

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN  
INGENIERÍA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
TELEOPERACIÓN PARA EL MANIPULADOR CRS A255  
UTILIZANDO UN DISPOSITIVO HÁPTICO DE DOS  
DIMENSIONES**

**FAUSTO R. GÓMEZ P.  
KARINA A. HERNÁNDEZ F.**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**2011**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el proyecto de grado titulado “***DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TELEOPERACIÓN PARA EL MANIPULADOR CRS A255 UTILIZANDO UN DISPOSITIVO HÁPTICO DE DOS DIMENSIONES***”, ha sido desarrollado en su totalidad por el Sr. Fausto Rolando Gómez Peñaherrera con Cl. 1716418189 y la Srta. Karina Alexandra Hernández Figueroa con Cl. 1713699351, bajo nuestra dirección.

---

Ing. Alejandro Chacón  
DIRECTOR

---

Ing. Hugo Ortiz  
CODIRECTOR

# Agradecimiento

Le doy gracias a Dios por bendecirme todos los días con una nueva oportunidad de vivir y ser feliz, a Él por ser mi principal compañía en el largo trajinar de mi vida estudiantil y permitirme culminar con éxito un objetivo más.

En especial agradezco a la ESPE, sus autoridades y profesores, quienes han despertado en mi el talento, la perseverancia y el carácter necesarios para cumplir con éxito esta investigación.

Como no agradecer a mis compañeros y compañeras por su amistad apoyo y buenos momentos, especialmente a Karina, mi compañera de tesis, cuya compañía ha sido fundamental e incondicional, a quien con cariño la he considerado siempre como mi mano derecha y mi complemento ideal en la lucha por alcanzar nuestros sueños.

Le agradezco a mi hermana, su esposo, a mi querida abuelita Coba, mi tía Anita, Fanicita, mi tío Rodrigo, quienes siempre se han mantenido atentos esperando mi éxito. A todos aquellos que directa o indirectamente han colaborado para que este trabajo se realice.

A todos ellos gracias por contribuir positivamente y haber hecho posible la culminación exitosa de este trabajo y siempre de mí los mejores deseos.

Fausto Rolando Gómez Peñaherrera

# Agradecimiento

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme vivir en este tiempo y darme en su infinita gracia la oportunidad de estudiar la carrera que me apasiona, la ingeniería Electrónica – Automatización y Control. También le agradezco de forma muy especial a mi familia, mi madre que tuvo la valentía de soñar junto conmigo a cada paso del camino y dejar que vuele tan alto como mi corazón quiera llegar, a mis hermanos que de una u otra forma estuvieron allí para mí brindándome un consejo y una palabra de aliento, a mis tíos que siempre tuvieron la confianza de que este proyecto llegaría a su fin.

Agradezco también de forma muy especial a la ESPE, al personal administrativo y a todos los profesores dedicados de Electrónica y Mecánica que de forma desinteresada nos ayudaron con su valioso tiempo. Gracias por formar mi carácter y enseñarme a ser buena sin importar el problema.

Como olvidar a mis compañeros de clases, gracias por la valiosa información, gracias por los momentos inolvidables de ser alumnos y disfrutar el campus, la comida y las bromas. Gracias a mi compañero de tesis por apoyar incondicionalmente en todas las actividades y llegar a culminar un sueño... ser ingenieros.

Por último pero no por eso menos importante le agradezco a la persona que me tuvo la fe perdida que ni yo misma me pude tener, gracias por darme el respiro necesario para continuar cada día con las mismas ganas, aprender a esperar y seguir luchando porque la vida y el presente contigo es un regalo... te quiero... MpP.

Karina Alexandra Hernández Figueroa

# ***D*edicatoria**

A mis padres y mi hermana, por su amor, apoyo incondicional, su consejo y dedicación, este trabajo es el resultado de su ejemplo de carácter y disciplina a quienes les debo todo lo que soy.

Fausto Gómez

# **Dedicatoria**

Dedico este proyecto a mi madre porque en su infinito amor y dedicación por sus hijos me enseñó el verdadero significado de la palabra mujer.

Karina Alexandra Hernández Figueroa

Marzo del 2011

## **PRÓLOGO**

El ser humano, en su insaciable necesidad de explorar el universo, no se ha detenido por sus limitaciones fisiológicas y cada vez existen menos lugares a donde el ser humano no ha llegado, tal es el caso de las exploraciones submarinas, subterráneas y espaciales; lugares donde la fisionomía del investigador no soportaría sobrevivir. Por ello los Sistemas de Teleoperación han dado una nueva perspectiva al desarrollo de la tecnología, siendo regla indispensable la comodidad y beneficio del teleoperador, tanto para el desarrollo de la rutina como para la ejecución de la misma.

El Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército, se ha visto en la obligación de incurrir en la investigación y el desarrollo de un sistema de teleoperación diseñado y construido con los recursos de la universidad y de los autores de esta obra, debido a la inexistencia de estudios en éste tipo de sistemas dentro de la escuela.

Como autores, nos hemos preocupado por el detalle minucioso de conceptos y términos clave, permitiéndole al lector entender fácilmente la implicación del diseño e implementación de un Sistema de Teleoperación utilizando un dispositivo háptico en dos dimensiones aplicado al robot CRS A255; considerando para esto una teoría bien fundamentada, la descripción del prototipo háptico implementado tanto en sus características mecánicas y electrónicas, así como un software confiable y amigable con el usuario, un detalle técnico de los dispositivos utilizados y una guía de funcionamiento para solucionar problemas y dudas al momento de poner en marcha el sistema de teleoperación, garantizando así un punto de partida en el desarrollo de futuras investigaciones en el campo de la teleoperación y telemanipulación.

## **ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>CAPÍTULO I</b>	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.3 ALCANCE DEL PROYECTO .....	3
1.4 OBJETIVOS .....	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos .....	4
1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	4
<b>CAPÍTULO II</b>	
MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 INTRODUCCIÓN A LOS DISPOSITIVOS HÁPTICOS.....	6
2.1.1 Sistemas Constitutivos .....	7
2.2 DESCRIPCIÓN DEL MANIPULADOR CRS A255 [7].....	12
2.2.1 Introducción.....	12
2.2.2 Manipulador Robótico.....	14
2.2.2.1 Espacio de Trabajo .....	14
2.2.3 Controlador Robótico C500 .....	16
2.2.4 Puerto de Comunicación.....	16
2.2.5 Lenguaje de Programación RAPL-II .....	17
2.2.6 Software de Programación ROBCOMM.....	18
2.3 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN.....	18
2.4 APLICACIÓN.....	19
<b>CAPÍTULO III</b>	
DISEÑO DEL PROTOTIPO HÁPTICO .....	21
3.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA .....	21
3.1.1 Análisis del Área de Trabajo.....	22
3.1.2 Resolución y Sensibilidad del Sistema .....	25
3.1.3 Análisis de la escala .....	27
3.1.4 Característica inercial de la estructura mecánica .....	29
3.1.4.1 Tren de engranes de la articulación uno .....	31
3.1.4.2 Tren de engranes de la articulación dos .....	32



3.1.4.3	Momento de inercia de la estructura mecánica.....	33
3.1.4.4	Cálculo del torque mínimo .....	35
3.1.5	Área de trabajo del Prototipo Final .....	36
3.2	DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y SENSORES PARA EL PROTOTIPO HÁPTICO .....	37
3.2.1	Sistema Eléctrico.....	37
3.2.2	Sensores.....	38

## CAPÍTULO IV

	DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE COMUNICACIÓN Y SOFTWARE DE CONTROL DEL SISTEMA DE TELEOPERACIÓN .....	42
4.1	INTERFAZ DE COMUNICACIÓN.....	42
4.1.1	Interfaz de comunicación para el dispositivo háptico .....	43
4.1.2	Interfaz de comunicación para el controlador C500 .....	47
4.2	DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA LA INTERFAZ DE COMUNICACIÓN Y CONTROL DEL TELEOPERADOR .....	48
4.2.1	Configuración del puerto serial .....	48
4.2.2	Inicialización de la comunicación.....	50
4.2.3	Ciclo infinito de adquisición de datos y envío de la sentencia de movimiento. ....	52
4.2.3.1	Adquisición del ángulo .....	52
4.2.3.2	Cinemática Directa. ....	53
4.2.3.3	Envío de coordenadas.....	54
4.2.3.4	Envío de la sentencia de movimiento.....	57
4.2.4	Fin de uso del dispositivo háptico.....	58
4.2.5	Envío a la posición inicial .....	58
4.2.6	Envío de secuencia de finalización .....	58
4.2.7	Cerrar el puerto serial .....	59

## CAPÍTULO V

	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	60
5.1	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO HÁPTICO.....	60
5.2	INTEGRACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO HÁPTICO Y EL SISTEMA ROBÓTICO CRS A255 .....	65
5.2.1	Condiciones iniciales de funcionamiento.....	66
5.2.2	Ejecución del Sistema de Teleoperación .....	68
5.2.3	Captura de pantallas de la corrida del programa .....	70

5.3	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	72
5.3.1	Tolerancia del Sistema .....	73
5.3.2	Trazo por puntos .....	74
5.3.2.1	Repetibilidad.....	75
5.3.3	Trazo de figuras.....	76
5.3.3.1	Trazo de línea .....	76
5.3.3.2	Trazo de polígono .....	77
5.3.3.3	Trazo de arco .....	78
5.3.3.4	Trazo de circunferencia.....	79

## CAPÍTULO VI

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
6.1	CONCLUSIONES.....	81
6.2	RECOMENDACIONES .....	84

# ***CAPITULO 1***

## ***INTRODUCCIÓN***

### ***1.1 ANTECEDENTES***

A nivel mundial la problemática al adquirir un manipulador industrial consiste en enfrentarse a una arquitectura cerrada, es decir, no acepta controladores, elementos terminales u otros dispositivos ajenos a la línea del mismo fabricante. En consecuencia el comprador de un robot industrial siempre estaría comprometido con la empresa vendedora obligándolo a adquirir complementos del manipulador muy costosos o que no se ajusten a sus necesidades satisfactoriamente.

La Escuela Politécnica del Ejército cuenta desde 1995 con varios manipuladores CRS Modelo A255 en el laboratorio de Robótica, donde el estudiante se capacita de manera teórica y práctica en cuanto al funcionamiento y configuración del robot, en función del hardware y software de la empresa proveedora. Todo el conocimiento teórico-práctico adquirido en el laboratorio de Robótica se aplica en un entorno real en el laboratorio CIM 2000, donde el manipulador integra la celda de trabajo con la línea de producción.

Un dispositivo háptico es aquel que funciona como interfaz de entrada/salida entre el ser humano y una máquina; éste dispositivo captura los movimientos del usuario y devuelve como respuesta una sensación de “tocar”, en función de las consecuencias del movimiento del usuario dentro de otro entorno diferente, como puede ser un mundo virtual, o un ambiente donde el robot se encuentra controlado telepresencialmente.

El Departamento de Eléctrica y Electrónica no cuenta con un dispositivo de teleoperación háptico, de arquitectura abierta, con características similares al robot CRS A255 como una alternativa a la forma de controlar su movimiento, debido a la gran inversión que representa su adquisición y a la desaparición de la empresa CRS Robotics Corporation.

Un sistema teleoperado permite gobernar un robot esclavo ubicado en una zona remota a través del manejo de un robot maestro localizado en el punto de trabajo del operador, actualmente estos sistemas se utilizan en el campo de la medicina, exploraciones en el espacio exterior, exposición a peligro biológico, profundidades oceánicas y en toda circunstancia donde la integridad humana se vea amenazada.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Partiendo del interés mundial en el control de sistemas robóticos capaces de operar a distancia y a voluntad del ser humano en tiempo real, cabe la necesidad del Departamento de Eléctrica y Electrónica en iniciar la investigación en el campo de la teleoperación. Razón por la cual el diseño e implementación de un dispositivo háptico de dos dimensiones surge como un proyecto base necesario para permitir en un futuro cercano el desarrollo de otros proyectos dedicados a disminuir la complejidad de programación en una celda de trabajo en dos y tres dimensiones, utilizando 5 grados de libertad.

El proyecto contribuirá en el desarrollo de dispositivos hápticos capaces de interactuar con el ser humano en tiempo real e inclusive a largas distancias donde no se necesite la presencia del operador y sea el robot quien se enfrente solo al problema en cuestión.

En consecuencia, el diseño e implementación de un sistema de teleoperación háptico de dos dimensiones para el robot CRS A255, sería el punto de partida para desarrollar una alternativa apropiada en el control del movimiento del robot, esto incluye el desarrollo de un diseño mecánico versátil,

construido como un prototipo háptico capaz de comunicarse con el robot, donde el teleoperador pueda manejarlo con el movimiento de la mano.

La arquitectura cerrada del manipulador CRS A255 representa el problema principal a solucionar en este proyecto, justificando el desarrollo de un software abierto que permita la comunicación entre el dispositivo háptico y el controlador del robot, para generar movimiento en el elemento terminal del manipulador.

Generalmente un dispositivo háptico debe coincidir con las características del robot a controlar, se plantea como un proyecto inicial un prototipo de dos dimensiones por la complejidad en la construcción de un prototipo de cinco grados de libertad. Además el presente proyecto puede abrir una línea de investigación relacionada con la Teleoperación, actualmente de moda en otros países y no estudiada en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE.

### **1.3 ALCANCE DEL PROYECTO**

Se realizará el diseño y la implementación de un dispositivo háptico de dos dimensiones para manipular el robot CRS A255, lo cual permitirá el movimiento en un solo plano, utilizando el propio controlador del manipulador para el movimiento de su terminal final.

