \quad (9)$$

Donde:

$W^t$ : Carga tangencial transmitida en Newton.

$K_o$ : Factor de sobrecarga.

$K_v$ : Factor dinámico.

$K_s$ : Factor de tamaño.

$b$ : Ancho de la cara.

$m_t$ : Módulo métrico transversal.

$K_H$ : Factor de distribución de la carga.

$K_B$ : Factor de espesor del aro.

$Y_j$ : Factor geométrico de resistencia a la flexión.

- **Carga tangencial transmitida.**

La fuerza tangencial máxima que puede soportar el diente del engrane guarda relación con la fuerza máxima para la cual se diseña el dispositivo háptico, esta fuerza de 100N genera un torque máximo en el engrane al aplicarse sobre el brazo del dispositivo que mide 147.09mm.



Figura 43. Torque máximo en el tren de engranes.

$$T_{máx} = 100 * 0.14709 = 14.709 \text{ Nm}$$

La fuerza que se produce en el extremo de los dientes se obtiene a partir de la siguiente formula:

$$T = F * d \quad (10)$$

Donde:

$T$ : Torque.

$F$ : Fuerza.

$d$ : Distancia.

La distancia es el radio del diámetro exterior del engrane; este diámetro calculamos con la siguiente fórmula:

$$D_e = (Z + 2) * M \quad (11)$$

Donde:

$D_e$ : Diámetro exterior.

$Z$ : Número de dientes.

$M$ : Módulo.

Sustituyendo los valores obtenemos:

$$D_e = (66 + 2) * 0.5 = 34mm$$

Por lo tanto la fuerza en el extremo del engrane; que a la vez se convierte en la carga tangencial que se transmite es:

$$W^t = F = \frac{T}{D_e/2} = \frac{14.709}{0.034} = 432.62 N$$

- **Factor de sobrecarga.**

Este factor considera cargas adicionales a  $W^t$  que se presentan en los ciclos de movimiento del engrane; el valor de  $K_o$  especificado por AGMA se muestra en la figura 44.

Tabla de factores de sobrecarga, $K_o$			
Máquina impulsada			
Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.75
Impacto ligero	1.25	1.50	2.00
Impacto medio	1.50	1.75	2.25

Figura 44. Factor de sobrecarga AGMA.  
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

En nuestro caso el dispositivo háptico está sometido a un impacto moderado ya que la fuente de potencia es la manipulación manual por parte del operario; la cual no es uniforme pero es ligera por tal razón:

$$K_o = 1.5$$

- **Factor dinámico.**

Este factor se emplea para considerar la falta de precisión en el proceso de fabricación del engrane, lo cual produce errores en el acoplamiento y en la transmisión de movimiento; la ecuación que otorga AGMA para perfiles de engranes cortados o fresados es:

$$K_v = \frac{6.1 + V}{6.1} \quad (12)$$

Donde:

$V$ : Velocidad de línea de paso en m/s.

Para encontrar  $K_v$  es necesario calcular  $V$  mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi * d * n}{60} [m/s] \quad (13)$$

Donde:

$d$ : Diámetro de paso en metros.

$n$ : Revoluciones por minuto del engrane.

El diámetro de paso se calcula:

$$d = \frac{Z}{\pi * M} \quad (14)$$

Luego de realizar varios ensayos se establece una velocidad de 12 rpm para el giro de los eslabones, entonces procedemos a reemplazar los valores en la Ecuación 13 para obtener la velocidad de línea de paso.

$$V = \frac{\pi * \frac{Z}{\pi * M} * n}{60}$$

$$V = \frac{0.5 * 12}{60} = 26.4 \text{ m/s}$$

Este valor reemplazamos en la Ecuación 12 para encontrar  $K_v$ .

$$K_v = \frac{6.1 + 26.4}{6.1} = 5.33$$

- **Factor de tamaño.**

Este factor representa los problemas existentes en las propiedades del material del que está hecho el engrane por falta de uniformidad en su composición; AGMA sugiere que si no existe efectos perjudiciales se puede emplear un valor unitario para  $K_s$ .

- **Ancho de la cara.**

El ancho de cara para el diseño del engrane es de 0.004m.

- **Módulo métrico transversal.**

El modulo métrico del engrane es de 0.5.

- **Factor de distribución de la carga.**

Este factor muestra características respecto a la forma de acople de los engranes que reflejan falta de uniformidad en la aplicación de la carga en

los dientes del engrane; para nuestro caso asumimos que la carga se aplica uniformemente por ello  $K_H = 1$ .

- **Factor de espesor del aro.**

Este factor proporciona un ajuste en el análisis debido a que puede presentarse fallas en la raíz del diente del engrane si el tamaño del aro no es el adecuado, la relación sugerida por AGMA se muestra en la Figura 45.

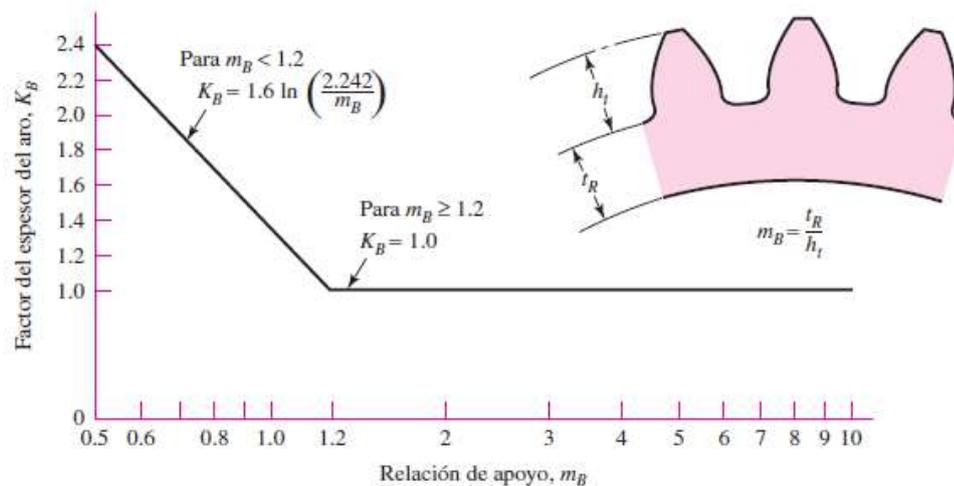


Figura 45. Relación de apoyo sugerida por AGMA.  
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

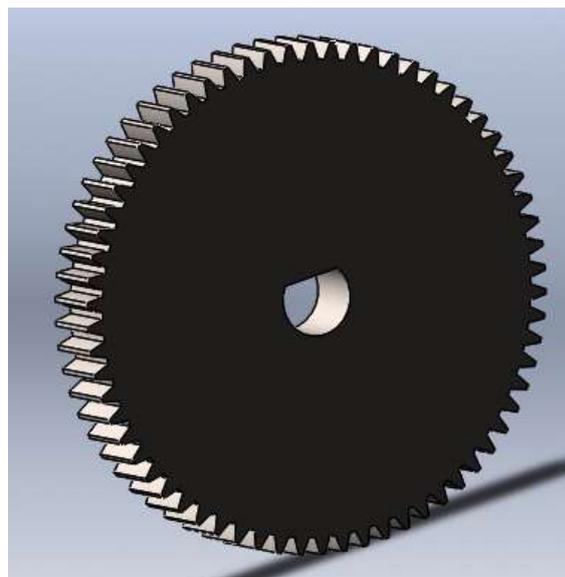


Figura 46. Forma del engrane para el factor de espesor del aro.

Visualmente el valor de  $m_B$  en la Figura 46 tiende a ser mayor a 1.2 por lo cual  $K_B = 1$ .

- **Factor geométrico de resistencia a la flexión.**

AGMA sugiere una gráfica para facilitar la elección del valor partiendo del número de dientes que posee el engrane, esto se muestra en la Figura 47.

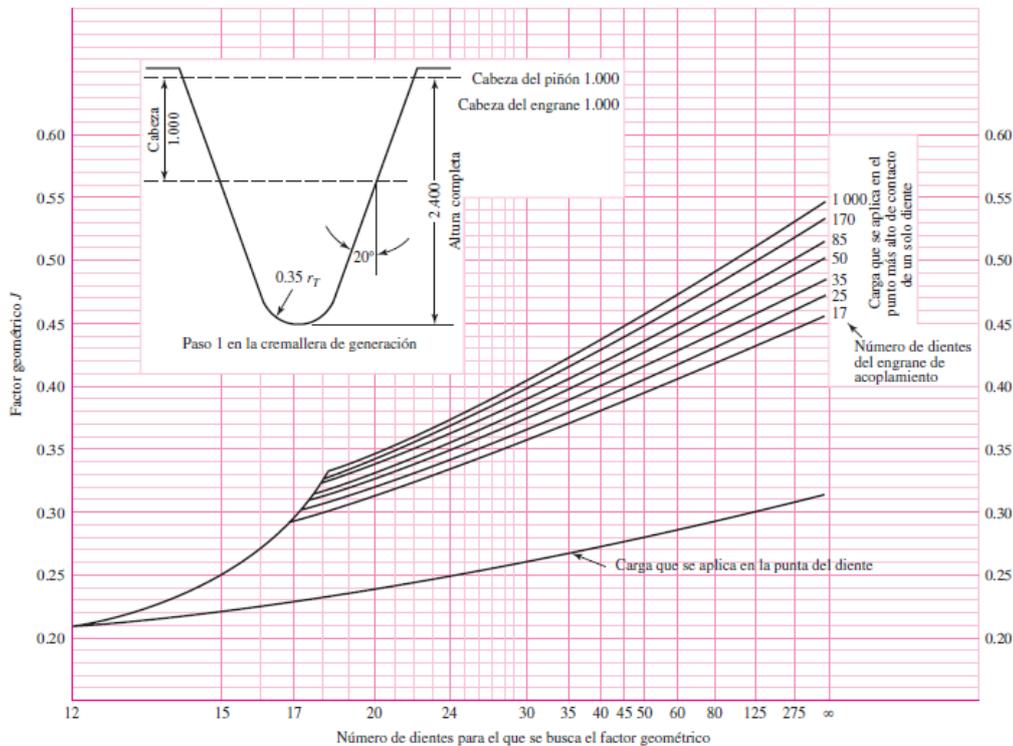


Figura 47. Selección del factor de geométrico de resistencia a la flexión.  
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

De la Figura 47 se extrae el valor de  $Y_f = 0.265$  al reemplazar los 36 dientes que posee el engrane; se emplea la curva inferior debido a que el número de dientes del engrane de acoplamiento es menor a 17.

Una vez obtenido los valores de cada elemento que conforma la Ecuación 9 se procede a reemplazar:

$$\sigma = (432.62) * (1.5) * (5.33) * (1) * \frac{1}{(0.004) * (0.5)} \frac{(1) * (1)}{0.265}$$

$$\sigma = 6.53 \text{ MPa}$$

Este valor de esfuerzo debe ser menor al esfuerzo de fluencia del material con el cual se va a fabricar a los engranes; tanto el acero A36 como el duralón cumplen con esta condición pero en cuanto a coste de fabricación los engranes son realizados en acero A36.

### 3.1.6. Análisis estático de partes de la estructura.

Para estos elementos mecánicos se emplea aluminio PRODAX (AW 7075), debido a que no presenta porosidades, posee alto nivel de maquinabilidad y alta resistencia.

**Tabla 8**  
**Propiedades mecánicas del Aluminio PRODAX**

Característica	
Limite elástico.	390-490 MPa.
Resistencia a la tracción.	480-540 MPa.
Alargamiento	2-6 %
Dureza HBW (2,5/62,5)	130-160

*Fuente: (Aceros Boehler Uddeholm S.A., 2016)*

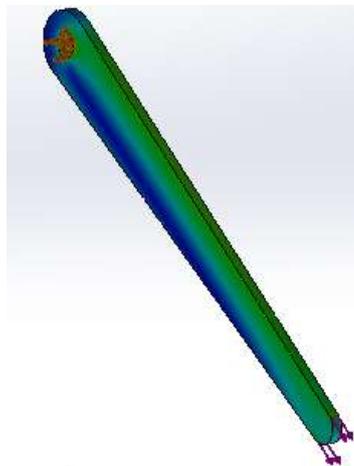
**Tabla 9**  
**Propiedades físicas del Aluminio PRODAX.**

Característica	
Densidad (g/m <sup>3</sup> ).	2,8
Elasticidad	71 GPa.

*Fuente: (Aceros Boehler Uddeholm S.A., 2016)*

#### 3.1.6.1. Análisis estático eslabón 3

El eslabón se encuentra sometido a una fuerza de tracción de 100N, mediante una simulación se obtendrá el factor de seguridad del elemento al trabajar bajo esta carga.



*Figura 48. Eslabón 3 sometido a una fuerza de tracción de 100N.*

### Esfuerzo que se presenta en el eslabón 3.

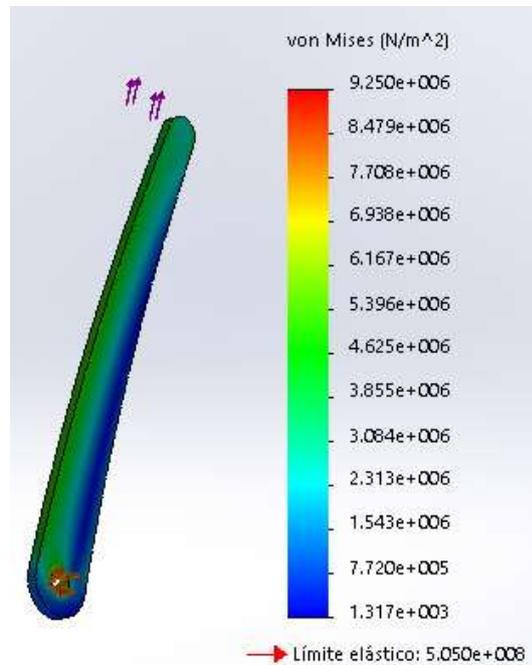


Figura 49. Estado de esfuerzo del eslabón 3 para 100N

El esfuerzo que se produce en el eslabón 3 (Figura 49) al aplicar la fuerza de 100N en tracción, está por debajo del límite elástico del material del cual está fabricado, lo que garantiza que la pieza soporte esta fuerza, adicionalmente se muestra en la Figura 50 el factor de seguridad que posee el eslabón.