La caracterización del prototipo háptico no partirá de una investigación previa debido a la falta de información en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE, más bien estará basada en las características de los mejores modelos comerciales con el objetivo de cumplir el movimiento en un solo plano, operación versátil que no implique limitaciones en los movimientos del robot y su prototipo, estructura mecánica susceptible de fabricación y de volumen portátil, material resistente y liviano. Todo esto en función de pruebas realizadas en un software de modelamiento mecánico, donde la estructura escogida deberá cumplir con los requerimientos antes mencionados para posteriormente realizar la construcción.

Se desarrollará una interfaz de comunicación con su respectivo software de control permitiendo integrar la estructura mecánica del prototipo con el controlador del manipulador CRS A255. Finalmente se realizarán pruebas de desempeño para evaluar el sistema teleoperado de forma objetiva y eficiente.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

- ❖ Diseñar e implementar un dispositivo háptico en dos dimensiones, para manipular el robot CRS A255.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- ❖ Caracterizar las especificaciones del dispositivo háptico.
- ❖ Diseñar e implementar la estructura mecánica del prototipo háptico.
- ❖ Desarrollar el software de la interfaz de comunicación entre la estructura mecánica del prototipo háptico y el robot CRS A255.
- ❖ Integrar el sistema prototipo háptico y el manipulador CRS A255.

## **1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO**

El proyecto comprende el diseño y la implementación de un sistema de teleoperación para el manipulador robótico CRS A255 utilizando un dispositivo háptico de dos dimensiones, para alcanzar este objetivo principal es necesario subdividir al proyecto en tres etapas, a continuación se explica brevemente cada una de ellas.

La primera etapa consiste en el diseño y construcción del dispositivo háptico tomando como base características importantes de modelos comerciales, la meta es caracterizar el prototipo tanto en parámetros de constitución mecánica tales como: configuración de las articulaciones, escala con respecto al manipulador industrial, torque mínimo y área de trabajo; así como también en valores de resolución y sensibilidad de los sensores de posición angular.

La segunda etapa integra:

- a)** Adquisición de datos mediante una tarjeta DAQ para determinar el valor del ángulo de giro de cada articulación.
- b)** Software de control necesario para integrar el dispositivo háptico con el controlador C500 y a la vez presentar la interfaz al usuario.
- c)** Interfaz de comunicación entre la computadora y el controlador C500 del robot, en este caso se utiliza comunicación serial RS – 232.

En la tercera etapa se evalúa el desempeño del sistema de teleoperación implementado, mediante trazo por puntos y de curvas desde el dispositivo háptico con su respectiva comparación del trazo en el robot industrial. Finalmente el proyecto incluye en el Capítulo V la integración del dispositivo háptico y el controlador C500 detallando características importantes de funcionamiento y calibración de todos los elementos que conforman el sistema de teleoperación.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN A LOS DISPOSITIVOS HÁPTICOS**

El término **háptico** no aparece en el diccionario de la Real Academia Española y proviene del griego *háptō* que significa relativo al tacto [1]. Sin embargo algunos teóricos han extendido el significado de la palabra para hacer referencia por exclusión a todo el conjunto de sensaciones no visuales y no auditivas que experimente un individuo [2].

Si bien la implementación de estos dispositivos aumenta la cantidad de información procesada, reduce el error y el tiempo tomado para desarrollar una tarea, se deben solucionar una serie de problemas en cuanto a la falta de estímulos para el sentido del tacto [3]. La investigación háptica intenta resolver estos problemas y puede ser subdividida dentro de los siguientes campos:

- a) La **retroalimentación de fuerza** trata con dispositivos capaces de interactuar con músculos y tendones, dando al humano una sensación de estar aplicando una fuerza, por lo cual se deben considerar las proporciones y resistencia promedio de las articulaciones mecánicas [4]. Estos dispositivos principalmente consisten en robots manipuladores encargados de proporcionar una reacción de resistencia mecánica al usuario, con fuerzas correspondientes al ambiente virtual donde está el órgano terminal.



- b)** La **retroalimentación táctil** trata con dispositivos capaces de interactuar con los nervios terminales en la piel indicando la presencia de calor, presión y textura [4].
- c)** La **retroalimentación propioceptiva** permite obtener información acerca de la posición del cuerpo del operador o su postura, analizando información sobre el funcionamiento armónico de músculos, tendones y articulaciones [5].

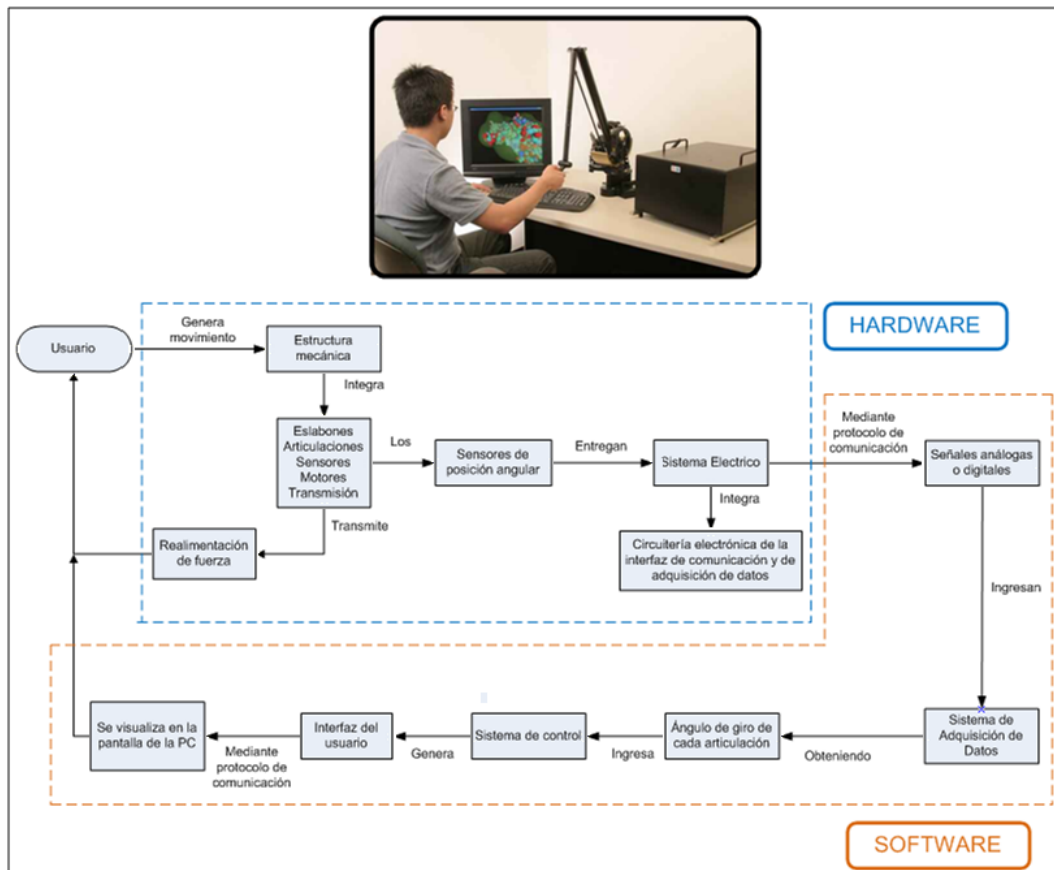
### 2.1.1 Sistemas Constitutivos

Un dispositivo háptico es un sistema robótico constituido de hardware y software independientemente del sistema que se le aplique (Figura 2.1). El software permite la comunicación entre el dispositivo y la computadora, su complejidad dependerá de los grados de libertad y tamaño del dispositivo, así como también del protocolo de comunicación y del tipo de interfaz para el usuario.

El hardware de un dispositivo háptico se subdivide en las siguientes áreas de estudio:

- a)** Estructura mecánica: Un dispositivo háptico es muy semejante a un manipulador robótico en cuanto a su estructura, consta de una cadena de eslabones consecutiva e independiente entre sí formando en cada articulación un **grado de libertad** (GDL). Se pueden encontrar motores en la estructura cuando el tamaño del prototipo es demasiado grande y pesado para la comodidad del usuario o simplemente se colocan sensores para medir el ángulo de giro y es la configuración de la propia estructura mecánica la encargada de oponerse al movimiento del operador. Puede tener desde tres hasta seis GDL dependiendo de la aplicación.



- b)** Sistema eléctrico: Este sistema consta de dos partes, la primera es la interfaz de comunicación, ésta permite conectar el dispositivo háptico al computador utilizando comunicación paralela, serial RS-232 e incluso USB “plug and play”. La segunda parte está constituida por los sensores encargados de medir el movimiento angular de las articulaciones, junto con la circuitería electrónica de adquisición de datos y tratamiento de las señales. Pueden ser potenciómetros como sensores analógicos y codificadores como sensores digitales. En el caso de existir motores, el sistema eléctrico incluye la correspondiente etapa de potencia y el sistema de reducción de velocidad.





**Figura. 2.1. Sistemas constitutivos de un dispositivo háptico**

Tomando como ejemplo la empresa SensAble Technologies en las líneas Phantom y Premium a continuación se analizan características estructurales, de sensamiento y de funcionamiento importantes para la implementación de éste proyecto.

Se indica a continuación en la Tabla 2.1 la línea Phantom y en la Tabla 2.2 la línea Premium.

<b>Modelo</b>	<b><i>The Phantom Desktop Device</i></b>	<b><i>The Phantom Omni Device</i></b>
<b>Figura</b>		
<b>Área de trabajo con realimentación de fuerza</b>	> 160 ancho x120 alto x 120 diámetro mm	> 160 ancho x120 alto x 70 diámetro mm
<b>Peso (solo el dispositivo)</b>	6 lb	3lb
<b>Resolución nominal de posición</b>	~0.023 mm	~0.055 mm
<b>Sensamiento de Posición (x,y,z)</b>	Codificadores digitales	Codificadores digitales
<b>Sensamiento de Posición (yaw, pitch, roll)</b>	Potenciómetros lineales $\pm 3\%$	Potenciómetros lineales $\pm 5\%$

**Tabla. 2.1 Características de la línea Phantom**

<b>Modelo</b>	<b>Premium 1.0</b>	<b>Premium 1.5</b>	<b>Premium 1.5 High Force</b>
<b>Figura</b>			
<b>Área de trabajo</b>	254 ancho x 178 alto x 127 diámetro mm	381 ancho x 267 alto x 191 diámetro mm	
<b>Resolución nominal de posición</b>	0.03 mm	0.03 mm	0.007 mm
<b>Realimentación de fuerza</b>	x, y, z	x, y, z	
<b>Sensamiento de Posición</b>	x, y, z (opcional yaw, pitch, roll)	x, y, z (opcional yaw, pitch, roll)	

**Tabla. 2.2 Características de la línea Premium**

Observando las Tablas 2.1 y 2.2 se puede llegar a las siguientes conclusiones necesarias para el diseño e implementación del dispositivo háptico:

- a)** El dispositivo háptico no contará con un parámetro definido de sensibilidad hasta que se haya determinado el sistema donde se vaya a aplicar.
- b)** La resolución del dispositivo es un valor nominal y global, es decir no se indica valor para cada sensor, más bien se entrega un valor conjunto final de todos los dispositivos de sensamiento presentes en la estructura mecánica.

- c) La retroalimentación de fuerza se aplica en todos los GDL y en toda el área de trabajo del dispositivo háptico.
- d) La configuración de todos los dispositivos industriales analizados es antropomórfica, a diferencia de ello en éste proyecto se deben alcanzar dos GDL observando dos posibilidades de configuración: SCARA o antropomórfica dependiendo del área de trabajo que se desee alcanzar.

Independientemente del diseño elegido para el prototipo se deben considerar las siguientes características de adecuación para el uso, aplicadas en este proyecto.

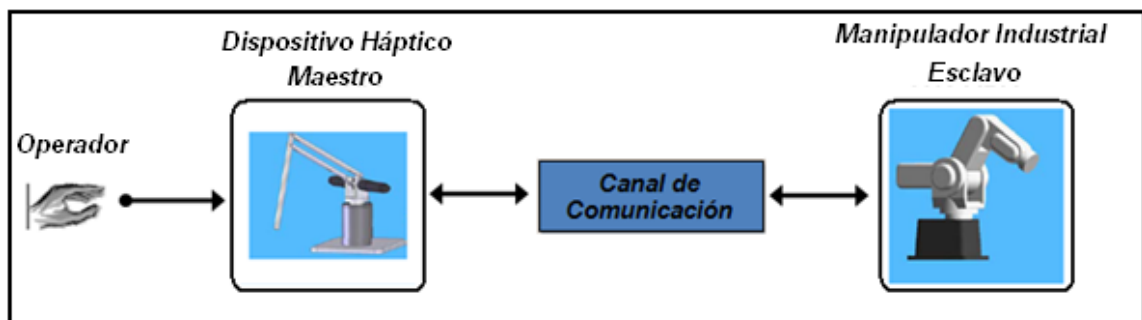
- a) **Fiabilidad:** La estructura del dispositivo háptico debe ser liviana, resistente, portátil y de fácil mantenimiento.
- b) **Coste:** Se debe llegar a un acuerdo entre costo y funcionalidad del dispositivo, eligiendo siempre el sensor de posición más adecuado a nuestras necesidades de medición.
- c) **Seguridad:** El dispositivo debe ser seguro y no debe representar ningún peligro para el operador.

### **2.1.2 Aplicaciones de los Dispositivos Hápticos**

Los dispositivos hápticos se utilizan como interfaz entre el sentido humano del tacto y un mundo generado por computadora, para permitir al usuario tocar, sentir o manipular objetos simulados en entornos virtuales y sistemas de **teleoperación**.

Los entornos virtuales se clasifican de acuerdo al nivel de interacción con el usuario y a la complejidad de las instalaciones que soporta el sistema, pueden ser realidad virtual de: escritorio, en segunda persona, telepresencia y por último inmersión.

Los sistemas de teleoperación que incluyen un dispositivo háptico, generalmente son del tipo maestro – esclavo y están conformados por los elementos de la Figura 2.2, donde el operador es quien cierra visualmente el lazo de control en el movimiento del robot esclavo y el dispositivo háptico es la interfaz entre el operador y el computador, el cual envía los comandos al controlador del manipulador industrial. Finalmente el robot esclavo seguirá los movimientos del dispositivo háptico maestro en tiempo real.



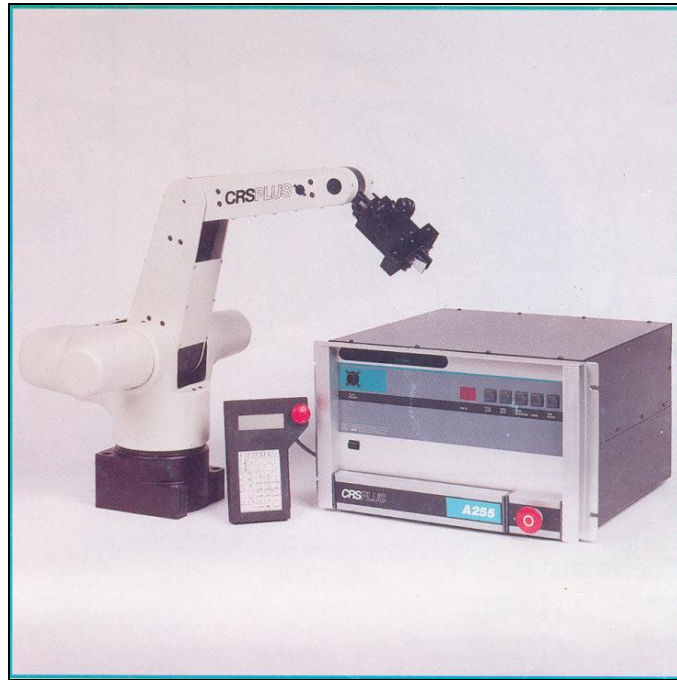
*Figura. 2.2. Elementos de un sistema de teleoperación maestro - esclavo*

## **2.2 DESCRIPCIÓN DEL MANIPULADOR CRS A255 [7]**

### **2.2.1 Introducción**

El manipulador CRS A255 forma parte de un sistema robótico que trabaja de manera integral (Figura 2.3). Consta de un manipulador robótico (A255), un controlador electrónico C500, un dispositivo para operación manual (Teach Pendant) y una herramienta de fin de brazo (Gripper).

La hoja técnica básica del sistema robótico CRS A255 se encuentra en el Anexo 2.



**Figura. 2.3. Sistema robótico CRS A255**

El movimiento del manipulador robótico se lleva a cabo por medio de servo motores, éstos trabajan en conjunto con cajas reductoras, rodamientos, tornillos sin fin, acopladores armónicos y codificadores ópticos. Cada articulación posee un grado de desplazamiento angular distinto e independiente, la herramienta final es intercambiable y puede acoplarse según la tarea que vaya a desempeñar y las necesidades del tipo de objeto manipulado en la operación.

Para el control de operaciones del robot el sistema cuenta con su propio dispositivo, el controlador C500, el cual se encarga de procesar las señales y permite el tráfico de datos entre el brazo robótico y el bloque de software. Puede ser operado de dos modos: Automático, modo en el cual el Robot responde a las instrucciones programadas desde un computador y Manual, el robot responde a la manipulación del Teach Pendant. El lenguaje de comunicación es RAPL-II (lenguaje de alto nivel) y el software de programación es ROBCOMM.

### 2.2.2 Manipulador Robótico

El manipulador robótico CRS A255 es un sistema mecánico de cinco GDL (Figura 2.4), su estructura se fundamenta en el cuerpo humano. El movimiento integra un control en lazo cerrado gobernado por el accionamiento de los servo - motores, estos se encuentran acoplados a las articulaciones del brazo por medio de cadenas, engranajes y poleas, su posición se conoce a partir de encoders ópticos encargados de proporcionar una señal exacta de la ubicación del brazo.

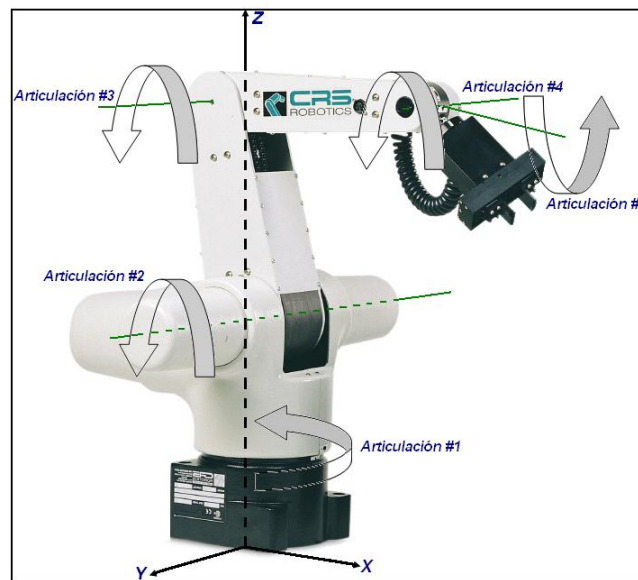
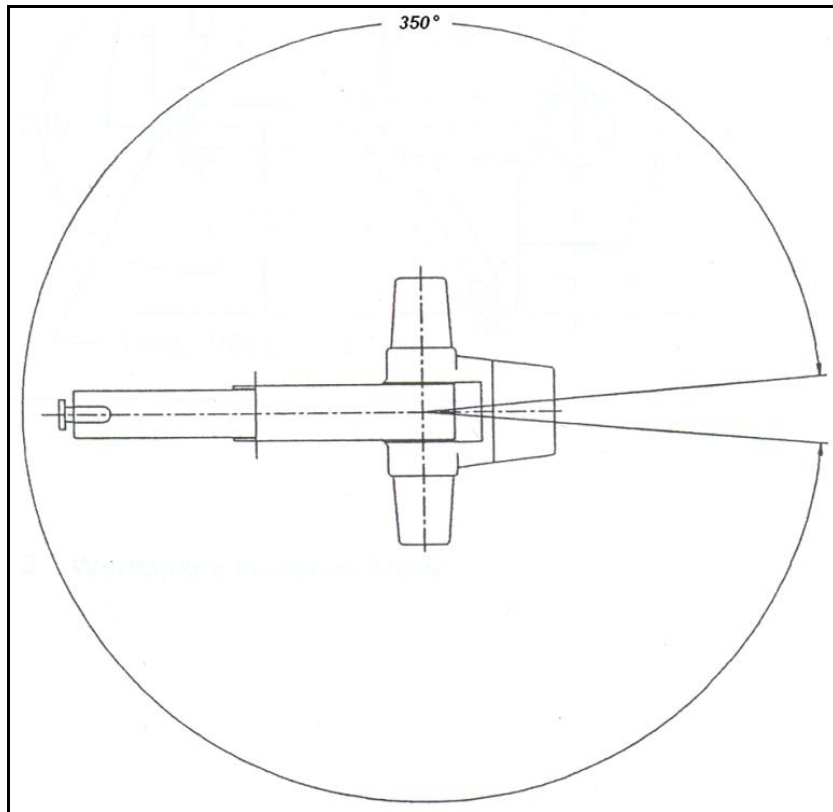


Figura. 2.4. Articulaciones del manipulador CRS - A255

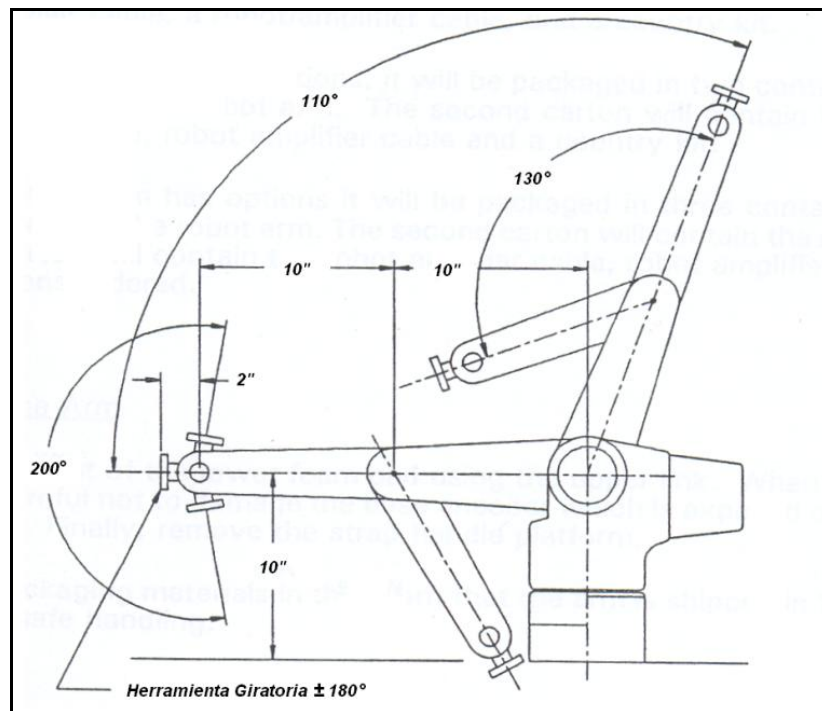
#### 2.2.2.1 Espacio de Trabajo

Esta dado en función de su alcance y su desplazamiento radial y vertical, teniendo en cuenta estos parámetros el área de trabajo radial es de  $0.75 \text{ m}^2$  y el área de trabajo vertical es de  $0.38 \text{ m}^2$ . El manipulador robótico puede desplazarse hasta  $350^\circ$  en forma radial como se muestra en la Figura 2.5 y en forma vertical el brazo puede tener un desplazamiento de hasta  $150^\circ$  aproximadamente, el cual está descrito en la Figura 2.6.





**Figura. 2.5. Espacio de trabajo radial**

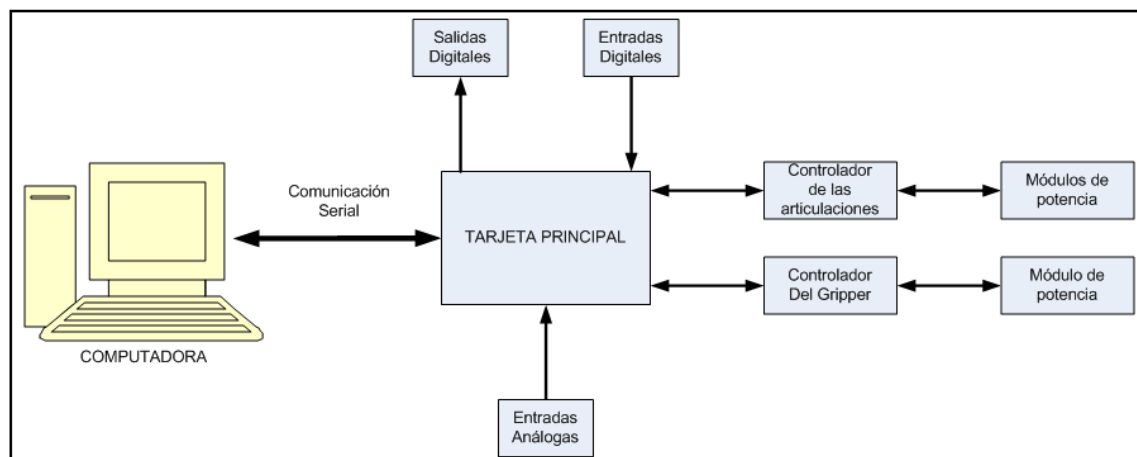


**Figura. 2.6. Espacio de trabajo vertical**

### 2.2.3 Controlador Robótico C500

El controlador robótico C500 permite la comunicación entre el manipulador y el software de control, éste último acciona los cinco grados de libertad además del gripper según la necesidad de fuerza utilizando diferentes etapas de potencia, además permite la comunicación con las plataformas de procesamiento de alto nivel y los puertos de entrada / salida.

En la Figura 2.7 se describe la operación del controlador C500 del manipulador robótico en función de los datos intercambiados con el computador.



**Figura. 2.7. Tráfico de datos del controlador robótico C500**

### 2.2.4 Puerto de Comunicación

El manipulador robótico CRS A255 utiliza comunicación tipo ACI estructurada en bloques para todas las transferencias de datos, está basada en el protocolo RS-232/422/485, su característica principal consiste en permitir computadores externos en la comunicación incluso uno o más sistemas robóticos en un enlace simple RS232 o RS422.

La comunicación ACI permite transferir la memoria del robot al computador o a su vez descargar los datos desde la computadora hacia la memoria del robot, para este efecto es necesaria la existencia de por lo menos un dispositivo maestro capaz de utilizar la técnica de segmentación estándar del 8086. Generalmente los controladores de los robots se configuran como esclavos y será un computador externo definido como maestro, siendo éste el único encargado de iniciar la comunicación

### **2.2.5 Lenguaje de Programación RAPL-II**

La familia de robots industriales CRS Plus utiliza un lenguaje propietario de CRS Robotics denominado RAPL-II, cuyas siglas en inglés significan “Robotic Automation Programming Language - II”. Es un lenguaje orientado a la automatización, con líneas de comandos estructuradas para facilitar el diseño de los sistemas de aplicación.