### Factor de seguridad.

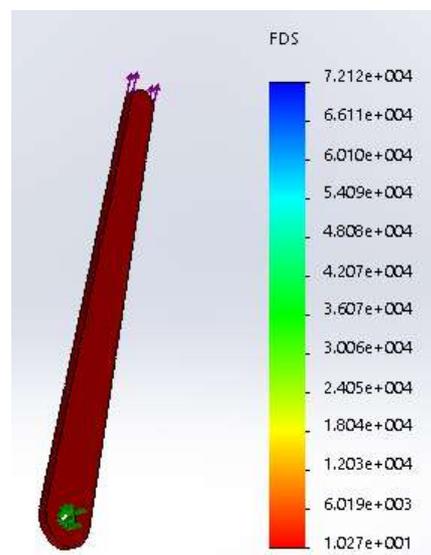


Figura 50. Factor de seguridad del eslabón 3 al aplicar la carga.

### 3.1.6.2. Análisis estático eslabón 2.

El eslabón se encuentra sometido a una fuerza de tracción de 100N; este eslabón está conformado por dos placas de aluminio PRODAX y cada una de estas placas se somete a la fuerza resultante de los apoyos mostrados anteriormente en la Figura 22, que tiene un valor de 50N.

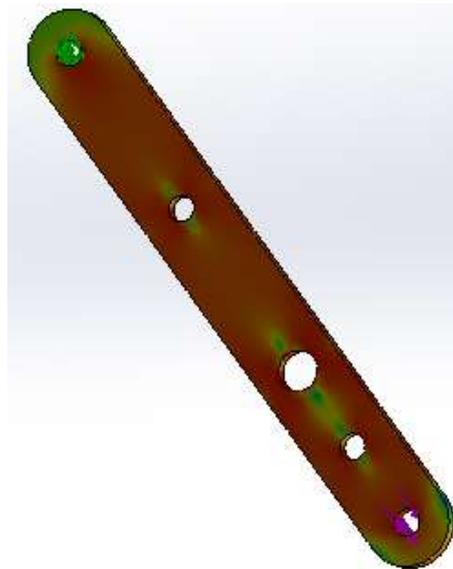


Figura 51. Eslabón 2 sometido a una fuerza de 50N

### Esfuerzo que se presenta en el eslabón 2.

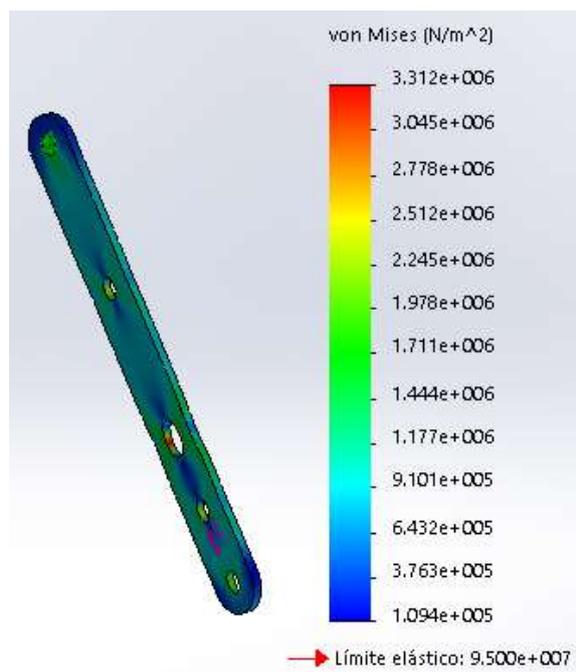


Figura 52. Estado de esfuerzos del eslabón 2.

Como se puede observar en la figura 51, la pieza resiste la fuerza de 50N debido a que el máximo esfuerzo es menor al esfuerzo de fluencia del material, adicionalmente se obtiene el factor de seguridad que posee la pieza lo que garantiza la resistencia del eslabón frente a la fuerza de tracción de 100N esto se muestra en la figura 53.

#### Factor de seguridad.

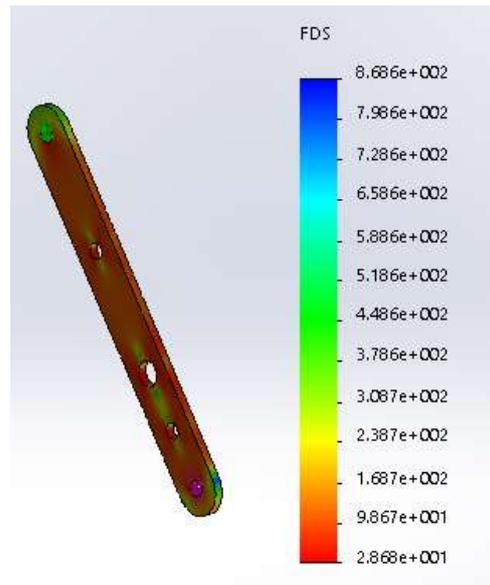


Figura 53. Factor de seguridad del eslabón 2 al aplicar la carga.

#### 3.1.6.3. Análisis estático eslabón 1.

Este eslabón está conformado por dos placas sometidas a una fuerza de tracción de 100N; la carga aplicada a cada placa es la fuerza que resulta como reacción en el análisis del eje 2 mostrado anteriormente en la Figura 29 que tiene un valor de 50N.

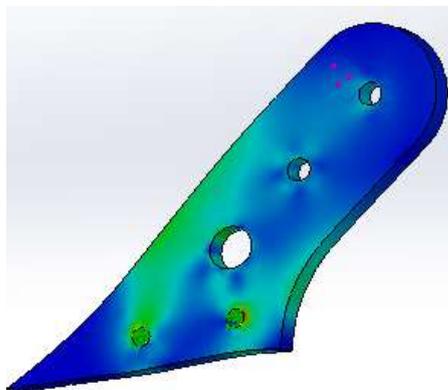


Figura 54. Eslabón 1 sometido a una fuerza de tracción de 50N.

### Esfuerzo que se presenta en el eslabón 1.

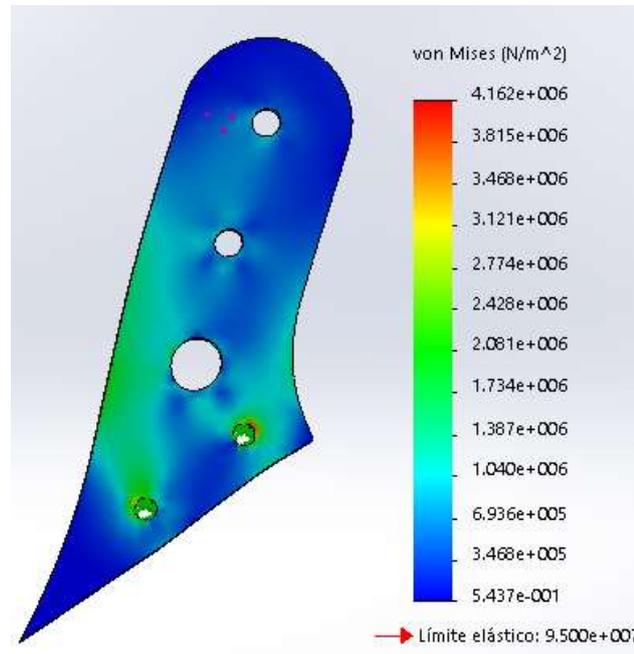


Figura 55. Estado de esfuerzos del eslabón 1.

El esfuerzo máximo que se puede observar en la figura 54 garantiza que la pieza no falle, debido a que este valor es menor al esfuerzo máximo de fluencia, también se puede constatar esta afirmación con el factor de seguridad mostrado en la figura 56.

### Factor de seguridad.

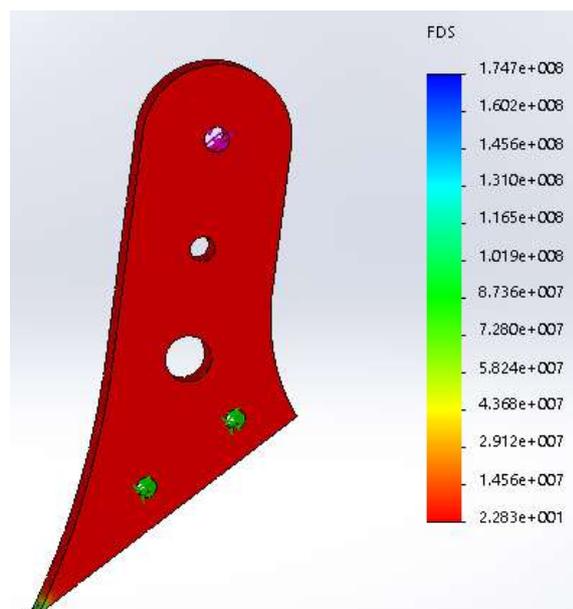


Figura 56. Factor de seguridad del eslabón 1 al aplicar la carga.

### 3.1.7. Implementación del diseño mecánico.

A partir del modelo CAD de la estructura mecánica se procede a la fabricación de las piezas que conforman el dispositivo háptico; el modelo completo dibujado y ensamblado de la estructura se muestra en la Figura 57.



*Figura 57. Diseño final del dispositivo háptico.*

La manufactura de las piezas que conforman la cadena cinemática se realizó mediante la utilización de procesos como torneado, fresado, corte por hilo y otros procesos. Después de haber realizado el maquinado de los componentes del dispositivo háptico se obtienen las piezas que se muestran en la figura 58 y figura 59.

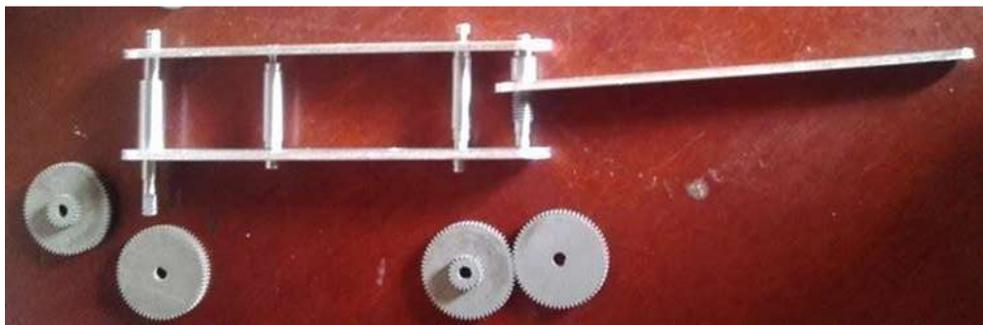


*Figura 58. Componentes de la cadena cinemática*



*Figura 59. Conjunto de engranes de la cadena cinemática*

Previo al proceso de ensamblaje es necesario realizar una etapa de pulido para quitar las marcas generadas por el corte, las mismas que se presentan en las superficies de los elementos. También es necesario realizar los agujeros a la medida real mediante un proceso de escariado para lograr un ajuste giratorio H7/g6 sin juego apreciable, esto para los ejes giratorios del dispositivo háptico. Para elementos como engranes se otorga un ajuste forzado ligero H7/j6 y para su montaje se hace necesario el uso de un pequeño mazo.



*Figura 60. Ensamblaje de los eslabones 2 y 3*

Los rodamientos axiales son los elementos que aportan al movimiento sin obstrucción de la base y soportan el peso del dispositivo háptico otorgándole estabilidad y evitando que las partes sufran desgaste por el giro de las piezas; en la Figura 61 se muestra el acople del rodamiento a la base del dispositivo háptico.



*Figura 61. Acoplamiento de los rodamientos axiales a la base*

Dentro de la etapa de implementación del dispositivo se hace necesario el uso de ciertos elementos, tales como tornillos del tipo Allen M4x16 y M3x10 inoxidables, especialmente para acoplar los eslabones a la base giratoria.



*Figura 62. Ensamble de la base y el eslabón 1 mediante tornillos.*

### **3.1.7.1. Procedimiento para ensamble de piezas.**

Para un correcto ensamblaje de las partes del dispositivo háptico fue necesario mantener un orden para que las piezas puedan encajar en su sitio sin forzarlas; el proceso se indica a continuación:

- Paso 1.

Empezamos con el acople del eslabón 3 al eje 1, mediante una tuerca de seguridad M8x1.25; y realizamos el ensamblaje de las piezas que se muestran en la figura 63.

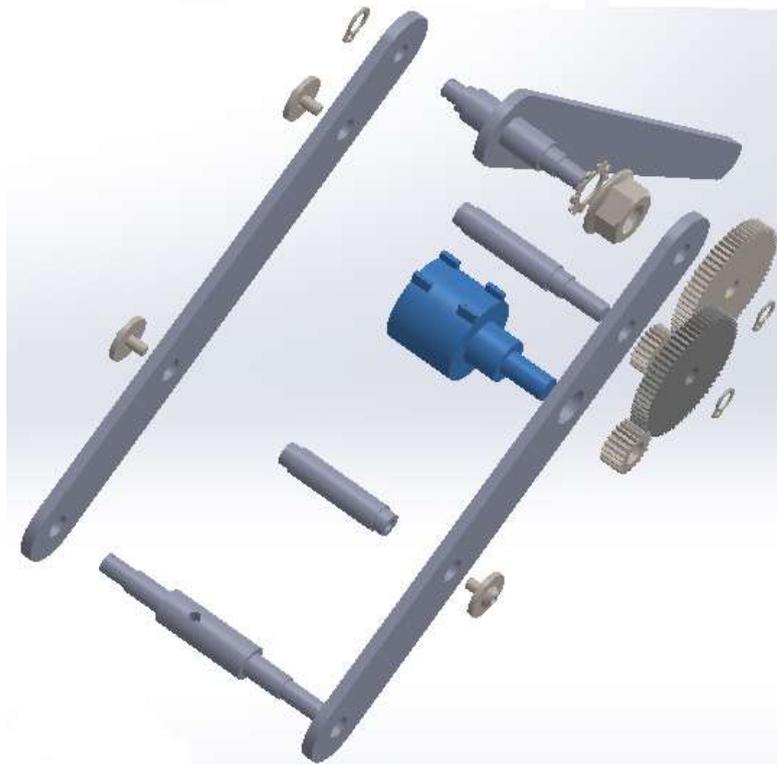


Figura 63. Vista en explosión de componentes de los eslabones 1 y 2.

Formamos el siguiente conjunto.

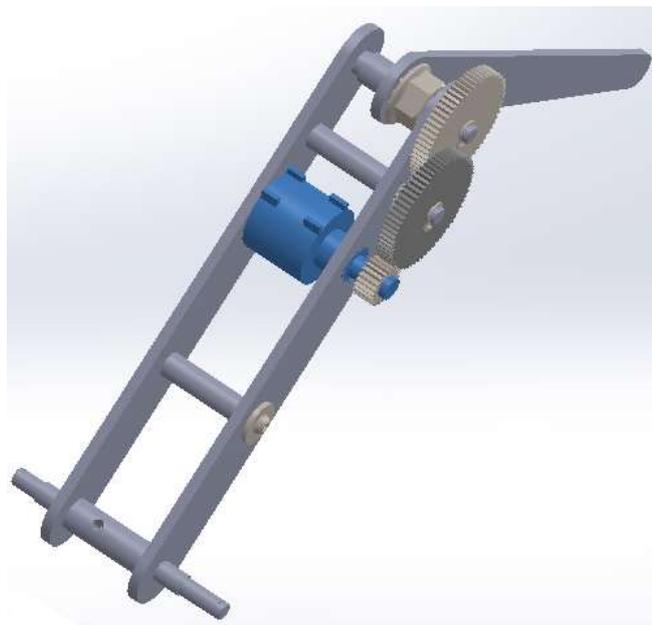
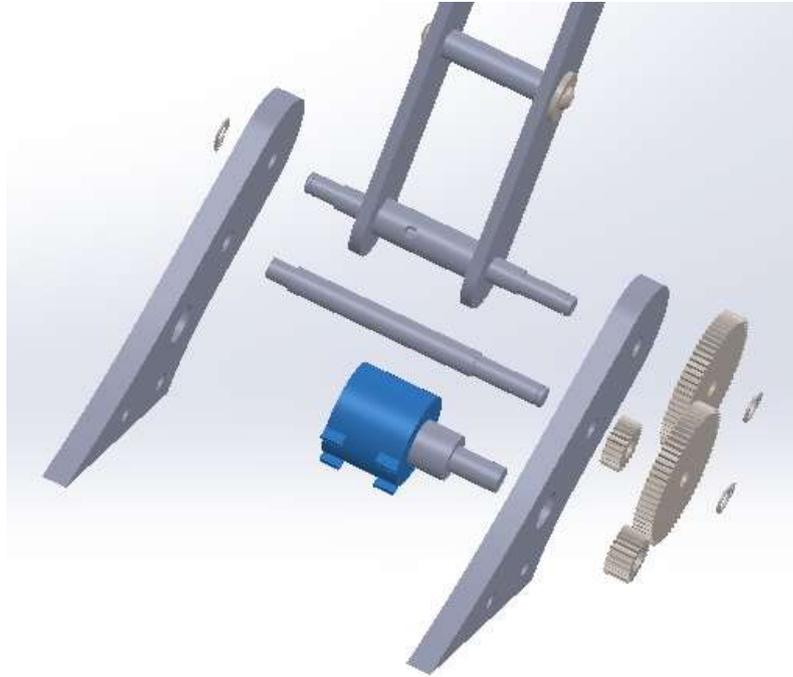


Figura 64. Ensamble entre los eslabones 2 y 3

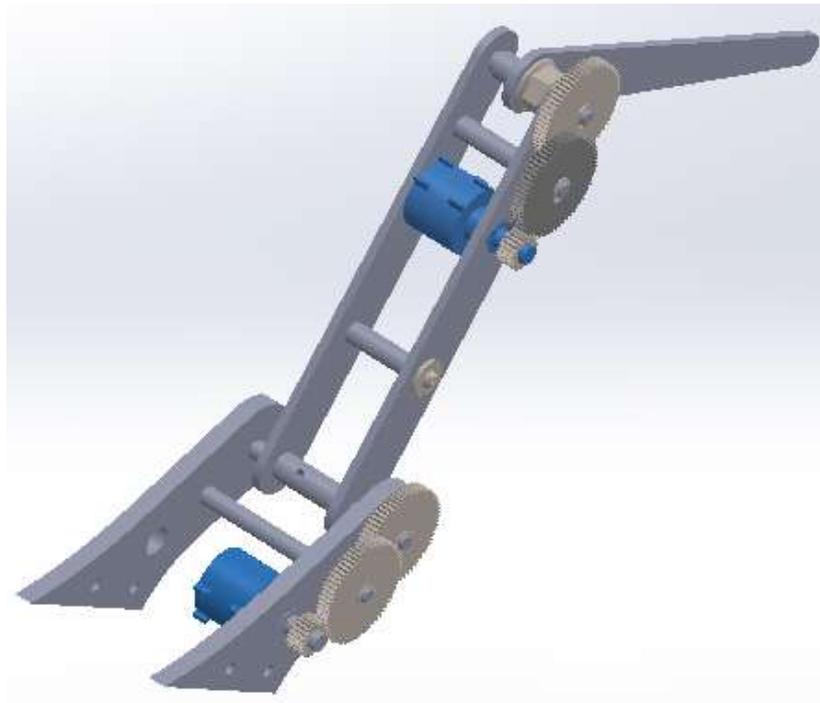
- Paso 2

Realizamos el siguiente ensamblaje con las partes que se muestran en la Figura 65.



*Figura 65. Vista en explosión de componentes del eslabón 1.*

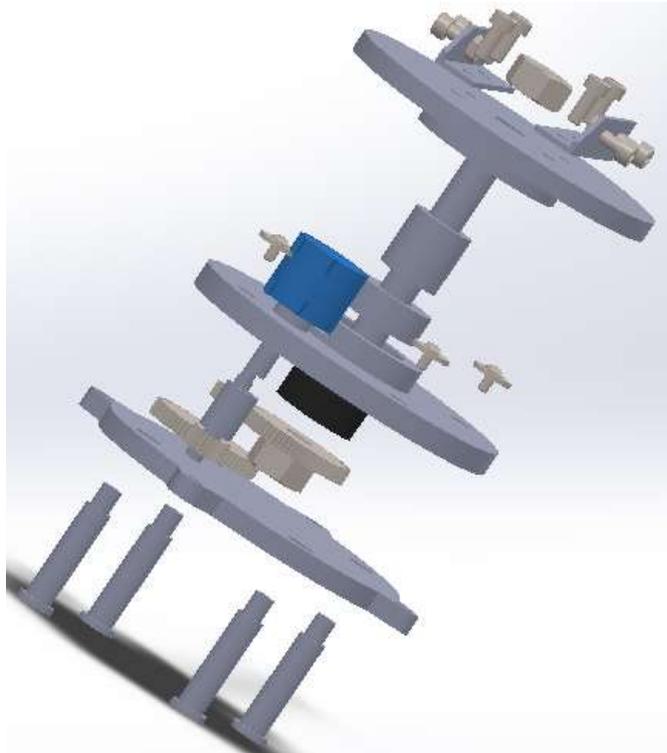
Formamos el siguiente conjunto.



*Figura 66. Conjunto de eslabones 1, 2 y 3 ensamblados.*

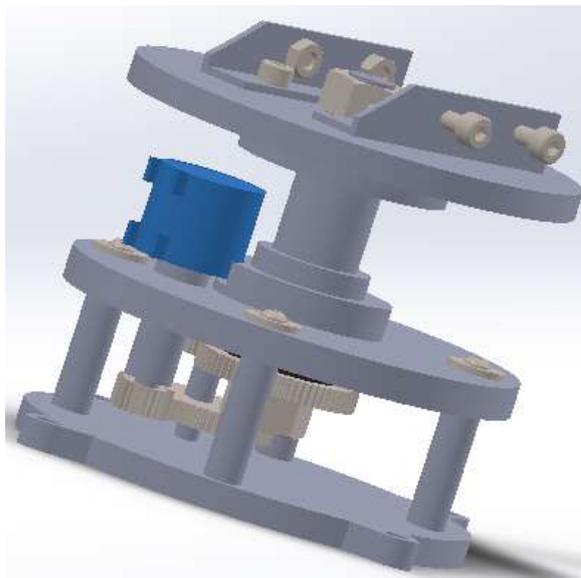
- Paso 3

Realizamos el siguiente ensamblaje de las partes que conforman la base del dispositivo háptico que se muestran en la Figura 67.



*Figura 67. Vista en explosión de componentes que conforman la base.*

Formamos el siguiente conjunto, en los ángulos de aluminio se acopla mediante tornillos Allen M4x16 el conjunto formado en el paso 2.



*Figura 68. Base del dispositivo háptico ensamblada.*

- Paso 4

Acoplamos los conjuntos del paso 2 y 3 para obtener el dispositivo háptico completo; en las siguientes imágenes se muestra el dispositivo ensamblado con las conexiones de los sensores.



*Figura 69. Cadena cinemática del dispositivo háptico ensamblada.*

### 3.1.8. Diseño del sistema eléctrico y electrónico

El diseño del sistema eléctrico se basa de acuerdo al sensor que se emplea en el dispositivo háptico, en nuestro caso el sensor Burns 3540S-1-202L varía su resistencia conforme gira el vástago, en la Figura 70 se muestra el diagrama de bloques del circuito eléctrico y electrónico a implementarse.

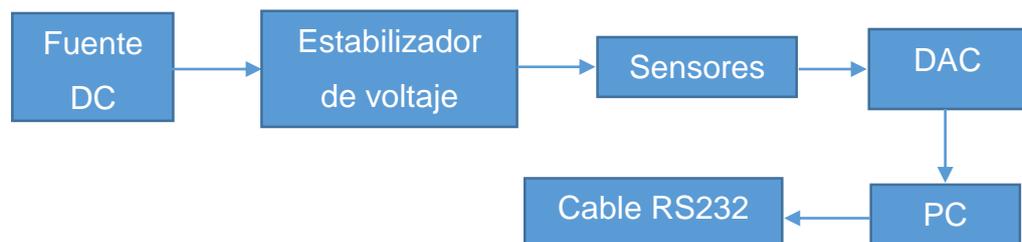


Figura 70. Diagrama de bloques del circuito a implementarse.

#### 3.1.8.1. Cálculo de corriente en el circuito.

La corriente que debe suministrar la fuente de voltaje DC es tres veces la corriente que circula por un sensor debido a que todos son iguales y están conectados en paralelo, para ello calculamos la corriente individual sabiendo que la resistencia del sensor total es 2K ohm.

$$V = I * R \quad (15)$$

Donde:

$V$ : Voltaje.

$I$ : Corriente.

$R$ : Resistencia.

Reemplazamos los siguientes valores;  $V = 5V$  y  $R = 2K \text{ ohm}$

$$I = \frac{5}{2000} = 2.5 \text{ mA}$$

La corriente total

$$I_T = 7.5 \text{ mA}$$

Por lo tanto se debe seleccionar una fuente que tenga la capacidad de suministrar la corriente calculada. La fuente AC/DC elegida cuenta con un

suministro de corriente de 500 mA y un voltaje máximo de 7 V.; la misma que se puede conectar a la red eléctrica en un rango de 100-240V AC ya sea en 60 ó 50Hz, lo que beneficia debido a las características de la red eléctrica con la cual contamos en el país.

### 3.1.8.2. Diseño del estabilizador de voltaje.

El estabilizador de tensión permite mantener un nivel de voltaje constante en el circuito, para que las señales que emiten los sensores no se vean afectados por picos de voltaje generados por sobrecargas en la tensión de la fuente; en la Figura 71 se muestra el circuito típico de un estabilizador de voltaje.

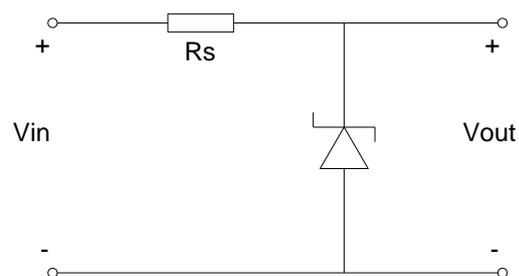


Figura 71. Circuito estabilizador de voltaje con diodo zener.

Conociendo que el voltaje de entrada es 7V y se requiere un voltaje de salida de 5V se calcula el valor de  $R_s$ , adicionalmente la corriente máxima es 500mA.

$$R_s = \frac{(V_{in} - V_{out})}{(1.1 * I_{m\acute{a}x})} \quad (16)$$

Donde:

$R_s$ : Resistencia.

$V_{in}$ : Voltaje de la fuente.

$V_{out}$ : Voltaje regulado.

$I_{m\acute{a}x}$ : Corriente máxima que puede circular por el circuito.

Reemplazando los datos obtenemos el valor de  $R_s$ .

$$R_s = 3.63 \text{ ohm}$$

Comercialmente este valor no existe por lo tanto la resistencia a emplear es de 3.9 ohm, además el diodo zener a emplear es el 1N4733A que otorga 5.1V. El circuito eléctrico a implementar se muestra en la Figura 72.

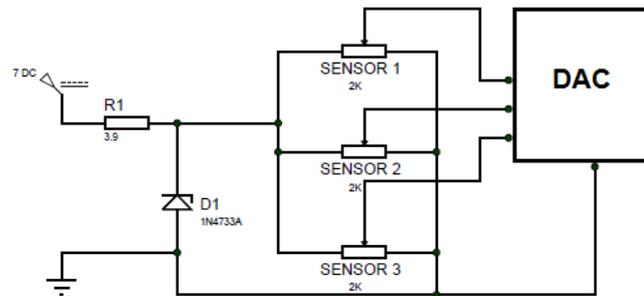


Figura 72. Diagrama del circuito eléctrico.

### 3.1.8.3. Selección de la tarjeta DAC.

Para poder seleccionar la tarjeta que permita convertir las señales analógicas a señales digitales planteamos los siguientes criterios de selección que permiten confrontar alternativas para seleccionar la mejor opción.

- **Criterios.**
  - Comercial localmente (CL).
  - Precio económico (PE).
  - Resolución (R).
  - Fácil Uso (FU).

Para continuar con la selección de la tarjeta DAC exponemos las opciones de modelos que se encontraron.

#### Opción 1.

- **OMB-DAQ-54.**



Figura 73. Tarjeta DAC OMB-DAQ-54  
Fuente: (Omega engineering, 2016)

En la Tabla 10 se muestra las características de la tarjeta OMB relacionadas con los criterios expuesto anteriormente.