Debido a la operación del controlador C500 con tres entornos diferentes de interfaz para el usuario: panel frontal, teach pendant y el canal de comunicación interactiva, existen tres niveles de control disponibles para el uso de los comandos en el RAPL-II, a continuación se describe cada uno de ellos:

- a) {I} Inmediato:** Este modo le permite al usuario ingresar comandos capaces de ser ejecutados por completo en la línea de ingreso. Dentro de este modo y usando el RAPL-II se encuentra habilitado el constructor de sintaxis.
  
- b) {M} Manual:** En este modo se le permite al usuario variar la posición del robot utilizando el teach pendant o ingresando un comando por teclado. Existen cuatro formas de manipular el robot en el modo Manual: por articulación, de forma global, por herramienta y de forma cilíndrica

- c) {P} Programa: Este modo le permite al usuario ejecutar programas almacenados en la memoria del controlador. En el momento de la ejecución de la rutina de trabajo, RAPL-II utiliza un compilador encargado de detener la ejecución del programa si se detecta un error.

### **2.2.6 Software de Programación ROBCOMM**

El software ROBCOMM le permite valerse al usuario de todas las características y facilidades descritas en el RAPL-II en el momento de programar una rutina de trabajo utilizando el manipulador robótico CRS A255. Para este efecto se utilizan comandos de configuración, tarea y descripción, en el Anexo 1 se detallan los más importantes.

## **2.3 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN**

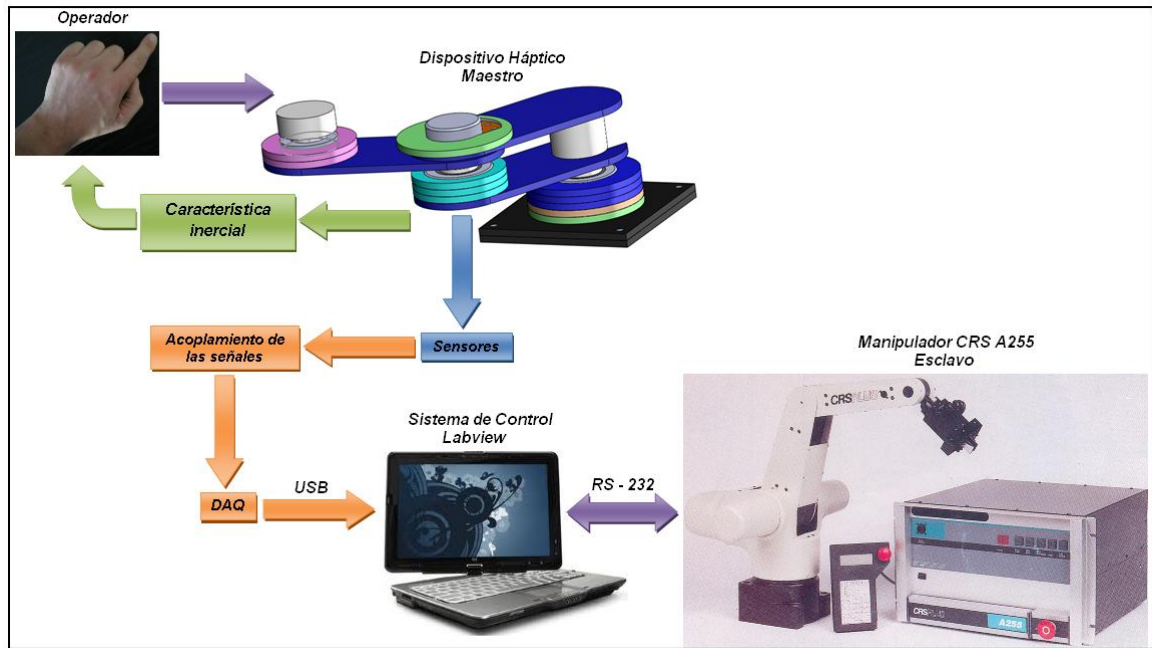
El sistema robótico CRS A255 utiliza como protocolo de comunicación el estándar RS – 232, en él se definen características eléctricas, mecánicas, funcionales de la interfaz y modos de conexión comunes. Las características eléctricas incluyen parámetros tales como niveles de voltaje e impedancia del cable, la sección mecánica describe los pines y la descripción funcional define las funciones de las señales eléctricas utilizadas.

Siendo éste un protocolo conocido, la conexión entre el computador y el controlador del manipulador constará únicamente de una interfaz USB – Serial conectada al puerto de comunicación ubicado en el panel frontal del controlador C500. Cada uno de estos dos elementos deberán tener igual configuración en: velocidad de comunicación, paridad, número de bits de datos, número de bits de parada y control de flujo.

## **2.4 APLICACIÓN**

El sistema de teleoperación a implementarse en este proyecto, consta de los siguientes elementos (Figura 2.8):

- a)** Operador: Es la persona encargada de manipular el prototipo háptico cerrando el lazo de control de forma visual.
  
- b)** Dispositivo Háptico: Constituye la interfaz entre el usuario y el robot CRS A255.
  
- c)** Interfaz de comunicación: Consta de software y hardware. El software está programado en Labview y constituye el sistema de control del dispositivo háptico, procesa los datos de ángulo de giro provenientes de los sensores ubicados en cada articulación utilizando una tarjeta de adquisición de datos, los convierte a coordenadas rectangulares para finalmente incluirlos en un comando de movimiento capaz de ser interpretado por el controlador del robot esclavo, para éste efecto se utiliza comunicación serial. El hardware es la circuitería electrónica necesaria para la adquisición de datos y el cable de la interfaz USB – serial necesario para conectar la computadora con el controlador del manipulador CRS A255.
  
- d)** Manipulador CRS A255: Es el robot esclavo quién obedece a los movimientos del dispositivo háptico generados por el usuario.



**Figura. 2.8. Elementos del sistema de teleoperación a implementarse**

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO DEL PROTOTIPO HÁPTICO**

#### **3.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA**

Generalmente los dispositivos hápticos comerciales destinados a la teleoperación de un manipulador industrial, cuentan con las mismas características del robot esclavo en cuanto al número y tipos de articulaciones, la diferencia se establece en el tamaño del robot maestro, usualmente construido a escala del manipulador industrial.

Por tratarse en éste caso de un prototipo háptico de dos dimensiones se realizará el análisis de los siguientes parámetros importantes:

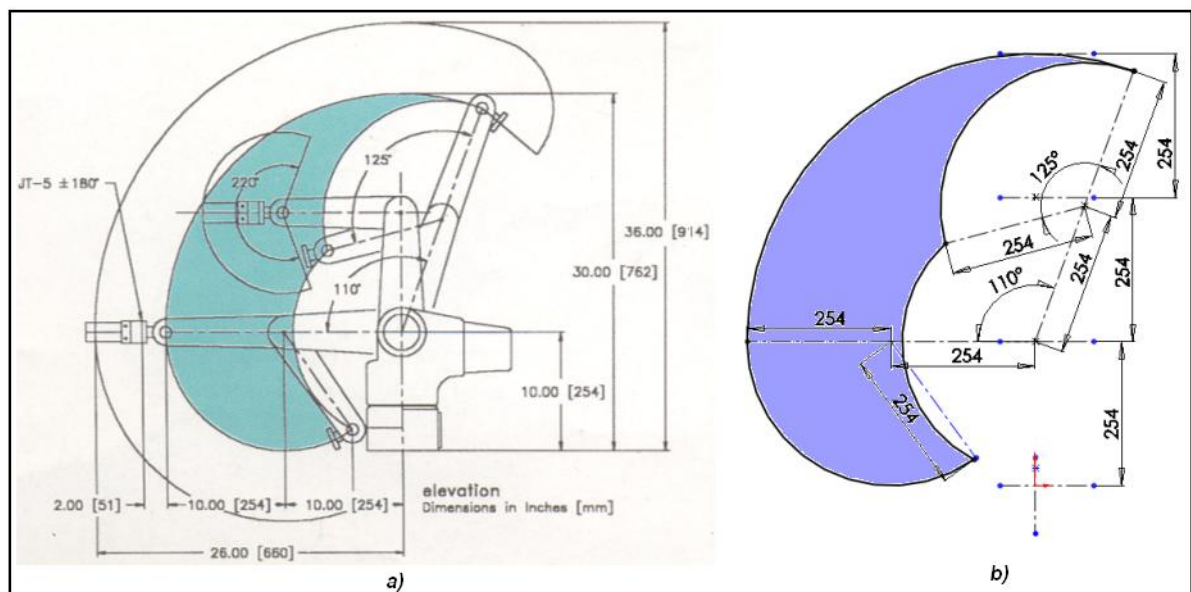
- a)** Área de trabajo, para determinar la configuración de las articulaciones.
- b)** Resolución y sensibilidad del sistema, eligiendo el sensor más adecuado para medir el ángulo de giro.
- c)** Escala de construcción, capaz de brindar facilidades de montaje y mantenimiento.
- d)** Característica de inercia de la estructura mecánica, necesaria para alcanzar un retardo aceptable entre el movimiento del dispositivo maestro y el esclavo.

### 3.1.1 Análisis del Área de Trabajo

Dentro del volumen de trabajo del manipulador industrial especificado por el fabricante, se describen dos áreas de trabajo en planos vertical y horizontal.

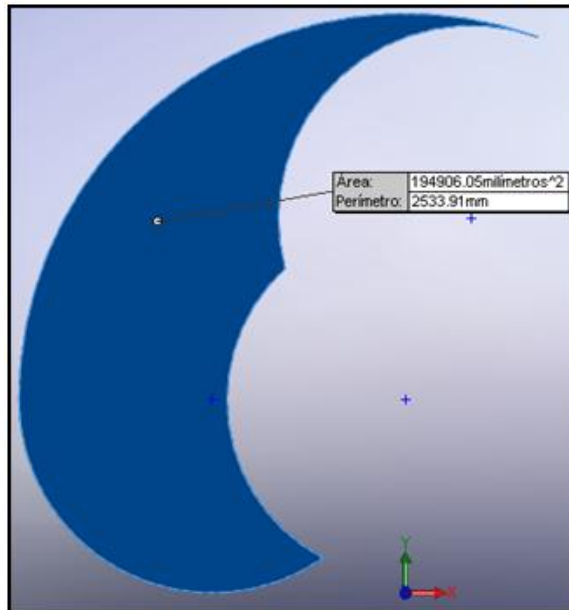
Para escoger el área de trabajo del prototipo háptico se determinará el área máxima alcanzada por el manipulador industrial en un solo plano, para ello se desarrolla a continuación el cálculo de las áreas usando el software de modelamiento mecánico “SolidWorks” y su respectiva comparación.

En el caso del área vertical máxima se traza el diagrama de la Figura 3.1 b de acuerdo al espacio de trabajo vertical descrito por el fabricante (Figura 3.1 a).



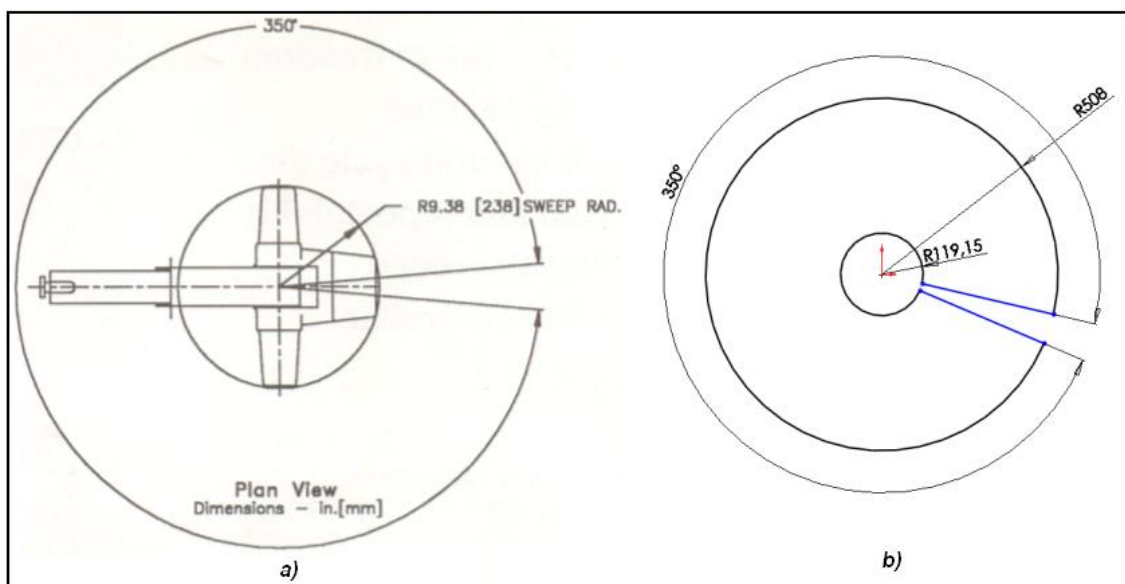
**Figura. 3.1. a) Espacio de trabajo vertical descrito por el fabricante. b) Diagrama del área vertical máxima**



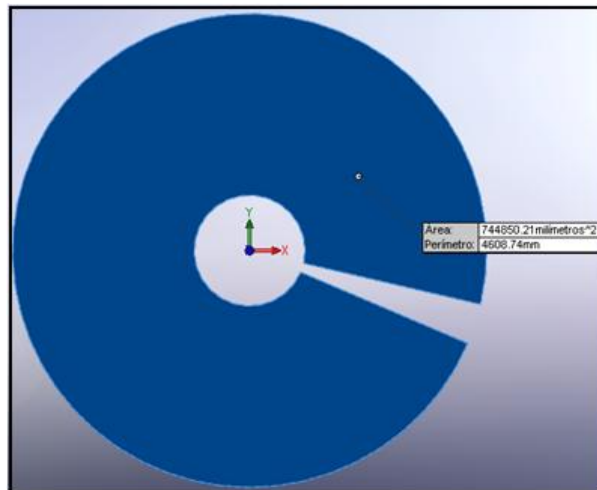


**Figura. 3.2. Perímetro y área de la superficie vertical máxima de trabajo**

Se obtiene el área de la superficie vertical máxima de trabajo igual a  $0.19\text{m}^2$ , tal como indica la Figura 3.2. De igual forma se obtiene el valor de la superficie horizontal, en este caso es variable porque depende de la altura en el eje z. Como referencia se indica el cálculo de la superficie horizontal máxima (Figura 3.3), donde se obtiene el perímetro y área mostrada en la Figura 3.4.