**Tabla** **10**  
**Características DAC OMB-DAQ-54**

Característica	
País	Brasil
Precio	\$820.
Resolución	22 bits
Tipo de conector	USB

*Fuente: (Omega engineering, 2015)*

### Opción 2.

- **MC USB 230 SERIES**



*Figura 74. Tarjeta DAC MC USB 230 SERIES*  
*Fuente: ( Measurement Computing Corporation, 2014)*

En la Tabla 11 se muestra las características de la tarjeta MC USB 230 relacionadas con los criterios de selección.

**Tabla 11**  
**Características DAC MC USB 230 SERIES**

Característica	
País	EEUU
Precio	\$249.
Resolución	16 bits
Tipo de conector	USB

*Fuente: ( Measurement Computing Corporation, 2014)*

### Opción 3.

- **NI USB 6008.**



Figura 75. Tarjeta NI USB 6008.  
Fuente: (National Instruments, 2015)

En la Tabla 12 se muestra las características de la tarjeta NI USB 6008 relacionadas con los criterios de selección expuestos anteriormente.

**Tabla 12**  
**Características NI USB 6008**

Característica	
País	Ecuador
Precio	\$275.
Resolución	12 bits
Tipo de conector	USB

Fuente: (National Instruments, 2015)

- **Ponderaciones.**

Para poder determinar cuál de las tres opciones de tarjetas DAQ elegir, realizamos la siguiente ponderación mostrada en la Tabla 13, que permite valorar cada criterio según el grado de satisfacción de la necesidad.

**Tabla 13**  
**Ponderaciones**

Excelente	Bueno	Malo
5	2.5	0

Las premisas propuestas para los criterios son las siguientes:

- Tendrá mayor valoración la tarjeta que se pueda conseguir en el país.
- En cuanto al precio; lo que se busca es un valor accesible y económico.
- Al ser un equipo didáctico lo que se plantea es tener una resolución de 12 bits.
- Para mayor facilidad es indispensable que la tarjeta posea conector USB, para evitar el uso de otros adaptadores.

Las ponderaciones a los criterios para las distintas opciones se detallan en la Tabla 14.

**Tabla 14**  
**Ponderaciones a criterios de selección**

	CL	PE	R	FU	TOTAL
Opción 1	0	0	0	5	5
Opción 2	5	5	0	5	15
Opción 3	5	2.5	5	5	17.5

De acuerdo a la suma de ponderaciones la tarjeta a elegir es la DAC NI USB 6008.

#### 3.1.8.4. Tarjeta DAC NI USB 6008.

La tarjeta fabricada por National Instruments es funcional y a la vez poderosa para aplicaciones sofisticadas, las características principales del dispositivo se muestran a continuación en la Tabla 15.

**Tabla 15**  
**Características NI USB 6008**

Canales de un terminal	<b>8</b>
Resolución	12 bits
Rango de voltaje (máximo)	-10 a 10 V
Rango de voltaje (mínimo)	-1 a 1 V
Memoria interna	512 B

Fuente: (National Instruments, 2015)

Las partes que componen este dispositivo se muestran en la Figura 76.

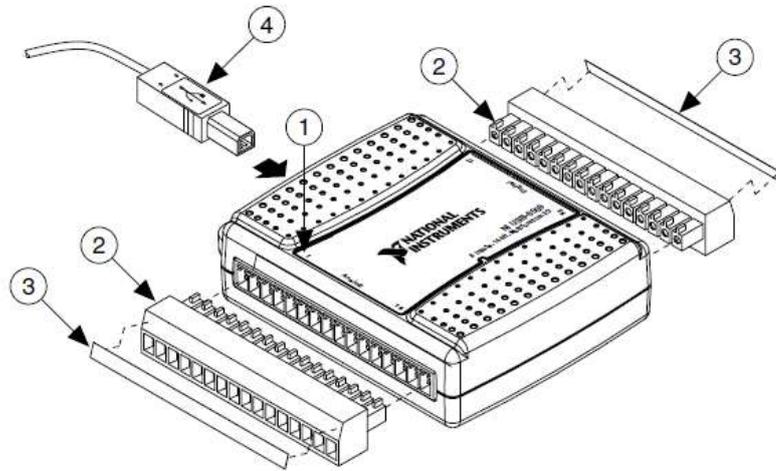


Figura 76. Despiece de la tarjeta DAC.  
Fuente: (National Instruments, 2015)

- 1: Etiqueta con guía de orientación de Pin.
- 2: Terminal (Plug conector).
- 3: Etiqueta de señalización.
- 4: Cable USB.

### 3.1.8.5. Cálculo de la resolución del dispositivo háptico.

La resolución que se calcula a continuación está relacionada al mínimo movimiento en grados de los eslabones que el circuito de la Figura 70 puede interpretar como datos de voltaje para poder ser procesados; para ello partimos de la resolución que posee la tarjeta DAC y calculamos el mínimo voltaje que realiza un cambio en el bit menos significativo de la salida de la DAC.

$$V_{min} = \frac{5}{2^{12}} ; \text{debido a los 12 bits de la DAC}$$

$$V_{min} = \frac{5}{4096} = 1.22 \text{ mV}$$

El análisis lo efectuamos para un solo sensor por lo tanto la corriente que circula es 2.5mA con este valor calculamos la resistencia que produce un voltaje de 1.22mV

$$V = I * R$$

$$R = \frac{1.22mV}{2.5 mA} = 0.488 \text{ Ohm}$$

Ahora mediante una regla de tres simple encontramos el giro en grados del vástago del sensor para lograr una variación de resistencia de 0.488 ohm.

El giro total del sensor en grados es  $10 * 360$  debido a que es de 10 vueltas; y posee una resistencia de 2000 ohm, estos datos se muestran en la tabla 7; la regla de tres simple se forma de la siguiente manera.

2000	3600
0.488	X

$$x = \frac{3600 * 0.488}{2000} = 0.8784 \text{ grados}$$

Mediante la relación de transmisión de movimiento de los engranes encontramos la resolución de los eslabones sabiendo que hay dos etapas de  $1/3$  de relación cada una lo que nos da como resultado:

$$Resolucion = 0.8784 * \frac{1}{3} * \frac{1}{3} = 0.098 \approx 0.1 \text{ grados}$$

### 3.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE.

Para detallar las partes que integran al software para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos se muestra el siguiente diagrama de flujo.

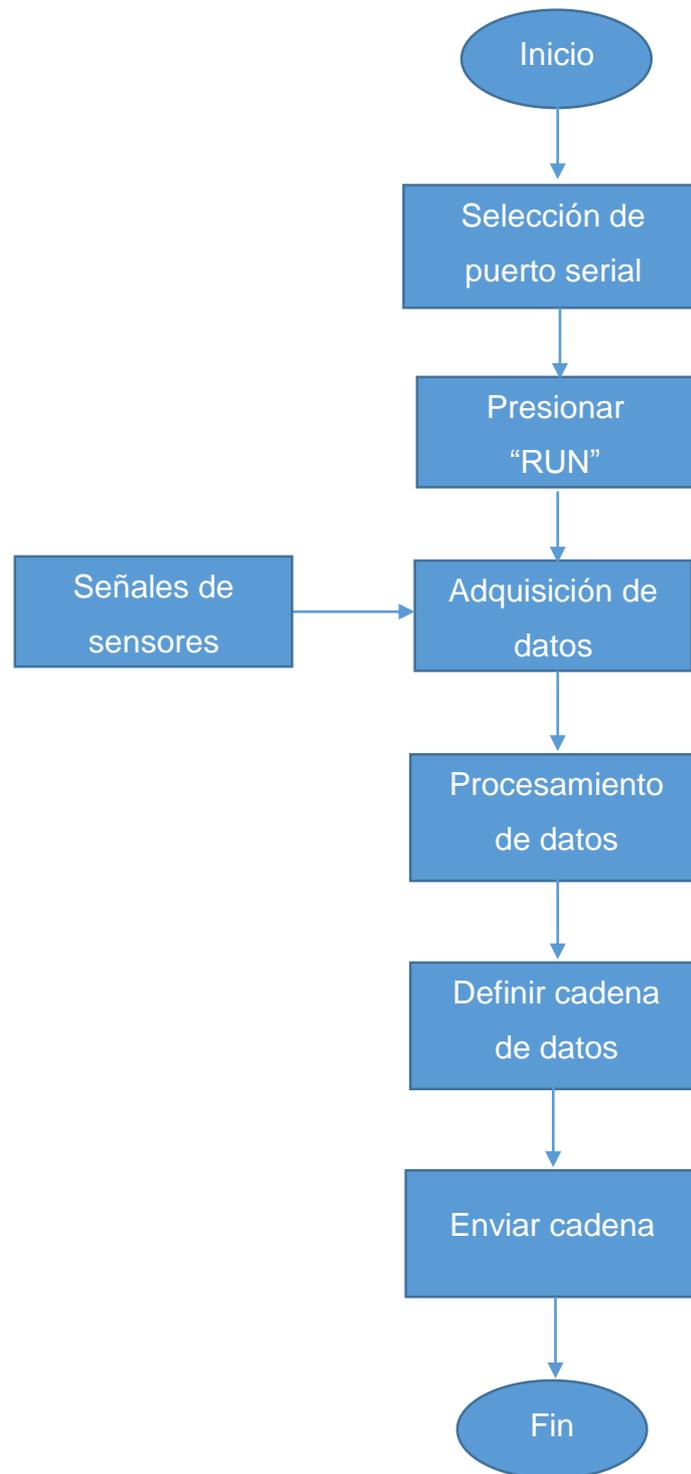


Figura 77. Diagrama de flujo de la implementación del software.

### 3.2.1. Selección de puerto serial

Este paso es realizado por el usuario, es necesario debido a que el programa presentará un error si el puerto donde se encuentra conectado el cable RS232 no se configura en el programa; ya que este es el medio por el cual se realiza la comunicación serial con el robot industrial.

La pestaña a llenar se muestra en la Figura 78; se debe dar clic en la pestaña y elegir COM5 por ejemplo, esto debido a que el computador asigna un puerto libre en el instante que se realiza la conexión del cable.

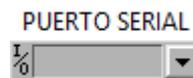


Figura 78. Bloque de selección de puerto serial en el programa.

La configuración de los parámetros de comunicación debe ser realizada de la misma forma tanto en el puerto de la computadora como en el diagrama de bloques del software.

La configuración de los parámetros de comunicación serial se realiza según se muestra en la Figura 79.

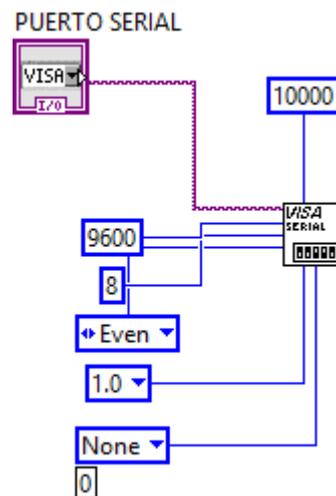


Figura 79. Configuración del puerto serial en el software.

Estos parámetros no son mostrados en el HMI por esta razón el puerto de comunicación del computador se debe configurar con los mismos parámetros; esto se debe realizar en el administrador de dispositivos de Windows tal como muestra la Figura 80.

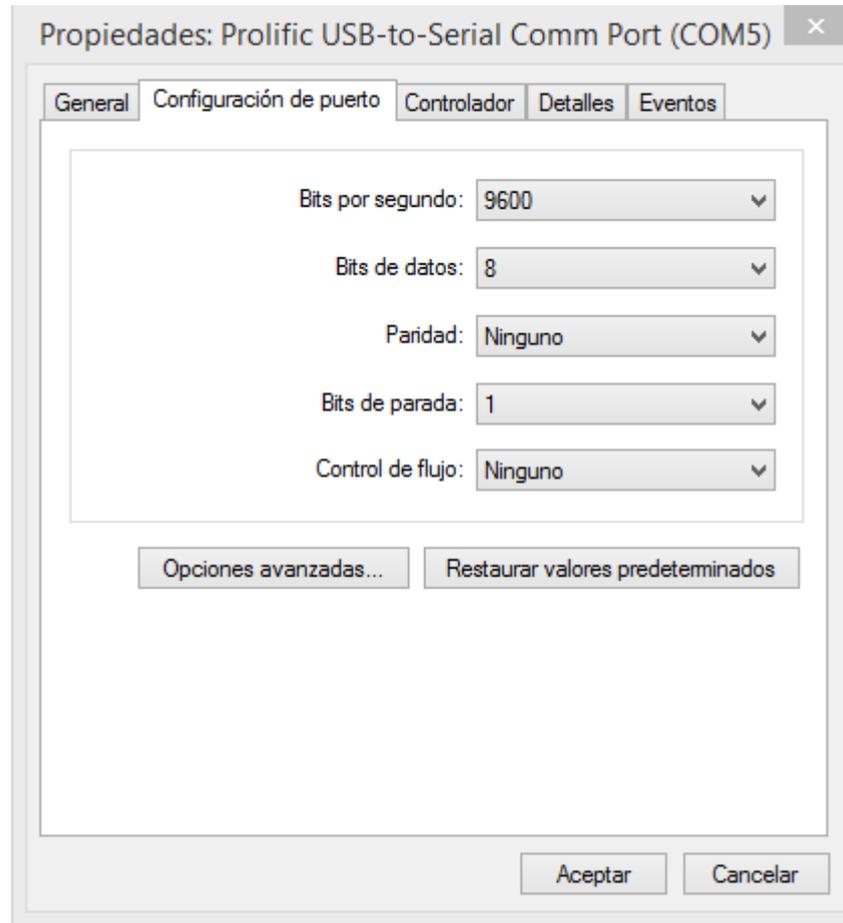


Figura 80. Configuración del puerto serial en el computador.

### 3.2.2. Adquisición de datos.

Dentro del diagrama de programación es necesario configurar previamente la tarjeta DAC mediante el DAQ Assistant que se muestra en la Figura 81.

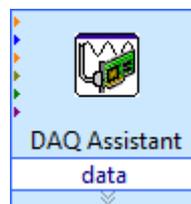


Figura 81. Bloque de programación para configurar la tarjeta DAC.

Dando doble clic sobre el icono se abre un cuadro de diálogo donde se configura los parámetros como se muestra en la Figura 82:

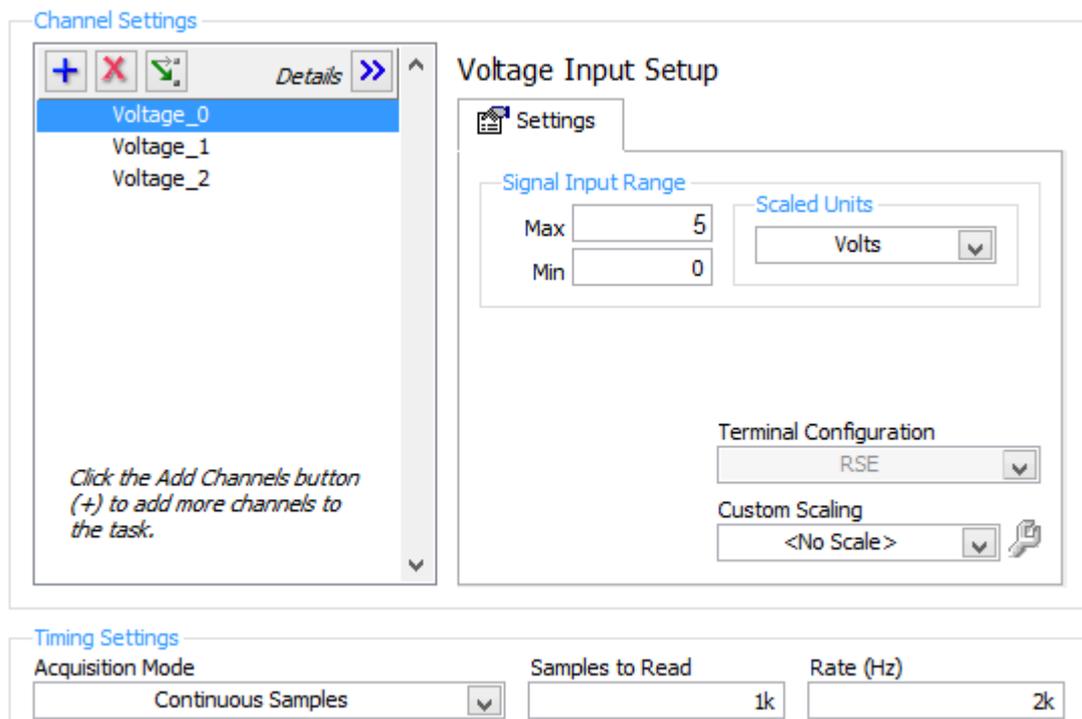


Figura 82. Parámetros de configuración de la tarjeta DAC.

La conexión en el diagrama de bloques de la programación se muestra en la Figura 83.

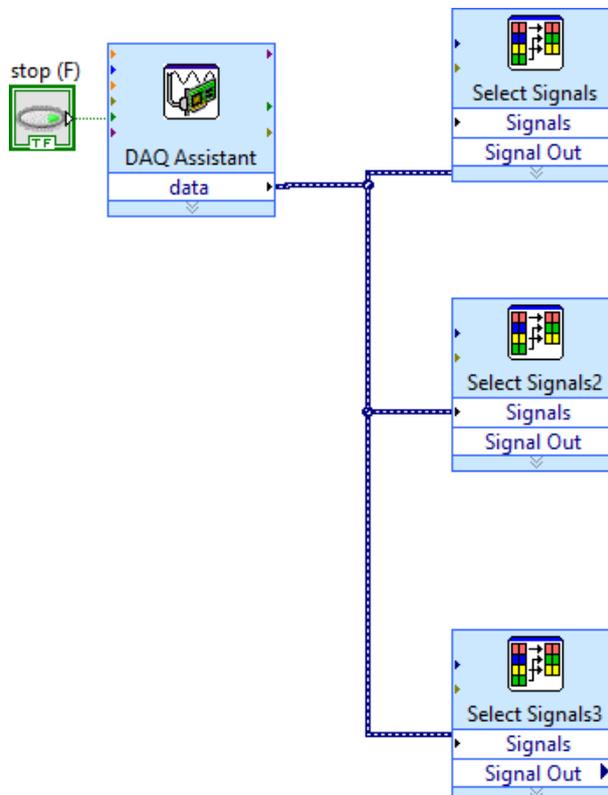


Figura 83. Conexión de los bloques referentes a la tarjeta DAC.

Los bloques “Select Signals” permiten extraer las señales analógicas que ingresa a la DAC, estas señales están dispuestas en el siguiente orden: Pin0 corresponde al sensor de la base, Pin1 al sensor del antebrazo y Pin2 al sensor conectado al brazo del dispositivo háptico.

### 3.2.3. Procesamiento de datos

En este proceso se calcula mediante una función matemática los grados a los cuales se encuentran los eslabones del dispositivo háptico, tomando como variable independiente el voltaje que lee la tarjeta DAC, el procedimiento se muestra en el siguiente diagrama.

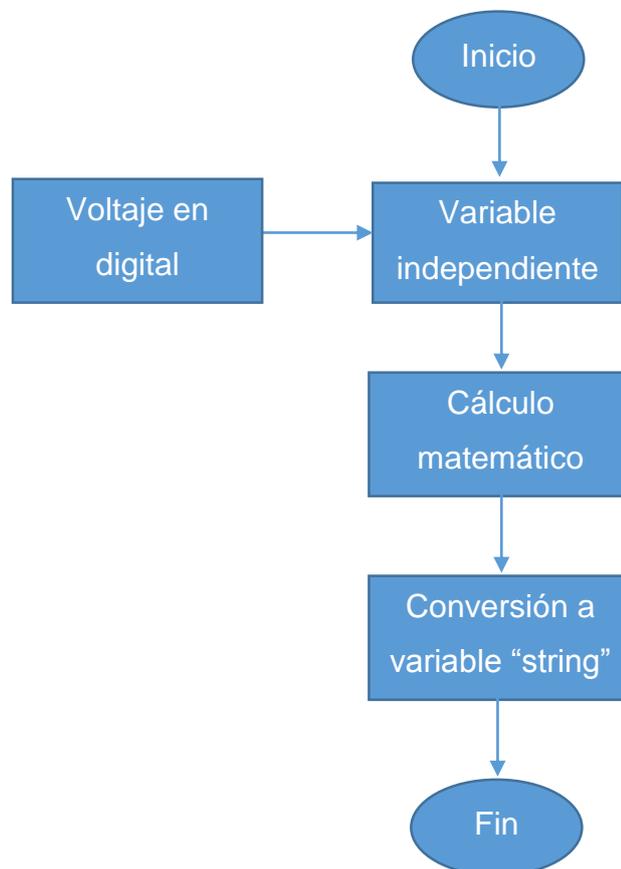


Figura 84. Diagrama de procesamiento de datos.

Para determinar la función matemática que representa el ángulo de giro usamos la ecuación general de la recta, para lo cual necesitaremos colocar al dispositivo háptico en dos posiciones para medir tanto el ángulo y el voltaje correspondiente para encontrar  $P_1$  y  $P_2$ .

**Ecuación general de la recta.**

$$y - y_o = m(x - x_o) \quad (17)$$

Donde:

$y$ : Variable dependiente de la ecuación.

$x$ : Variable independiente de la ecuación.

$m$ : Pendiente de la recta.

$y_o$ : Coordenada en el eje de las “ $y$ ” de un punto de la recta.

$x_o$ : Coordenada en el eje de las “ $x$ ” de un punto de la recta.

**Pendiente de una recta.**

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (18)$$

Donde:

$m$ : Pendiente de la recta.

$y_2$ : Coordenada en Y de  $P_2$ .

$y_1$ : Coordenada en Y de  $P_1$ .

$x_2$ : Coordenada en X de  $P_2$ .

$x_1$ : Coordenada en X de  $P_1$ .

Los puntos  $P_1$  y  $P_2$  se muestran en el plano cartesiano de la Figura 85.

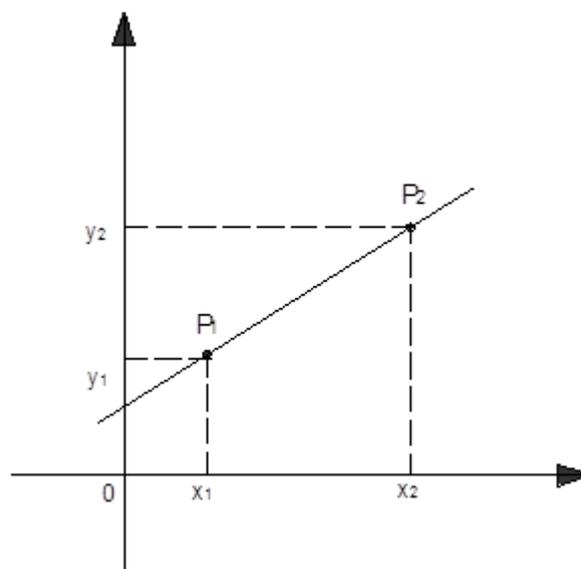


Figura 85. Coordenadas en el plano cartesiano de dos puntos.

Ahora bien, el ángulo que cada eslabón se desplaza dentro de la cadena cinemática del dispositivo debe ser semejante al ángulo del Robot KUKA KR16; estos valores específicos son tomados de acuerdo a la referencia que posee el robot industrial, en este caso se utiliza la posición HOME; por esta razón presentamos un ejemplo de cálculo para encontrar la función que representa los grados que se desplaza el antebrazo del dispositivo háptico.

Tomamos la configuración de los eslabones del robot Industrial en la posición HOME que se muestra en la Figura 86.

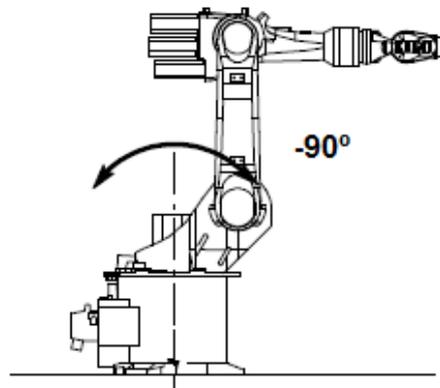


Figura 86. Posición HOME del Robot KUKA KR16.  
Fuente: (KUKA Robot Group, 2009)

En esta posición el antebrazo del robot KUKA está a  $-90^\circ$ ; esta misma posición configuramos en el dispositivo háptico como muestra la Figura 87 para realizar la lectura de voltaje del sensor.



Figura 87. Antebrazo del dispositivo háptico perpendicular a la base.

Luego de realizar la lectura de voltaje que la tarjeta DAC entrega procedemos a formar el punto  $P_1$  de la siguiente forma:

$$P_1 = (2.6912, -90)$$

Donde 2.6912 es el voltaje obtenido por medio de la DAC al realizar la lectura y  $-90^\circ$  es el ángulo en el que se encuentra el antebrazo del robot KUKA.

De la misma manera para obtener el punto  $P_2$  configuramos los eslabones del dispositivo háptico como muestra la Figura 88; en esta posición el antebrazo se encuentra a  $0^\circ$  totalmente horizontal con respecto a la base de apoyo.

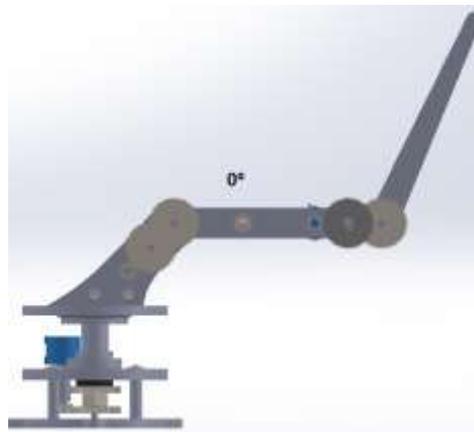


Figura 88. Antebrazo del dispositivo háptico a  $0^\circ$ .

Realizada la lectura de voltaje que la DAC otorga se forma el punto  $P_2$  de la siguiente forma:

$$P_2 = (3.7633, 0)$$

Donde 3.7633 es el voltaje obtenido por medio de la DAC al realizar la lectura y  $0^\circ$  es el ángulo en el que se encuentra el antebrazo del robot.

Estos puntos  $P_1$  y  $P_2$  son reemplazados en la fórmula 11 de tal manera que se obtiene:

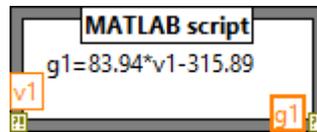
$$m = \frac{0 - (-90)}{3.7633 - 2.6912} = 83.94$$

Obtenido el valor de la pendiente de la recta se reemplaza conjuntamente con los valores de  $P_2$  en la Fórmula 17 para obtener la siguiente ecuación:

$$y = 83.94x - 315.89$$

Donde “y” representa el ángulo y “x” el voltaje de la señal del sensor.

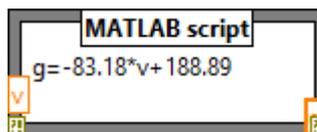
Esta función se ingresa en un script de MATLAB dentro de la programación como muestra la Figura 88.



MATLAB script  
 $g1 = 83.94 \cdot v1 - 315.89$

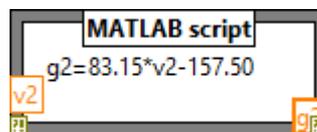
Figura 89. Función matemática para el antebrazo.

El mismo procedimiento se realiza para los demás eslabones, considerando que en la posición HOME la base del robot KUKA KR16 está en  $0^\circ$  y el brazo en  $90^\circ$ , y que además el desplazamiento angular de los eslabones obedece la regla de la mano derecha; de esta forma obtenemos las funciones que se muestran en las Figuras 90 y 91.



MATLAB script  
 $g = -83.18 \cdot v + 188.89$

Figura 90. Función matemática para la base.



MATLAB script  
 $g2 = 83.15 \cdot v2 - 157.50$

Figura 91. Función matemática para el brazo.

Para convertir cada variable a “string” utilizamos el bloque que se muestra en la Figura 92 y lo configuramos para que el valor tenga solo dos decimales y evitar ciertas variaciones de voltaje que se encuentran el orden de los milivoltios.

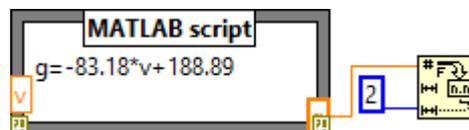


Figura 92. Conversión de un número a string.