**Figura. 3.3. a) Espacio de trabajo horizontal descrito por el fabricante. b) Diagrama del área horizontal máxima**



**Figura. 3.4. Perímetro y área de la superficie horizontal máxima de trabajo**

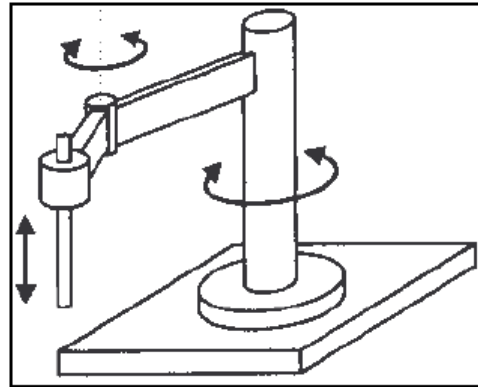
En la Tabla 3.1 se indican los valores de superficie de trabajo horizontal calculados según el proceso anteriormente desarrollado.

<b>Superficie de trabajo horizontal</b>	
Altura del punto final en el eje z (m)	Valor de la superficie (m <sup>2</sup> )
0.25	0.75
0.28	0.74
0.31	0.73
0.33	0.72
0.36	0.71
0.38	0.68
0.41	0.65
0.43	0.61
0.46	0.58
0.48	0.54
0.51	0.51

**Tabla. 3.1. Superficie del área de trabajo horizontal de acuerdo a la altura en z**

Cuando la altura del punto final del segundo eslabón es de 0.25m se alcanza el valor máximo de área correspondiente a 0.75m<sup>2</sup>, por lo tanto, el prototipo háptico deberá desplazarse en el plano horizontal igual o menor al correspondiente en la Figura 3.4 de acuerdo a las limitaciones mecánicas en el diseño del prototipo.

En función de los resultados obtenidos en el plano de trabajo y el área máxima se considera ideal la configuración de las dos primeras articulaciones de un robot SCARA (Figura 3.5) para la implementación del prototipo háptico en éste proyecto, esta configuración cubre mecánicamente el área horizontal definida y a la vez evita problemas de frenado debido a la gravedad.



**Figura. 3.5. Robot SCARA [6]**

### 3.1.2 Resolución y Sensibilidad del Sistema

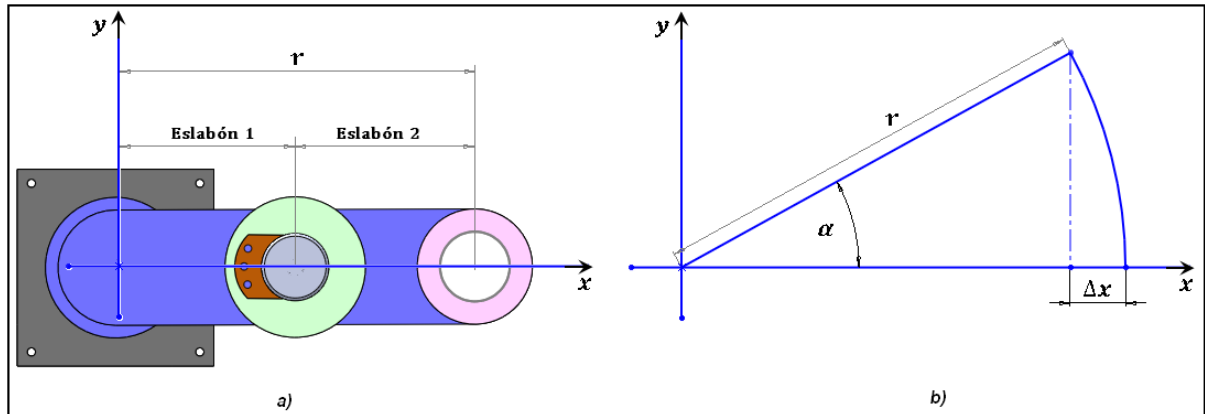
La definición de la **resolución** del sistema está directamente relacionada con la resolución del sensor a utilizar, es necesario imponerse en primer lugar el valor mínimo de **sensibilidad**, en éste caso será de 1mm. Luego se determina el valor del ángulo mínimo que el sensor debe alcanzar a detectar variando la longitud del eslabón, para este efecto se desarrolla el siguiente procedimiento:

- a) Como se definió en el ítem 3.1.1 la estructura mecánica del prototipo tendrá la configuración de las dos primeras articulaciones de un robot SCARA, cuya vista aérea se indica en la Figura 3.6 a. Si ubicamos el esquema en un plano cartesiano donde:  $r$  es la longitud del eslabón,  $\alpha$  el ángulo de giro y  $\Delta x$  la sensibilidad mínima (Figura 3.6 b), obtenemos la Ecuación 3.1 de donde se puede despejar el ángulo  $\alpha$  tal como indica la Ecuación 3.2.

$$r - r \cdot \cos(\alpha) = \Delta x$$

$$r(1 - \cos(\alpha)) = \Delta x \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(1 - \frac{\Delta x}{r}\right) \quad \text{Ecuación 3.2}$$



**Figura. 3.6. a) Vista aérea de la configuración de las articulaciones del prototipo háptico.**

**b) Esquema en el plano cartesiano XY.**

- b)** Utilizando la Ecuación 3.2 y dando valores para  $r$ , se obtiene la Tabla 3.2.

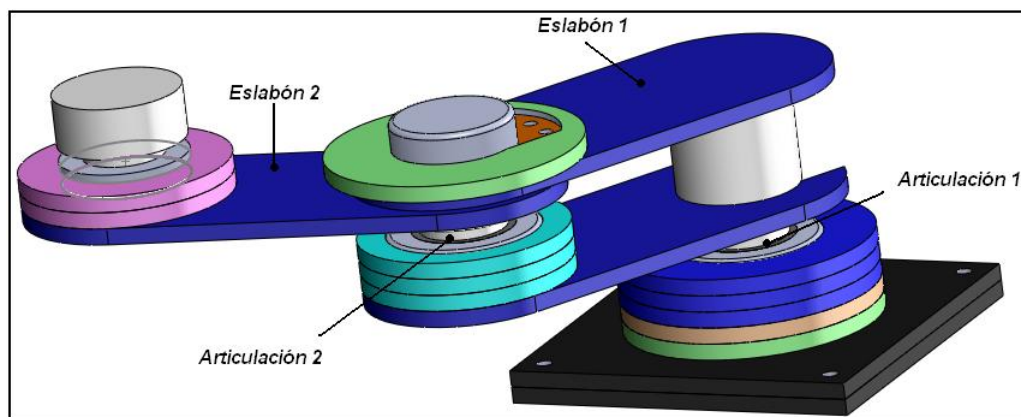
$\alpha = \cos^{-1}\left(1 - \frac{\Delta x[0.001 (m)]}{r (m)}\right)$	
Longitud del eslabón $r (m)$	Ángulo de giro $\alpha (grados)$
0.06	10.14
0.08	8.79
0.13	7.19
0.25	5.08

**Tabla. 3.2. Ángulo de giro dependiendo de la longitud del eslabón**

De los resultados obtenidos en la Tabla 3.2 se concluye lo siguiente: mientras la longitud del eslabón es mayor, el ángulo de giro a detectar por el sensor debe ser menor, en consecuencia para el análisis de la escala definitiva del prototipo los dos eslabones deberán estar colineales.

### 3.1.3 Análisis de la escala

A partir del análisis de la sensibilidad del sistema se ha diseñado un Prototipo Uno como base para la solución de problemas mecánicos y estructurales en el diseño del prototipo final. La escala de construcción es de 1:4 es decir, si el radio máximo del área horizontal del manipulador industrial es de 0.51m, la longitud del radio del Prototipo Uno será de 0.13m. La estructura mecánica se ha diseñado en Solidworks como indica la Figura 3.7.

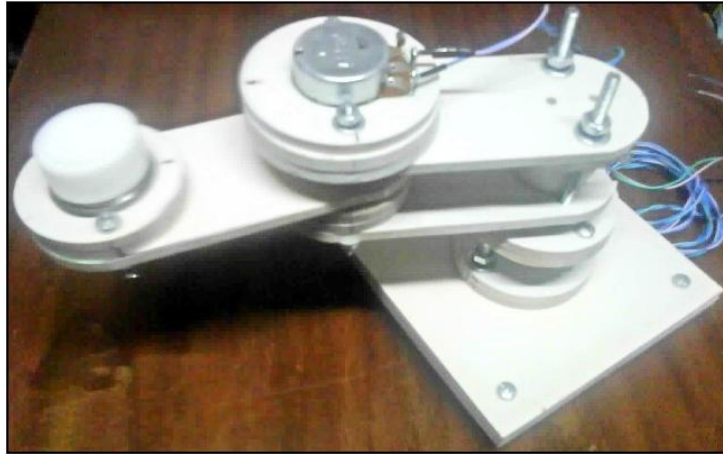


**Figura. 3.7. Diseño del Prototipo Uno en SolidWorks**

Con la finalidad de verificar las bondades y defectos del Prototipo Uno se ha implementado la estructura de la Figura 3.7 utilizando:

- ❖ Plástico PVC de 4mm para la base y los eslabones.
- ❖ Ejes de nylon en cada articulación para sujetar el potenciómetro lineal al rodamiento y a la vez evitar el peso de la estructura sobre el eje del sensor.
- ❖ Un soporte para el dedo fabricado en nylon en el final del segundo eslabón y,
- ❖ Potenciómetros lineales para medir el ángulo de giro. El modelo terminado se indica en la Figura 3.8.

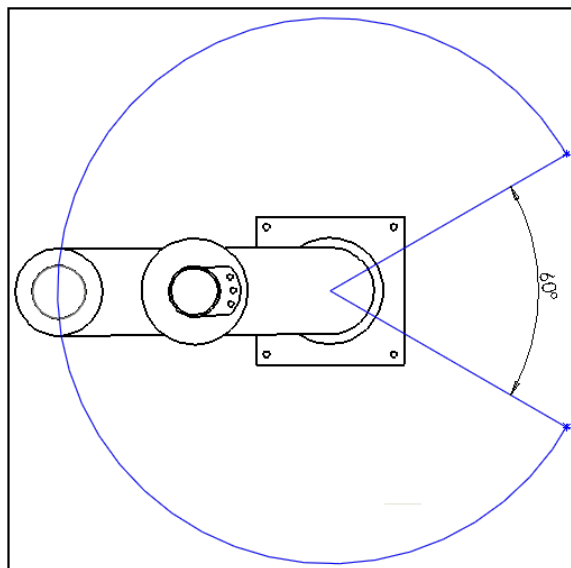
Las características físicas de los materiales utilizados para la fabricación: plástico PVC y nylon se encuentran en el Anexo 3.



**Figura. 3.8. Modelo terminado – Prototipo Uno**

De este diseño hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- a)** Debido a la constitución mecánica del sensor no es posible alcanzar los  $350^\circ$  en el área radial tal como indica la hoja técnica del fabricante del manipulador industrial (Anexo 2), solamente se logran  $300^\circ$ . (Figura 3.9)



**Figura. 3.9. Alcance radial del Prototipo Uno**

- b)** La escala escogida para el Prototipo Uno no posee el espacio necesario para añadir sensores extras o colocar algún mecanismo de frenado, razón por la cual se utilizará una escala 1:2 en el prototipo final.
- c)** A pesar de ser necesario un solo dedo para generar movimiento en el Prototipo Uno, después de cierto tiempo de uso resulta incómodo para el usuario sujetar el elemento terminal a esa altura. En consecuencia para el Prototipo Final se utilizará un soporte tipo “palanca” donde el operador utilice varios dedos o toda la mano en lugar de un solo dedo para generar movimiento y la estructura se diseñará tratando de alcanzar la menor altura posible desde la mesa de trabajo.
- d)** El Prototipo Uno no le brinda al usuario suficiente oposición al movimiento porque solamente existe fricción en el rodamiento y torque en el eje del sensor. Para mejorar esta característica en el Prototipo Final se utilizará un tren de engranes en cada articulación. Este mecanismo amplifica el torque opuesto al movimiento del usuario, disminuye la velocidad y aumenta los giros en el eje del sensor, razón por la cual se utilizará un potenciómetro lineal capaz de alcanzar el mismo valor de resistencia en más de una revolución.

#### **3.1.4 Característica inercial de la estructura mecánica**

La oposición al movimiento proporcionada por el dispositivo háptico al usuario está dividida en dos partes, la primera es el torque del tren de engranes de cada articulación y la segunda es el momento de inercia de la estructura mecánica.

Para el análisis de los trenes de engranes y en base a experimentos realizados con el Prototipo Uno se llegó a la conclusión de tener mayor torque en la articulación uno en relación a la articulación dos, de ésta forma se independiza la rotación de cada eslabón sobre su respectivo eje y a la vez permite el movimiento cuando los dos eslabones se encuentran colineales.

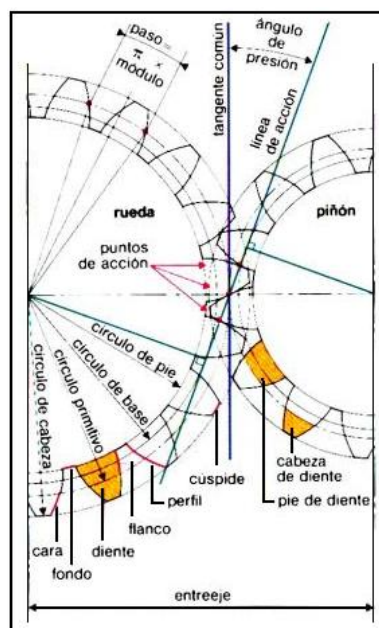
Antes de iniciar el cálculo del torque en los trenes de engranajes se requiere conocer el número de dientes y el diámetro exterior de un engrane para calcular su respectivo módulo, ésta última característica será igual para todos los componentes utilizados y su valor se obtiene de acuerdo a la Ecuación 3.3, donde:  $m$  es el módulo,  $d_e$  es el diámetro exterior y  $z$  el número de dientes

$$m = \frac{d_e}{z+2} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$m = \frac{72 \text{ (mm)}}{70+2}$$

$$m = 1 \text{ (mm)}$$

Los parámetros antes mencionados y otros característicos de un tren de engranes se muestran en la Figura 3.10.



**Figura 3.10. Parámetros característicos de un tren de engranes**



### 3.1.4.1 Tren de engranes de la articulación uno

Para la articulación uno se utilizaron cuatro engranes (N1, N2, N3 y N4), dos de ellos independientes y dos montados en el mismo eje (Figura 3.11). Para el cálculo se tiene como datos: longitud del eslabón uno igual a 137 mm y torque de operación del potenciómetro lineal (Vishay 534) de 9.9 N/mm de acuerdo a la hoja del fabricante (Anexo 4).

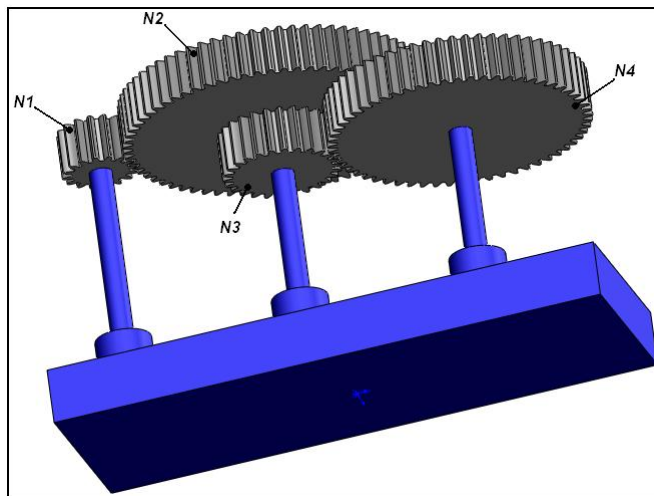


Figura. 3.11. Tren de engranes de la articulación uno

De acuerdo a los datos antes mencionados, se obtuvo un valor de 0.78N/mm para vencer la inercia del tren de engranes, los cálculos se indican en la Tabla 3.3.

<b>PRIMERA ARTICULACIÓN</b>				
Engrane	<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>N3</b>	<b>N4</b>
Dientes	15	70	26	60
Diámetro de paso (mm)	15	70	26	60
Relación de transmisión	4.67		2.31	
Relación total	10.77			
Revoluciones	10	2.14	2.14	0.93
Fuerza (N)	1.32	1.32	3.56	3.56
Torque para vencer tren de engranes (N/mm)	<b>0.78</b>			

Tabla. 3.3. Cálculo del torque mínimo para la articulación uno

### 3.1.4.2 Tren de engranes de la articulación dos

En la articulación dos se utilizaron los engranes N1 y N2 con ejes independientes entre sí (Figura 3.12). Los datos de longitud de eslabón y torque del potenciómetro son iguales para el tren de engranes de ambas articulaciones. Se obtuvo un valor de torque mínimo de 0.47N/mm, los cálculos se indican en la Tabla 3.4.

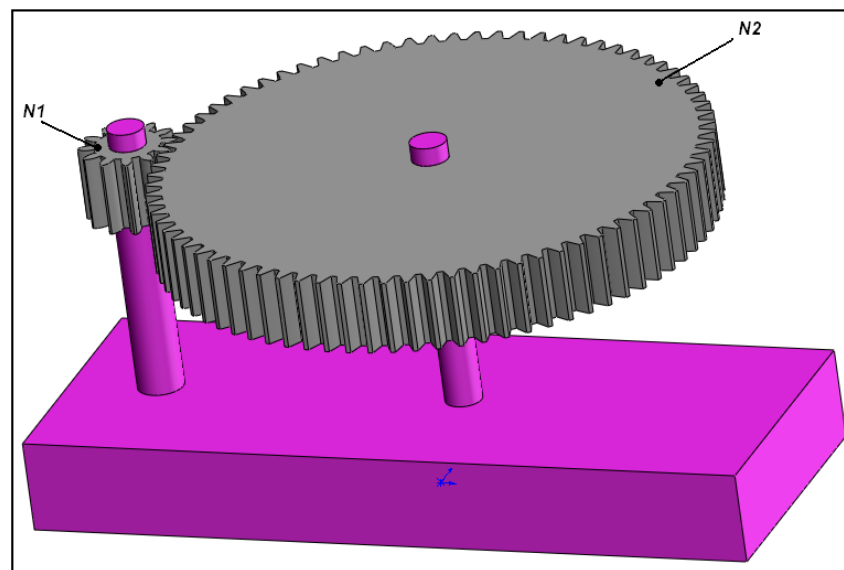


Figura. 3.12. Tren de engranes de la articulación dos

<b>SEGUNDA ARTICULACION</b>		
Engranaje	<b>N1</b>	<b>N2</b>
Dientes	12	78
Diámetro de paso (mm)	12	78
Relación de transmisión	6.50	
Revoluciones	6.50	1
Fuerza (N)	1.65	1.65
Torque para vencer tren de engranes (N/mm)	<b>0.47</b>	

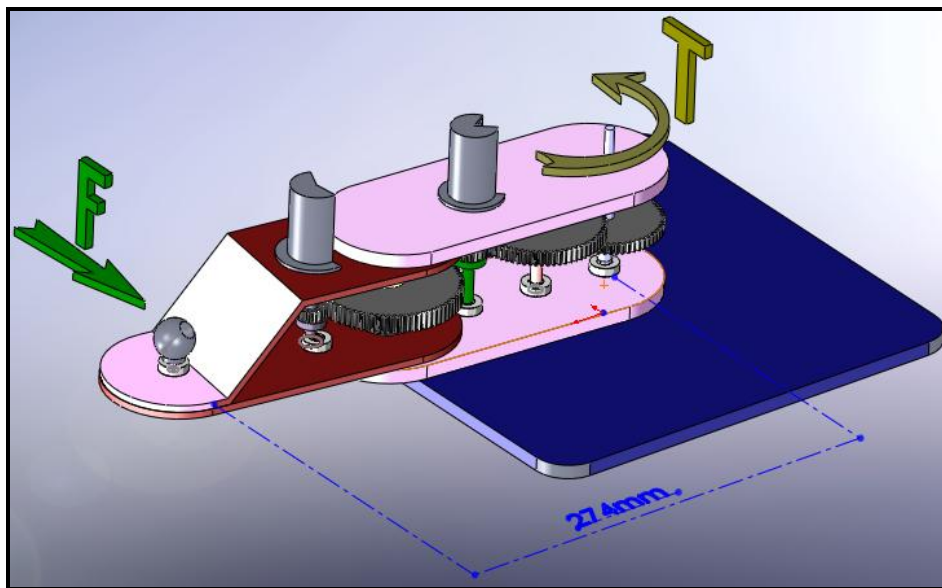
Tabla. 3.4. Cálculo del torque mínimo para la articulación dos

### 3.1.4.3 Momento de inercia de la estructura mecánica

El valor de fuerza mínima necesaria para generar movimiento en la estructura mecánica se obtiene de la Ecuación 3.4, donde:  $F$  es la fuerza mínima,  $r$  la longitud del radio de giro,  $I$  el momento de inercia respecto al eje de rotación y  $\alpha$  la aceleración angular.

$$\begin{aligned}\sum M &= 0 \\ Fr - I\alpha &= 0\end{aligned}\quad \text{Ecuación 3.4}$$

La longitud del radio de giro corresponde a la medida tomada desde el eje de la primera articulación hasta el final del segundo eslabón, tiene un valor de 274 mm tal como indica la Figura 3.13.



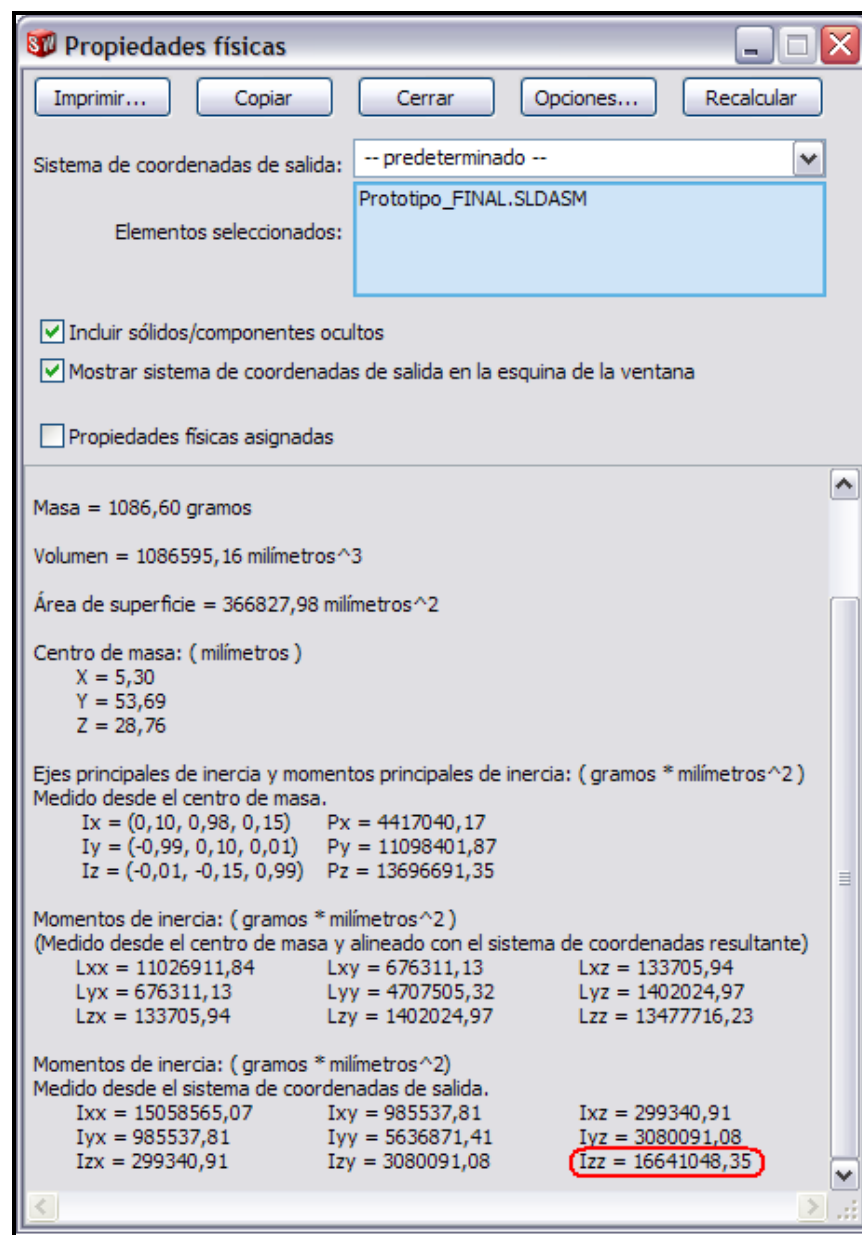
**Figura. 3.13.** Fuerzas incidentes sobre el Prototipo Final

La aceleración angular se calcula a partir de la velocidad lineal indicada en la hoja técnica del fabricante del manipulador industrial (Anexo 2), porque en éste proyecto no se modifican los valores de velocidad y aceleración del movimiento del robot. Para empezar se calcula la velocidad angular utilizando la Ecuación 3.5 y a continuación obtenemos la aceleración angular tal como indica la Ecuación 3.6, el valor del tiempo  $t$  se obtuvo de forma experimental.

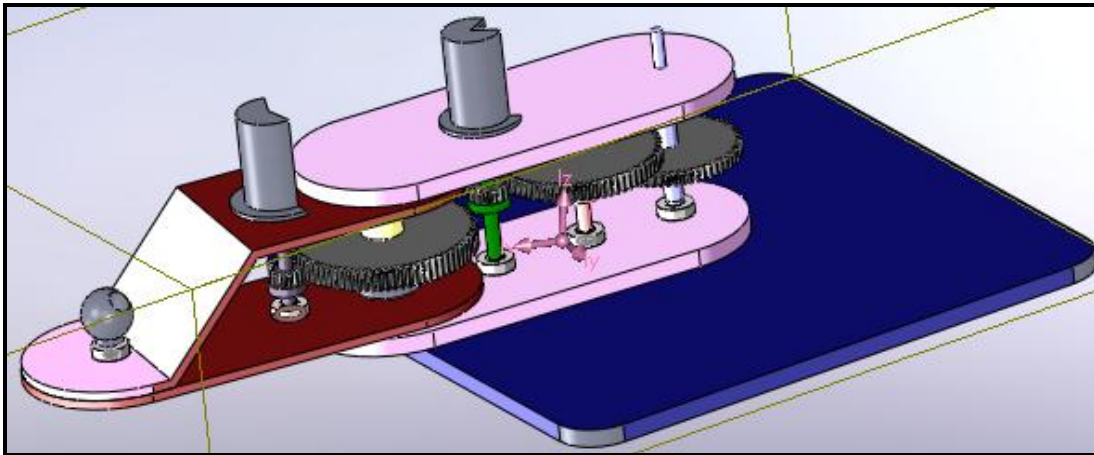
$$V_a = \frac{V_i}{r} = \frac{(0,46 \frac{m}{s}) \cdot 0,2}{0,51 \text{ m}} = 0,18 \text{ rad/s} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$\alpha = \frac{V_a}{t} = \frac{0,18 \text{ rad/s}}{2 \text{ s}} = 0,09 \text{ rad/s}^2 \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Por último, el valor de inercia de la estructura mecánica se obtiene directamente desde las propiedades físicas (Figura 3.14) del diseño del Prototipo Final en SolidWorks (Figura 3.15) colocando el eje de giro en la primera articulación y los eslabones colineales.