### 3.2.4. Definir cadena de datos.

Para enviar los datos procesados, es necesario generar una sola cadena de caracteres que transmita a la vez la posición de los tres eslabones hacia el CPU del Robot Industrial; esto contribuye a que se disminuya líneas de código en la programación del robot KUKA.

Para unir los datos que se encuentran como variables “string” en una sola cadena de datos se utiliza una operación de concatenación, manteniendo el formato que se muestra en la Figura 93:

Ángulo base	Espacio	Ángulo antebrazo	Espacio	Ángulo brazo
-------------	---------	------------------	---------	--------------

Figura 93. Formato de la cadena de caracteres.

En la programación, la conexión de los bloques necesarios para realizar la cadena antes mencionada se muestra en la Figura 94.

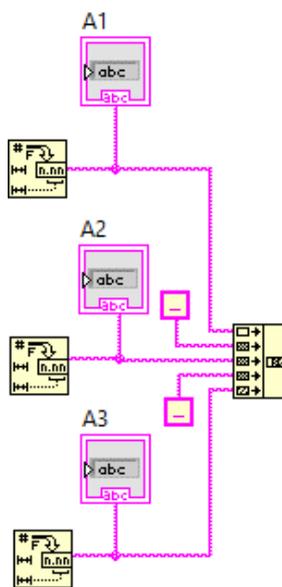


Figura 94. Conexión de bloques para realizar la concatenación de datos.

### 3.2.5. Enviar datos.

Para enviar los datos mediante comunicación serial; en la programación se emplea los bloques que muestran la Figura 95.

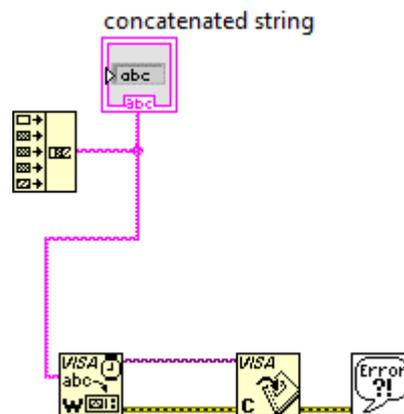


Figura 95. Bloques para envío de cadena de caracteres.

Mediante esta programación es posible enviar por serial la cadena de caracteres que contiene la información procesada de los sensores que posee el dispositivo háptico; y transmitirlo hacia el robot KUKA mediante el cable RS232.

### 3.3. PROGRAMACIÓN DEL ROBOT INDUSTRIAL KUKA KR16.

Previo a la configuración y creación del programa dentro del Robot Industrial es necesario iniciar el entorno de programación a nivel experto.

#### 3.3.1. Programación a nivel experto.

La programación a nivel experto permite visualizar y editar archivos a los que el usuario no tiene acceso; para cambiar a nivel experto es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Ir a la pestaña “Configurar”.
2. Seleccionar “Grupo de usuario”.

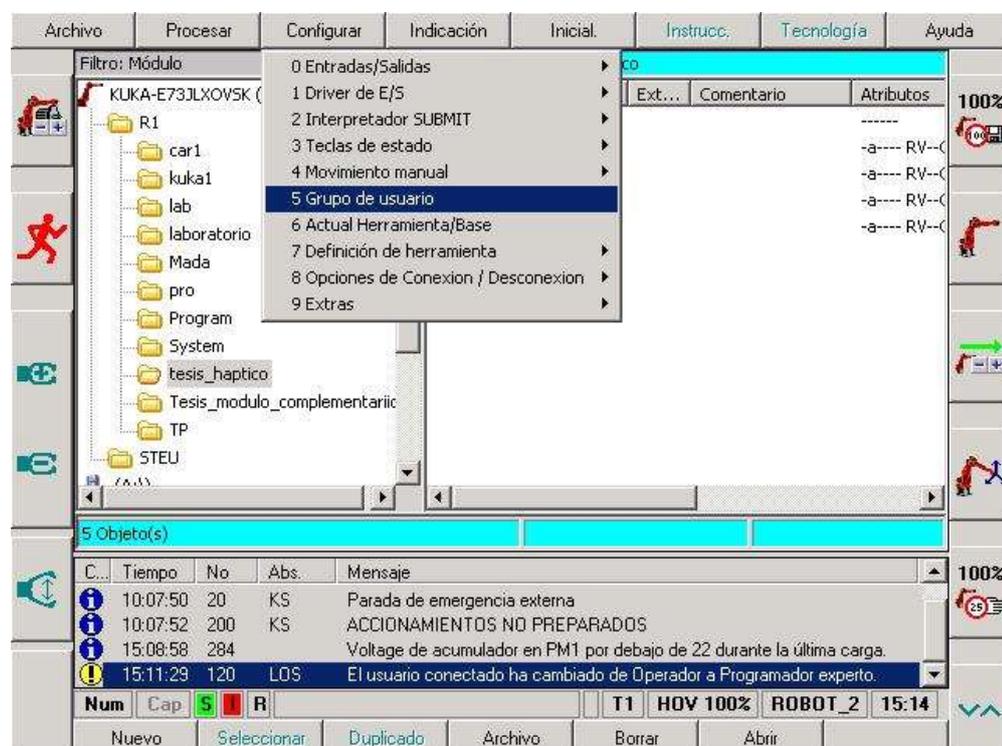


Figura 96. Procedimiento para elegir grupo de usuario

3. Clic en “Conectar”.
4. Seleccionar “Programador experto”.

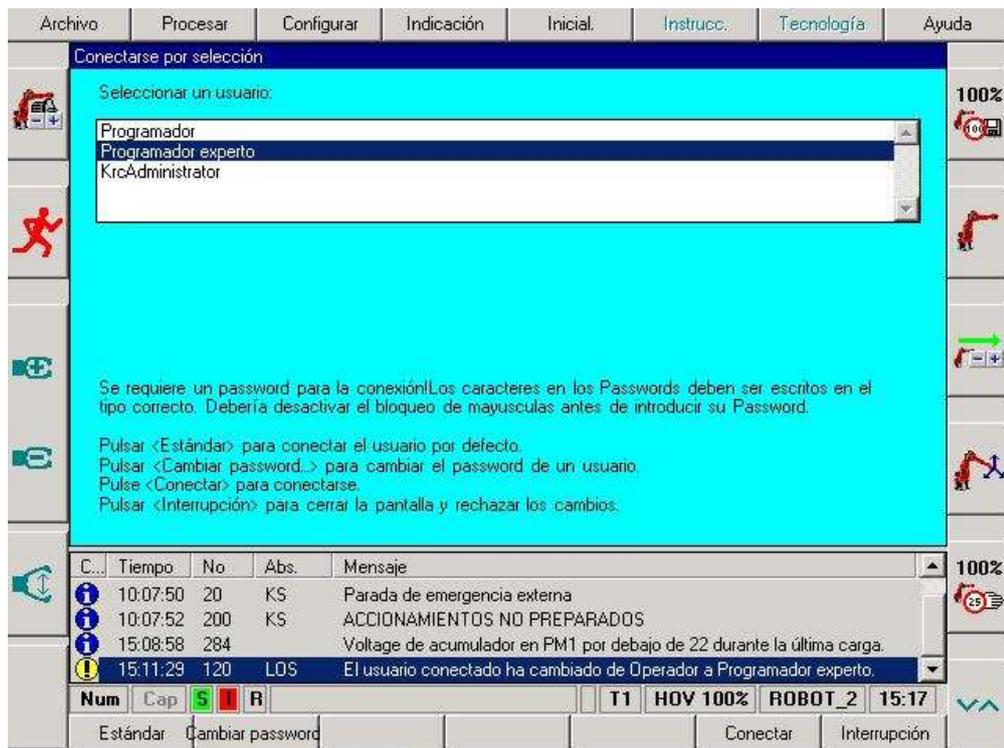


Figura 97. Selección de programador experto

- Ingresar la clave.
- Clic en “Conectar”.

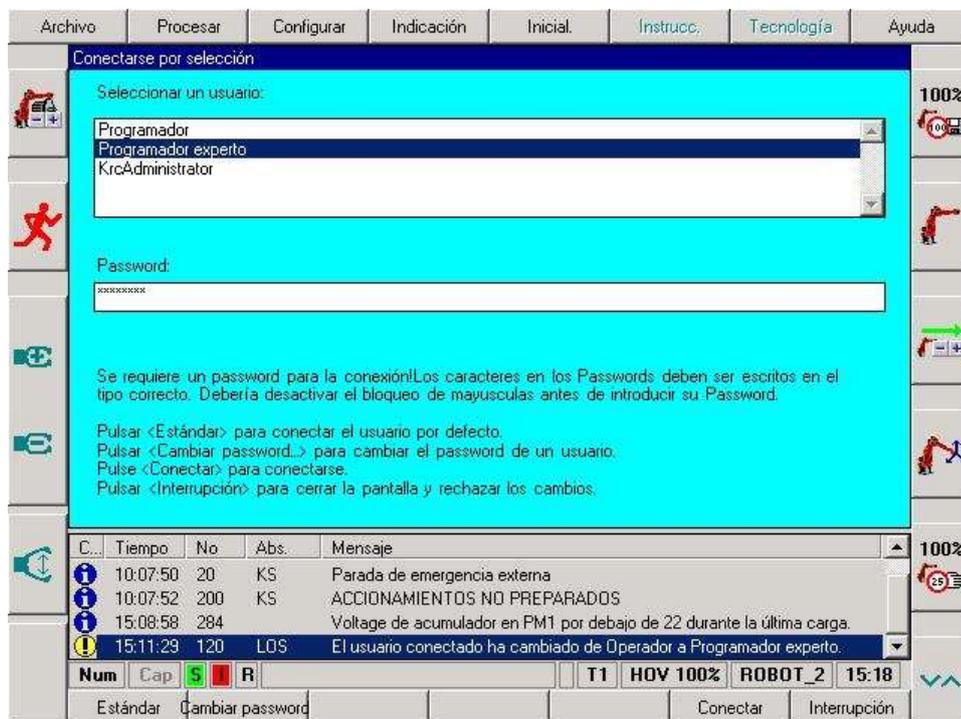


Figura 98. Ingreso de contraseña

Una vez en nivel experto es posible configurar al robot para poder efectuar la comunicación serial, además de realizar y poner en marcha el programa que controla los motores de cada uno de los eslabones A1, A2 y A3; que son la base, antebrazo y brazo del dispositivo háptico respectivamente.

### 3.3.2. Apertura del puerto serial del robot KUKA KR16.

La habilitación y configuración del puerto serial del robot KUKA se realiza una sola vez; luego de efectuar los cambios, un arranque en frío permite guardar y cargar la nueva configuración del robot; los cambios a realizar son los siguientes:

- **Habilitación del COM3.**

El puerto COM3 es el puerto asignado para la comunicación serial mediante cable RS232 en el robot; para habilitarlo es necesario abrir los siguientes archivos y modificarlos.

- **Archivo “hw\_inf”** (Ruta: C:\KRC\Roboter\Init)

En este archivo se habilita el COM3 para que pueda ser accesible dentro de la programación del robot; para ello el archivo debe estar de la siguiente manera:

```
[SERIAL]
;ENABLE: COM is accessible by robot (vxWorks)
;DISABLE: COM is accessible by Win95
;CONSOLE: for developer only
COM3=ENABLE ; [ENABLE, DISABLE, CONSOLE]
```

- **Archivo “serial”** (Ruta: C:\KRC\Roboter\Init)

Aquí se configura los parámetros de comunicación para el COM3 de la siguiente forma:

```
[COM3]
BAUD=9600
CHAR_LEN=8 ; 7,8
STOP_BIT=1 ; 1,2 at time not changeable
PARITY=2 ; EVEN=2, ODD=1, NONE=0
```

Adicionalmente en el mismo archivo se mantiene la siguiente configuración:

```
[TEST]
;testprint(Rx/Tx-telegrams) on telnet if value > 0
TESTPRINT=1
```

El “TESTPRINT” permite visualizar mediante TELNET los datos que se escriben en el puerto serial.

### 3.3.3. Verificación de Comunicación serial.

En la programación a nivel experto se tiene acceso a dos archivos cuando se crea un programa; el primer archivo con extensión SRC contiene el código de las instrucciones que el programador genera, mientras que otro archivo de extensión DAT contiene la declaración de las variables que se emplean en el archivo SRC; ambos archivos se generan automáticamente y son necesarios para la correcta ejecución de un programa.

Para visualizar el archivo DAT se realizan los siguientes pasos:

1. Ir a la pestaña “Archivo”.
2. Seleccionar “Filtro”.

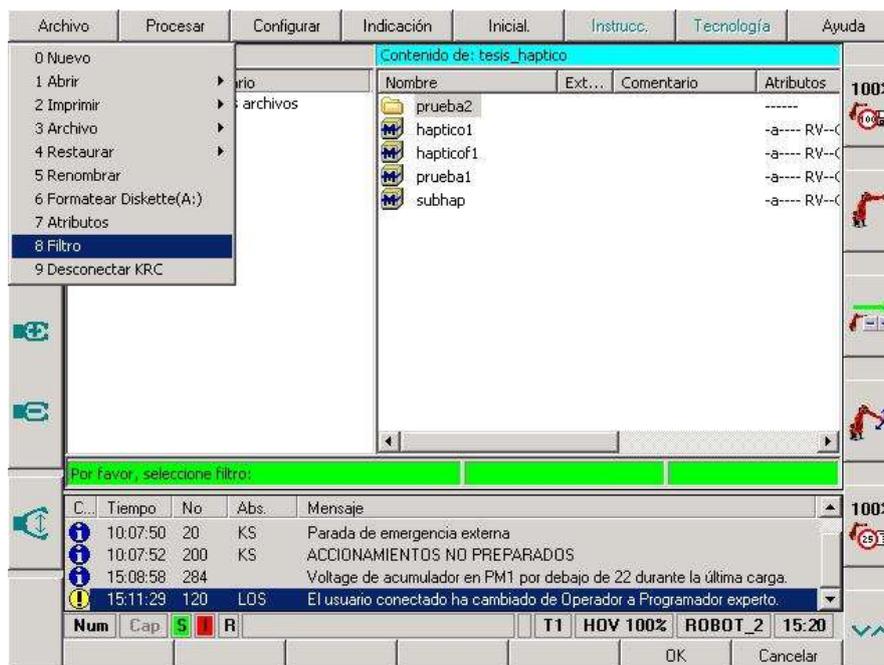


Figura 99. Procedimiento para visualizar archivos .DAT

3. Seleccionar “Modulo”.

4. Seleccionar “Detalle”.

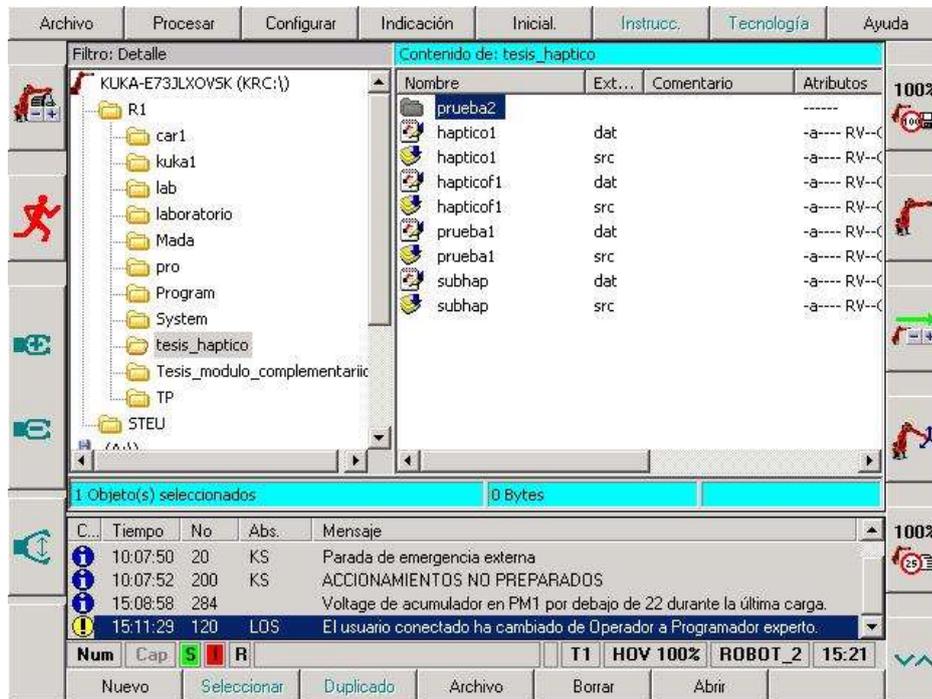


Figura 100. Visualización de los archivos extensión DAT.

El siguiente programa permite realizar una verificación de la comunicación serial y conocer si los datos que se reciben son los correctos.

- **Archivo prueba1.SRC.**

```
&REL 17
&PARAM TEMPLATE =C:\KRC\Roboter\Template\ExpertVorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEF prueba1( ) ; Nombre del programa
;-----INICIALIZACIONES-----
MW_T=#SYNC ; transferencia sincronizada iniciada
MR_T=#ABS
TIMEOUT=3.0 ; Tiempo de espera
OFFSET=0
;-----INSTRUCCIONES
COPEN (:SER_3, HANDLE) ; Función Apertura de canal.
IF (HANDLE==0) THEN
    HALT
```

```

ENDIF
CREAD (HANDLE, SR_T, MR_T, TIMEOUT, OFFSET, "%f %f %f",
PA1, PA2, PA3)          ; Función de lectura de datos y asignación.
IF (SR_T.RET1<>#DATA_OK) THEN
    HALT
ENDIF
CCLOSE (HANDLE, SC_T)   ; Función de Cierre de canal.
IF (SC_T.RET1<>#CMD_OK) THEN
    HALT
ENDIF
END

```

- **Archivo prueba1.DAT.**

```

&ACCESS RVP
&REL 17
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\ExpertVorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEFDAT prueba1 PUBLIC
DECL STATE_T SR_T, SC_T, STATE
DECL MODUS_T MW_T, MR_T
INT HANDLE, OFFSET
REAL TIMEOUT
REAL PA1, PA2, PA3   ; Variables donde se asigna los datos de lectura.
ENDDAT

```

Una vez ejecutado este programa, si se desea visualizar el dato que se recibe en el puerto serial y para verificar la comunicación se puede emplear el Telnet mediante los siguientes pasos:

1. Presionar Ctrl+ESC; para visualizar la pantalla de inicio de Windows.
2. Clic en el botón de inicio de Windows.
3. En el menú Inicio seleccionar "Ejecutar"

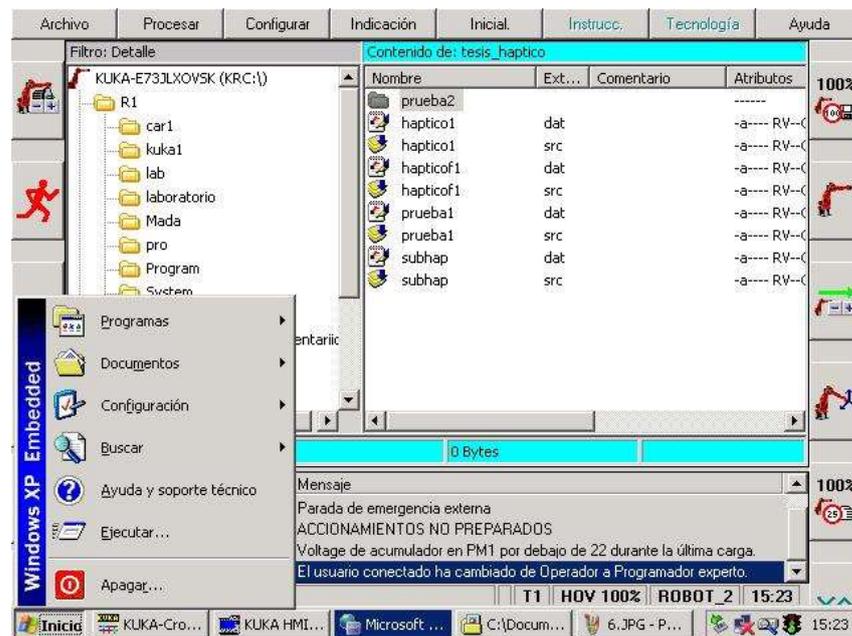


Figura 101. Procedimiento para abrir la pantalla TELNET

4. Ingresar “telnet95 192.0.1.1”
5. Clic en ACEPTAR.

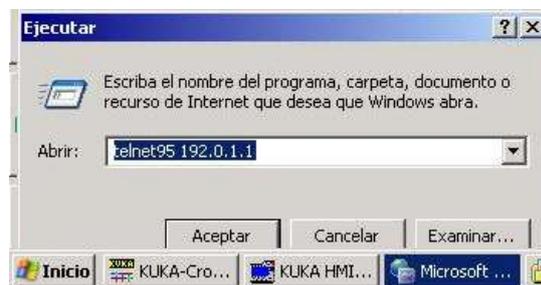


Figura 102. Ingreso de la dirección para TELNET

### 3.3.4. Programa para girar los eslabones del robot KUKA.

Una vez verificada la conexión serial entre la PC y el robot KUKA, se debe realizar los siguientes pasos en el Teach pendant:

1. Encender los motores.



*Figura 103. Encendido de motores*

## 2. Seleccionar el Modo "Automático".



*Figura 104. Selección modo automático*

Hecho esto se debe ejecutar el programa que controla los movimientos de los motores de los eslabones A1, A2 y A3 cuyo diagrama de flujo se presenta a continuación:

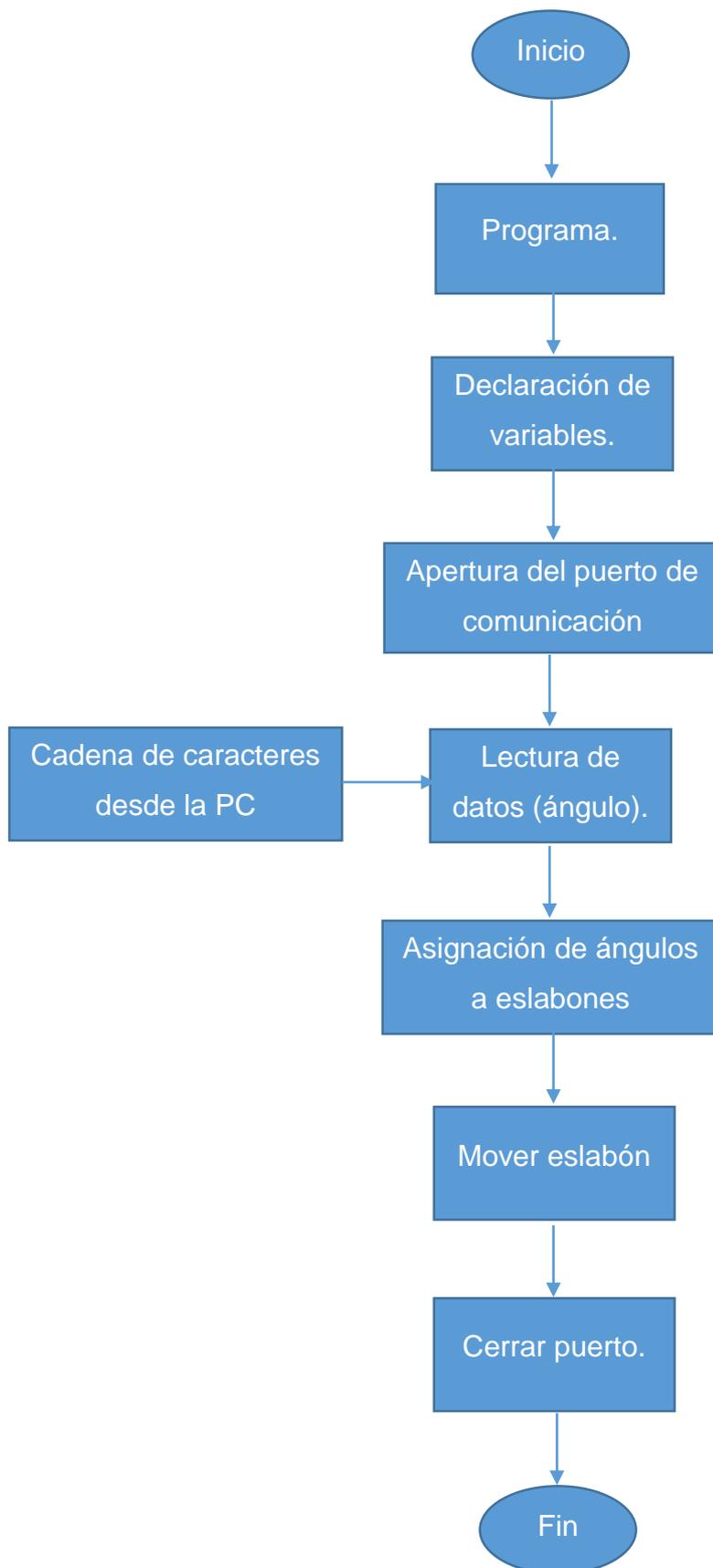


Figura 105. Diagrama de flujo para controlar motores del KUKA

El código de programación .SRC que realiza las tareas expuestas en el diagrama de flujo de la Figura 95 se expone a continuación:

```

&ACCESS RVO1

&REL 11

&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\ExpertVorgabe
&PARAM EDITMASK = *

DEF SUBHAP( )      ; Nombre del programa.
;-----INICIALIZACIONES-----

MW_T=#SYNC        ; Transferencia sincronizada iniciada.
MR_T=#ABS
TIMEOUT=3.0       ; Tiempo de espera.
OFFSET=0

;-----INICIALIZACIONES DE MOVIMIENTOS-----

;bas(#tool,1)     ; Selección de herramienta 1.
;bas(#base,0)     ; Selección de coordenadas.
;bas(#vel_ptp,30) ; Velocidad de eslabones al 30%.
;bas(#acc_ptp,10) ; Aceleración de eslabones al 10%.
HAPT= {AXIS: A1 0, A2 -90, A3 90, A4 0, A5 0, A6 0} ;
Coordenadas de la posición HOME.
;-----INSTRUCCIONES
COPEN(:SER_3, HANDLE) ; Función Apertura de canal.
IF (HANDLE==0) THEN
    HALT
ENDIF
CREAD (HANDLE, SR_T, MR_T, TIMEOUT, OFFSET, "%f %f %f", PA1,
PA2, PA3)             ; Función lectura de datos y asignación a
variables.
HAPT.A1=PA1          ; Asignación de ángulo a eslabón A1.
HAPT.A2=PA2          ; Asignación de ángulo a eslabón A2.
HAPT.A3=PA3          ; Asignación de ángulo a eslabón A3.
PTP HAPT
CCLOSE (HANDLE, SC_T) ; Función de cierre de canal.
IF (SC_T.RET1<>#CMD_OK) THEN
    HALT
ENDIF

```

END

En el archivo .DAT se tiene la declaración de variables de acuerdo al tipo al que pertenecen y se expone a continuación.

```
&ACCESS RVO1
&REL 11
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\ExpertVorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEFDAT SUBHAP PUBLIC
DECL STATE_T SR_T, SC_T, STATE
DECL MODUS_T MW_T, MR_T
INT HANDLE, OFFSET
REAL TIMEOUT
REAL PA1, PA2, PA3
AXIS HOME
AXIS HAPT
ENDDAT
```

El programa asigna el valor de ángulo al que se debe posicionar el eslabón A1, A2 y A3; pero no realiza un ciclo continuo de lectura y asignación de datos; para ello el programa SUBHAP.SRC se convierte en un subprograma. El programa HAPTICOF1 ejecuta de forma continua y repetida al subprograma y se expone a continuación:

```
&ACCESS RVP
&REL 8
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\ExpertVorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEF HAPTICOF1 ( ) ; Nombre del programa.
bas (#tool,1) ; Selección de herramienta 1.
bas (#base,0) ; Selección de coordenadas.
bas (#vel_ptp,25) ; Velocidad de eslabones al 25%.
bas (#acc_ptp,25) ; Aceleración de eslabones al 25%.

HOME={AXIS: A1 0, A2 -90, A3 90, A4 0, A5 0, A6 0}
; Coordenada de HOME
PTP HOME ; Movimiento hacia la posición HOME.
COPEN (:SER_3,HANDLE) ; Función apertura de canal.
```

CCLOSE (HANDLE, SC\_T) ; **Función cierre de canal.**  
 LOOP ; **Inicio de ciclo repetitivo.**  
 SUBHAP ( ) ; **Subprograma.**  
 ENDLLOOP  
 END

Este programa realiza un posicionamiento en HOME y a partir de ahí se generan los movimientos comandados por el dispositivo háptico, esto para evitar posiciones extremas que puedan afectar la integridad del robot industrial.