**Figura. 3.14. Propiedades físicas del Prototipo Final**



**Figura. 3.15. Diseño del Prototipo Final en SolidWorks**

Despejando  $F$  de la Ecuación 3.4 se obtuvo un valor de fuerza mínima igual a  $5.46 \times 10^{-3}$  N, tal como indica la Ecuación 3.7.

$$F = \frac{I\alpha}{r} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$F = \frac{(16641048,35 \text{ g} \cdot \text{mm}^2) \left(0.09 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right) \cdot (1 \times 10^{-6})}{274 \text{ mm}}$$

$$F = 5.46 \times 10^{-3} \text{ N}$$

#### 3.1.4.4 Cálculo del torque mínimo

El valor del torque mínimo se calcula realizando la sumatoria del torque de cada tren de engranes y de la inercia de la estructura mecánica, hallando un valor de 6.71 N/mm. El resumen de dichos valores de indica en la Tabla 3.5.

<b>Torque - Tren de engranes (N/mm)</b>	
Articulación uno	0.78
Articulación dos	0.47
Subtotal	1.25
<b>Momento de Inercia – Estructura mecánica (N/mm)</b>	
Subtotal	5.46
<b>SUMATORIA</b>	<b>6.71</b>

**Tabla. 3.5. Resumen de valores de torque e inercia**

### 3.1.5 Área de trabajo del Prototipo Final

Debido a la configuración mecánica del Prototipo Final es necesario restringir el alcance radial, en el caso de la primera articulación se ha definido  $310^\circ$  y la segunda articulación en  $180^\circ$  (Figura 3.16), calculándose un valor de área igual a  $0.15\text{m}^2$  como se muestra en la Figura 3.17 b) de acuerdo al diagrama de la figura 3.17 a).

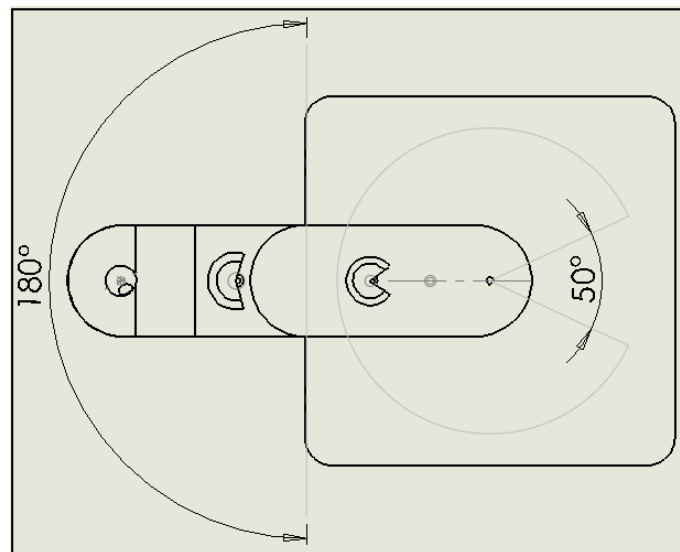


Figura. 3.16. Alcance radial del Prototipo Final

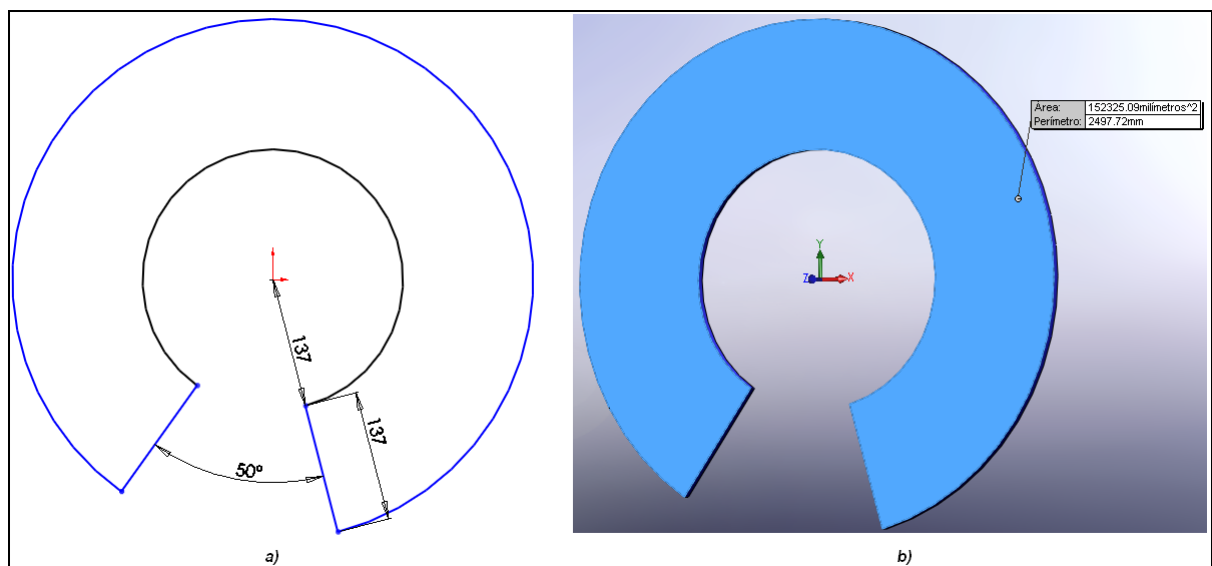


Figura. 3.17. a) Diagrama del área de trabajo del Prototipo Final.  
b) Perímetro y área de la superficie de trabajo del Prototipo Final

## 3.2 DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y SENSORES PARA EL PROTOTIPO HÁPTICO

El diseño del sistema eléctrico está directamente relacionado con el tipo de sensor escogido para medir el ángulo de giro de cada articulación, para la implementación en éste proyecto y debido al bajo costo, alta disponibilidad en el mercado y facilidad de conexión se utilizarán potenciómetros rotacionales de respuesta lineal conjuntamente con la tarjeta de adquisición de datos NI – USB 9229 (Anexo 5).

### 3.2.1 Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico para el Prototipo Uno consiste en un convertidor de voltaje diferencial a corriente (Figura 3.18) utilizando un amplificador operacional LM 741 (Anexo 6), se utiliza dicho circuito porque la tarjeta de adquisición de datos necesita un valor de corriente constante para realizar la medición de resistencia.

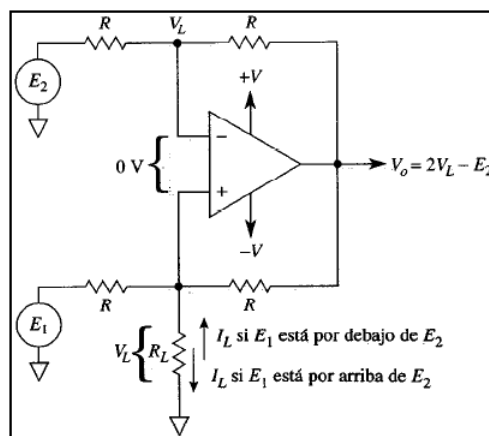


Figura. 3.18. Convertidor de voltaje diferencial a corriente [8]

Para determinar el valor de  $R$  se impone como datos la corriente de carga ( $I_L$ ) igual a  $20mA$ , la fuente  $E_1 = 9V$  y la fuente  $E_2 = 0V$ . De acuerdo a la Ecuación 3.9 encontramos un valor de resistencia  $R = 450\Omega$ .

$$I_L = \frac{E_1 - E_2}{R}$$

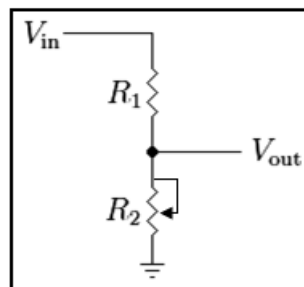
Ecuación 3.8

$$R = \frac{E_1 - E_2}{I_L} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$R = \frac{9V - 0V}{20mA} = 450\Omega$$

Por no existir en el mercado una resistencia de  $450\Omega$  utilizamos una resistencia de  $470\Omega$ , donde aplicando la Ecuación 3.8 nos da como resultado una corriente de carga  $I_L = 19.1mA$ .

En el caso del Prototipo Final se realiza directamente la medición de voltaje utilizando un divisor de tensión (Figura 3.19), donde  $R_2$  es el potenciómetro encargado de medir el ángulo de giro de cada articulación y  $R_1$  es una resistencia constante para proteger la fuente de voltaje  $V_{in}$ .



**Figura. 3.19. Divisor de Tensión**

Tanto en el diseño del Prototipo Uno como en el Prototipo Final los canales de la tarjeta de adquisición de datos se conectan en paralelo al potenciómetro.

### 3.2.2 Sensores

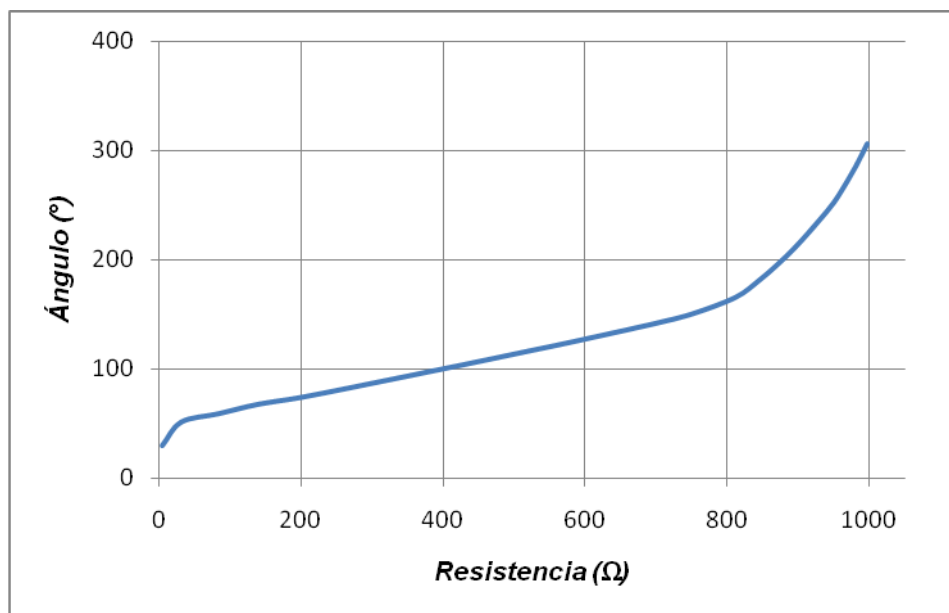
En el Prototipo Uno se utilizaron potenciómetros lineales de  $1K\Omega$  - 1 revolución para medir el ángulo de giro en cada articulación. Si bien el valor de resistencia no es directamente proporcional al valor del ángulo se obtuvo una tabla de valores experimentales (Tabla 3.6) y la gráfica de respuesta del sensor (Figura 3.20) mostrada a continuación:



<b>Resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Ángulo (<math>^\circ</math>)</b>	<b>Resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Ángulo (<math>^\circ</math>)</b>
5	30	429	104
31,6	51,5	509	114,8
84,6	59,3	580	124,5
141,2	68	700	141,8
215,5	76	754	151

<b>Resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Ángulo (<math>^\circ</math>)</b>	<b>Resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Ángulo (<math>^\circ</math>)</b>
812	165,5	950	252
845	181	965	267,2
870	195	980	284
897	212	988	294
928	234,5	997	305,5

**Tabla. 3.6. Resistencia Vs. Ángulo potenciómetro lineal – Prototipo Uno**



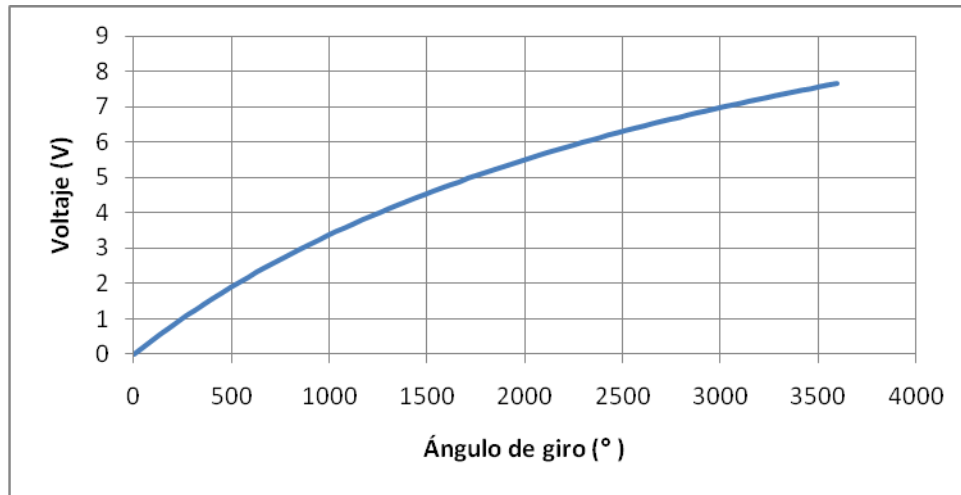
**Figura. 3.20. Respuesta del Potenciómetro Lineal – Prototipo Uno**

En la Figura 3.20 se indica la linealidad del sensor en el rango de los 100  $\Omega$  hasta los 800  $\Omega$  aproximadamente, esta característica disminuye aún más el área de trabajo del Prototipo Uno, en consecuencia para el Prototipo Final se utilizarán potenciómetros rotacionales de respuesta lineal Vishay 534 de 1K - 10 revoluciones. Los datos experimentales del potenciómetro Vishay se muestran en la Tabla 3.7 y su respectiva grafica en la Figura 3.21.