### 3.4. DISEÑO DEL HMI.

Para que el usuario pueda iniciar la comunicación serial y tenga la opción de tener información detallada del comportamiento del dispositivo háptico se ha diseñado la interfaz que se muestra en la Figura 96.



Figura 106. Interfaz de comunicación

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1. PRUEBAS

El proceso de pruebas que se siguió para verificar el funcionamiento del dispositivo háptico consta de la prueba de precisión en el posicionamiento angular tanto del dispositivo como del robot industrial.

##### 4.1.1. Prueba de Precisión

Como se mencionó en el capítulo 2 existen tres factores que inciden en la precisión del movimiento de un manipulador robótico industrial, los mismos que son tomados en cuenta para verificar el funcionamiento del dispositivo.

- Resolución espacial: es el mínimo movimiento que puede realizar el robot industrial al accionar el dispositivo háptico. En este proyecto la resolución depende del mínimo ángulo de giro que la DAQ puede registrar, en la tabla 16 se presenta la resolución de cada eslabón.

**Tabla 16**  
**Resolución de eslabones**

Eslabón	Resolución
1	0.1°
2	0.1°
3	0.1°

- Exactitud: es la capacidad que tiene el robot para alcanzar las coordenadas programadas por el dispositivo.
- Repetibilidad: es la característica que permite al robot dirigirse a una posición específica y volver las veces que se lo solicite.

Para la verificación de las dos últimas características se toma en cuenta la norma ISO 9283, la cual cuenta con ejemplos de las pruebas a aplicar e indica la forma indicada de interpretar los resultados.

Los instrumentos de medición recomendados para aplicar estas pruebas deben tener una tolerancia menor a 0.05 mm.

En nuestro caso se midió el ángulo de cada eslabón, para lo cual se utilizó un graduador de 1° de resolución tanto para tomar las medidas en el robot industrial como en el dispositivo.

La norma indica que se deben tomar datos de posición en las coordenadas X, Y, Z previamente definidas durante 30 ciclos repetidos pero en nuestro caso las coordenadas fueron reemplazadas por ángulos de las tres articulaciones los cuales son respectivamente base, antebrazo y brazo:  $\theta_1 = 37^\circ$ ,  $\theta_2 = -45^\circ$  y  $\theta_3 = 50^\circ$

En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 17**  
**Datos de las pruebas de precisión y exactitud.**

Nº	Dispositivo			Robot		
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
1	36.52	- 44.36	50.63	36.52	- 44.36	50.63
2	36.27	- 45.65	50.86	36.27	- 45.65	50.86
3	37.85	- 45.36	50.36	37.85	- 45.36	50.36
4	35.60	- 46.32	50.14	35.60	- 46.32	50.14
5	35.96	- 44.89	50.24	35.96	- 44.89	50.24
6	36.41	- 44.23	50.84	36.41	- 44.23	50.84
7	36.47	- 44.58	51.47	36.47	- 44.58	51.47
8	37.50	- 46.58	49.36	37.50	- 46.58	49.36
9	35.98	- 45.25	49.80	35.98	- 45.25	49.80
10	37.54	- 45.36	50.12	37.54	- 45.36	50.12
11	38.02	- 45.26	50.32	38.02	- 45.26	50.32

<b>12</b>	36.89	- 45.87	50.64	36.89	- 45.87	50.64
<b>13</b>	34.36	- 46.12	50.26	34.36	- 46.12	50.26
<b>14</b>	37.85	- 45.36	51.23	37.85	- 45.36	51.23
<b>15</b>	35.62	- 45.18	49.85	35.62	- 45.18	49.85
<b>16</b>	38.24	- 45.32	49.68	38.24	- 45.32	49.68
<b>17</b>	36.54	- 44.63	49.78	36.54	- 44.63	49.78
<b>18</b>	36.95	- 44.82	50.65	36.95	- 44.82	50.65
<b>19</b>	37.52	- 45.29	50.38	37.52	- 45.29	50.38
<b>20</b>	35.68	- 46.31	50.96	35.68	- 46.31	50.96
<b>21</b>	37.25	- 44.58	50.84	37.25	- 44.58	50.84
<b>22</b>	37.85	- 46.28	49.63	37.85	- 46.28	49.63
<b>23</b>	36.57	- 46.38	49.87	36.57	- 46.38	49.87
<b>24</b>	35.65	- 45.78	51.23	35.65	- 45.78	51.23
<b>25</b>	36.36	- 45.36	50.21	36.36	- 45.36	50.21
<b>26</b>	35.77	- 45.27	50.23	35.77	- 45.27	50.23
<b>27</b>	37.67	- 44.28	50.69	37.67	- 44.28	50.69
<b>28</b>	37.18	- 44.59	51.49	37.18	- 44.59	51.49
<b>29</b>	36.95	- 46.35	50.47	36.95	- 46.35	50.47
<b>30</b>	36.84	- 46.25	49.86	36.84	- 46.25	49.86

## 4.2. RESULTADOS

### 4.2.1. Exactitud de posición angular

La norma ISO 9283:1998 indica la siguiente ecuación para calcular la exactitud de la posición.

$$\text{Exactitud de posición} = \sqrt{(\bar{\theta 1} - \theta 1c)^2 + (\bar{\theta 2} - \theta 2c)^2 + (\bar{\theta 3} - \theta 3c)^2} \quad (19)$$

Donde:

$$\bar{\theta 1} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta 1_j$$

$$\bar{\theta 2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta 2_j$$

$$\bar{\theta 3} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta 3_j$$

$\bar{\theta 1}, \bar{\theta 2}, \bar{\theta 3}$ , representan la media de cada grupo de datos obtenido para los ángulos  $\theta 1, \theta 2, \theta 3$  después de que el dispositivo y el robot hayan alcanzado la posición deseada.  $\theta 1c, \theta 2c, \theta 3c$ , son los ángulos que se intentó alcanzar con cada uno de los eslabones.

Aplicando las ecuaciones expuestas se presentan los resultados obtenidos para la prueba de exactitud.

$$\text{Exactitud de posición} = 0.626^\circ$$

### 4.2.2. Repetibilidad

Las ecuaciones que se utilizaron para el cálculo de la repetibilidad fueron las siguientes:

$$RP = \bar{l} + 3S \quad (20)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (21)$$

$$l_j = \sqrt{(\theta 1_j - \bar{\theta 1})^2 + (\theta 2_j - \bar{\theta 2})^2 + (\theta 3_j - \bar{\theta 3})^2} \quad (22)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (23)$$

Donde:

RP: es la repetibilidad del dispositivo.

S: representa la desviación estándar.

$\bar{l}$ : Promedio del error medio cuadrático de cada posición.

$l_j$ : Error medio cuadrático de las posiciones alcanzadas.

Luego de aplicar las ecuaciones descritas se obtuvo el siguiente resultado de repetibilidad:

$$RP = \pm 2.432^\circ$$

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES**

- Se diseñó e implementó un dispositivo háptico capaz de realizar el control para el posicionamiento manual del robot industrial KUKA KR16, gracias a la ayuda de la programación a nivel experto que posee el controlador de robot se pudo establecer una comunicación de tipo serial con el dispositivo maestro.
  
- Se diseñó y construyó una cadena cinemática robusta, donde el material principal fue el aluminio, la cadena cinemática consta de tres grados libertad y guarda una escala de reducción de 5 a 1 respecto al robot industrial. Para llevar a cabo la construcción se realizó previamente el análisis estático y dinámico de cada uno de los elementos que conforman la estructura.
  
- Los circuitos eléctricos y electrónicos implementados permitieron el correcto acondicionamiento de señales, lo cual es parte fundamental para lograr un correcto posicionamiento del robot, ya que; debido a la resolución del dispositivo se puede generar una distorsión en la medida si existe la presencia de ruido en las señales.
  
- Siguiendo la norma GEDIS se diseñó la interfaz de comunicación (HMI) que servirá para la interacción entre el operador y el dispositivo logrando así la visualización y verificación de las variables que intervienen en el proceso.
  
- La resolución alcanzada con el dispositivo háptico es de  $0.1^{\circ}$  en cada eslabón, esto gracias a la relación de transmisión que existe en el conjunto de engranes.

- Después de la aplicación de la norma ISO: 9283:1998 se obtuvo una exactitud de  $0.626^{\circ}$  y una repetibilidad de  $\pm 2.432^{\circ}$ .
- Debido a que el robot industrial no se encuentra correctamente anclado, su velocidad y aceleración fueron reducidos para evitar movimientos bruscos lo que conlleva a que exista retardo en el movimiento de los eslabones.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Antes de ejecutar el programa se debe verificar que la velocidad sea del 30% en el robot industrial para evitar movimientos bruscos.
- Verificar que exista una adecuada comunicación serial, acondicionando los parámetros de comunicación correctos.
- El operador debe tener un pulso firme para manipular el dispositivo ya que se puede generar vibraciones las cuales afectaran la precisión del posicionamiento del robot.
- Se recomienda no llegar a los límites del volumen de trabajo del robot industrial, con el fin de proteger la integridad tanto del robot como del dispositivo háptico.
- Se recomienda incrementar los grados de libertad necesarios para la orientación del robot industrial como un trabajo futuro.

## REFERENCIAS

- Measurement Computing Corporation. (2014). *USB-230-Series data*. Measurement Computing.
- Aceros Boehler Uddeholm S.A. (2016). *Hoja Técnica placa de aluminio PRODAX*. Buenos Aires: Boehler Uddeholm.
- Alvarado, D., Butrón, M., Díaz Diego, & González Luis. (2013). *Diseño de Brazo Manipulador Háptico Teleoperado*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Atomics General. (2016). *Predator B RPA*. Retrieved from <http://www.gasasi.com/predator-b>
- Barrientos, A., Peñín, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). In *Fundamentos de Robótica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México, D.F: Mc Graw Hill.
- Federación Internacional de Robótica. (1988). *ISO TR 83737*.
- Fernández, A., Barreiro, A., & Cesáreo, R. (2006). *Teleoperación Háptica de un Puente Grúa*. Vigo: ReseachGate.
- Force Dimension. (2016). *Omega.3 haptic device*. Switzerland.
- García, M., & Díaz, R. (2010). *Diseño y desarrollo de un dispositivo háptico con aplicaciones para entornos educativos*. Colima - México: ResearchGate.
- Gómez, F., & Hernández, K. (2011). *Diseño e implementación de un sistema de teleoperación para el manipulador CRS A255 utilizando un dispositivo háptico de dos dimensiones*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- González, J., & Morales, O. (2015). *Diseño y construcción de un cambiador automático para tres herramientas del brazo robótico KUKA KR 16-2 en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L*. LAtacunga: ESPE-L.
- González, V. (2002, Marzo). *Fundamentos de Robótica*. Retrieved from  
Fundamentos de Robótica:

[http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0204/ctrl\\_rob/robotica/sistema/morfologia.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/morfologia.htm)

- Guano, M., & Sevilla, A. (2015). *Diseño y construcción de una plataforma robótica para exteriores teleoperada, para el laboratorio de manufactura*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- International Organization for Standardization. (2012). *Robots and robotic devices - Vocabulary. ISO 8373*.
- Kelly, R., & Santibáñez, V. (2003). In *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- KUKA Robot Group. (2009). *KUKA KR 6-2 y KR 16-2*. Gersthofen-Alemania: KUKA.
- KUKA Robot Group. (2015). *KR 1000 TITAN*. Retrieved from KR 1000 TITAN: [http://www.kuka-robotics.com/es/products/industrial\\_robots/heavy/kr1000\\_titan/kr1000/](http://www.kuka-robotics.com/es/products/industrial_robots/heavy/kr1000_titan/kr1000/)
- KUKA Roboter GmbH. (2003). *KR C2 / KR C3 Expert Programming*.
- KUKA Roboter GmbH. (2013). *KR 16 arc HW, KR 16 L8 arc HW*. Augsburg.
- Martínez, E., & Paña, C. (Diciembre 2010). DISEÑO ÓPTIMO DE UN ROBOT PARALELO CON CONFIGURACIÓN DELTA PARA APLICACIONES EDUCATIVAS. *Educación en ingeniería*.
- Mouser Electronics Inc. (2016). *Comparacion potenciómetros*.
- NASA. (2012, Agosto 10). *Mars Pathfinder Mission*. Retrieved from <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/rover.html>
- National Instruments. (2015). *NI USB-6008/6009*. National Instruments.
- Nuño, E., & Basañez, L. (2004). *Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Omega engineering. (2015). *OMB-DAQ54*. Madrid: Omega.
- Omega engineering. (2016). *OMB-DAQ55*. Madrid: Omega.
- PALEX MEDICAL S.A. (2016). *Da Vinci Xi*. Retrieved from <http://davincivscancer.com/robot-davinci-xi/robot-davinci>
- Pérez, J., & Lagos, N. (2002). *El Lenguaje V+*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.

- Robotic Industry Association. (1990). Future Machine. *Robotic Industry Association Magazine*, 1-4.
- Rodriguez, F., & Olivares, G. (n.d.). *Robot Cartesiano XYZ*. Azcapotzalco - México: Instituto Politécnico Nacional.
- Sensible. (2016). *PHANTOM OMNI HAPTIC DEVICE*. Retrieved from PHANTOM OMNI HAPTIC DEVICE: <http://www.dentsable.com/haptic-phantom-omni.htm>
- streamkiller. (2013, Agosto 26). *ROBOTICAJH*. Retrieved from ROBOTICAJH: <https://roboticajh.wordpress.com/2013/08/26/estructura-de-los-robots/>
- Suntaxi, B., & Llanos, A. (2013). *Diseño e implementación de un módulo complementario al robot KUKA KR 16 para la adaptación de una celda flexible de manufactura en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE*. Sangolquí: ESPE.
- VRLAB. (n.d.). *Haptic Master*. Retrieved from Haptic Master: <http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/HapticMaster.html>