Ángulo (°)	Voltaje (V)	Ángulo (°)	Voltaje (V)
0	0,01	900	3,11
45	0,2	945	3,23
90	0,39	990	3,36
135	0,58	1035	3,48
180	0,75	1080	3,58
225	0,93	1125	3,69
270	1,11	1170	3,81
315	1,26	1215	3,91
360	1,43	1260	4,01
450	1,74	1350	4,22
495	1,9	1395	4,32
540	2,04	1440	4,42
585	2,18	1485	4,51
630	2,34	1530	4,61
675	2,47	1575	4,7
720	2,6	1620	4,79
765	2,73	1665	4,87
810	2,86	1710	4,98
855	2,99	1755	5,06

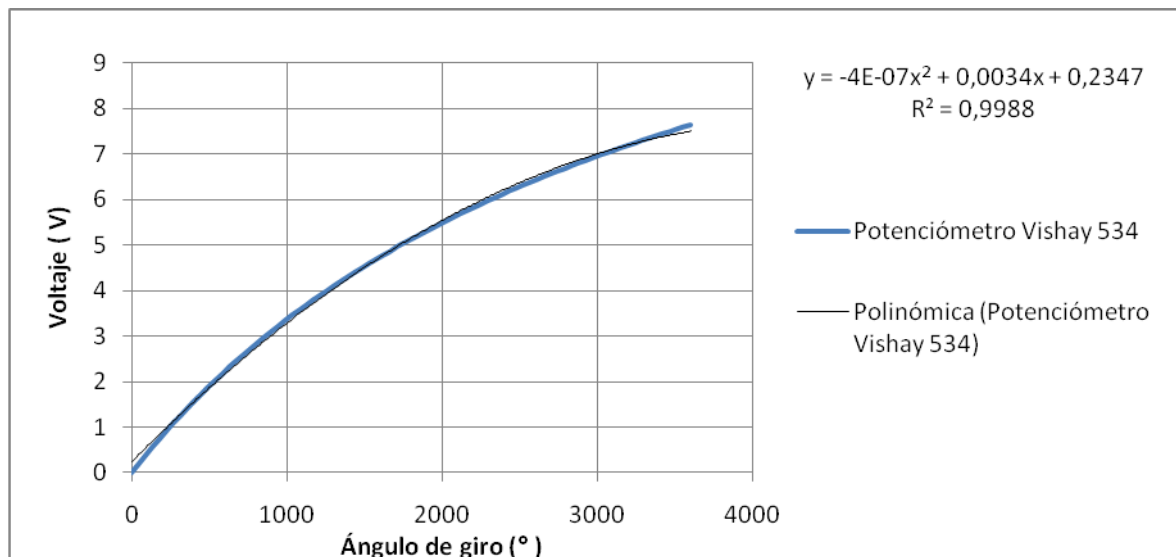
Ángulo (°)	Voltaje (V)	Ángulo (°)	Voltaje (V)
1800	5,14	2745	6,64
1845	5,22	2790	6,69
1890	5,3	2835	6,76
1935	5,38	2880	6,82
1980	5,46	2925	6,87
2025	5,54	2970	6,93
2070	5,62	3015	6,99
2115	5,7	3060	7,04
2205	5,84	3150	7,15
2250	5,91	3195	7,2
2295	5,99	3240	7,25
2340	6,05	3285	7,31
2385	6,12	3330	7,36
2430	6,2	3375	7,41
2475	6,26	3420	7,46
2520	6,33	3465	7,5
2565	6,39	3510	7,56
2610	6,45	3555	7,61
2655	6,52	3600	7,65

**Tabla. 3.7. Voltaje Vs. Ángulo potenciómetro lineal – Prototipo Final**



**Figura. 3.21. Respuesta del Potenciómetro Lineal – Prototipo Final**

En base al resultado obtenido del comportamiento real del potenciómetro Vishay 534, no es conveniente utilizar una línea de tendencia lineal porque el error máximo a cometerse sería del 50% aproximadamente, sin embargo utilizando una línea de tendencia polinomial de grado 2 el error máximo a cometerse sería del 7,6%, razón por la cual esta última ecuación (Figura 3.22) se aplicará en la subrutina de la adquisición de datos.



**Figura. 3.22. Línea de tendencia polinomial de segundo grado de la curva de respuesta del sensor Vishay 534**

## CAPÍTULO 4

### DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE COMUNICACIÓN Y SOFTWARE DE CONTROL DEL SISTEMA DE TELEOPERACIÓN

#### 4.1 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN

El sistema de teleoperación del manipulador industrial CRS A255 cuenta con dos interfaces de comunicación (Figura 4.1):

- a) Entre el dispositivo háptico y el software de control
- b) Entre el controlador C500 y el software de control

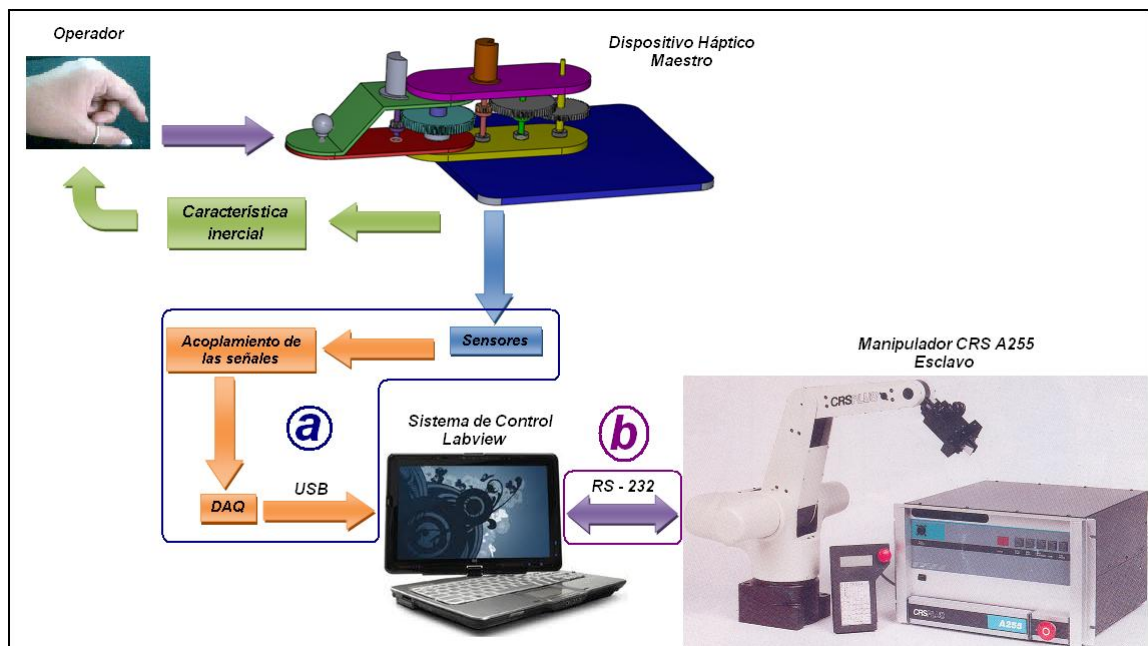
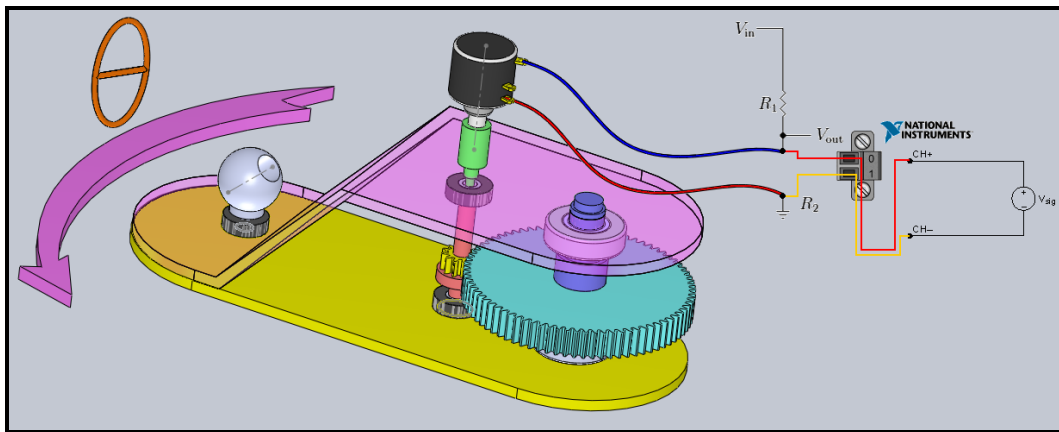


Figura. 4.1. Interfaces de comunicación para el sistema de teleoperación

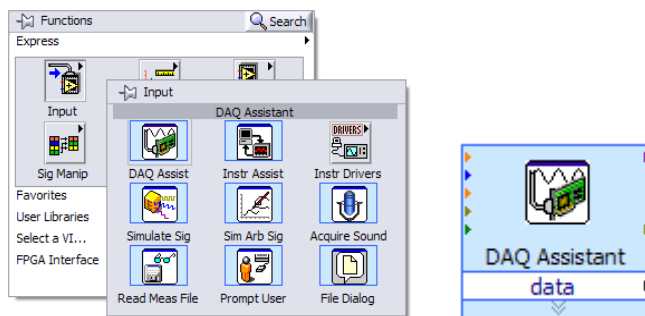
### 4.1.1 Interfaz de comunicación para el dispositivo háptico

La interfaz de comunicación para el dispositivo háptico está constituida por la tarjeta de adquisición de datos NI - 9229 (Anexo 5) y el circuito eléctrico para la adquisición de resistencia del potenciómetro. En el Prototipo Final se realizó la adquisición de voltaje (Figura 4.2) para obtener el ángulo de giro en cada articulación debido a la estabilidad presentada por esta medida, a diferencia de la adquisición de resistencia donde la medición depende de un valor de corriente externa y la aplicación de la Ley de Ohm para efectivamente medir el ángulo de giro.



**Figura. 4.2. Adquisición de voltaje en el Prototipo Final**

A continuación se muestra una breve guía de la configuración del asistente de adquisición en la tarjeta NI - 9229. Primero se debe ubicar el bloque del asistente de adquisición (Figura 4.3) en el diagrama de bloques, después se define la asignación del tipo de señal (Figura 4.4) y la selección del canal (Figura 4.5).



**Figura. 4.3. Asistente de adquisición**

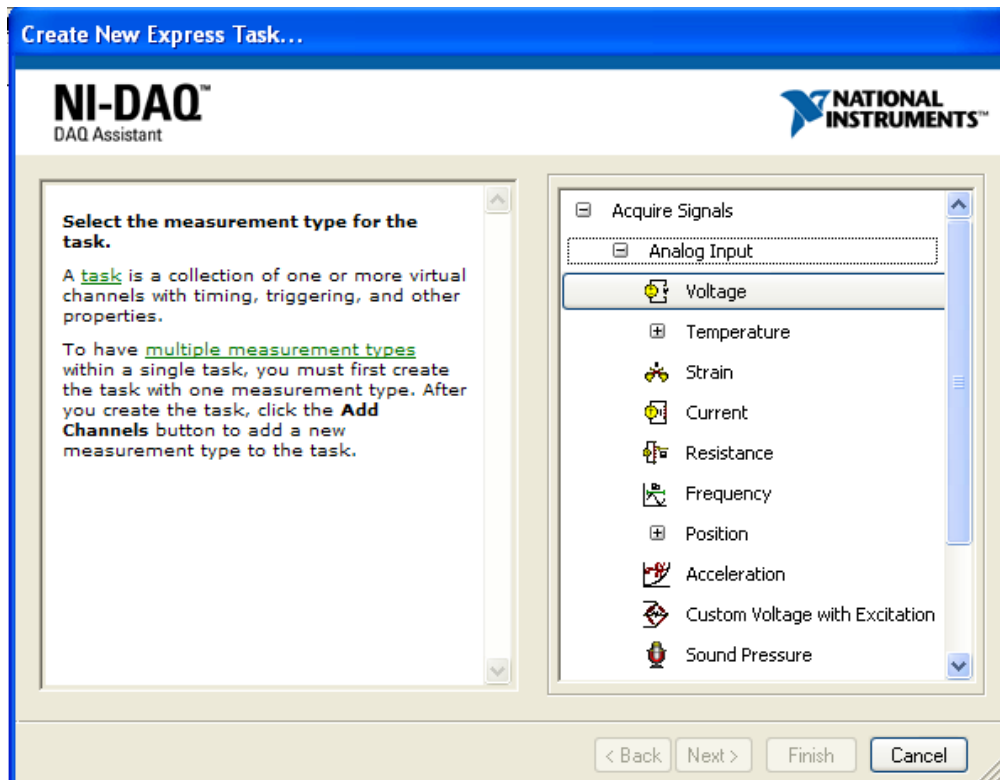


Figura. 4.4. Asignación del tipo de señal

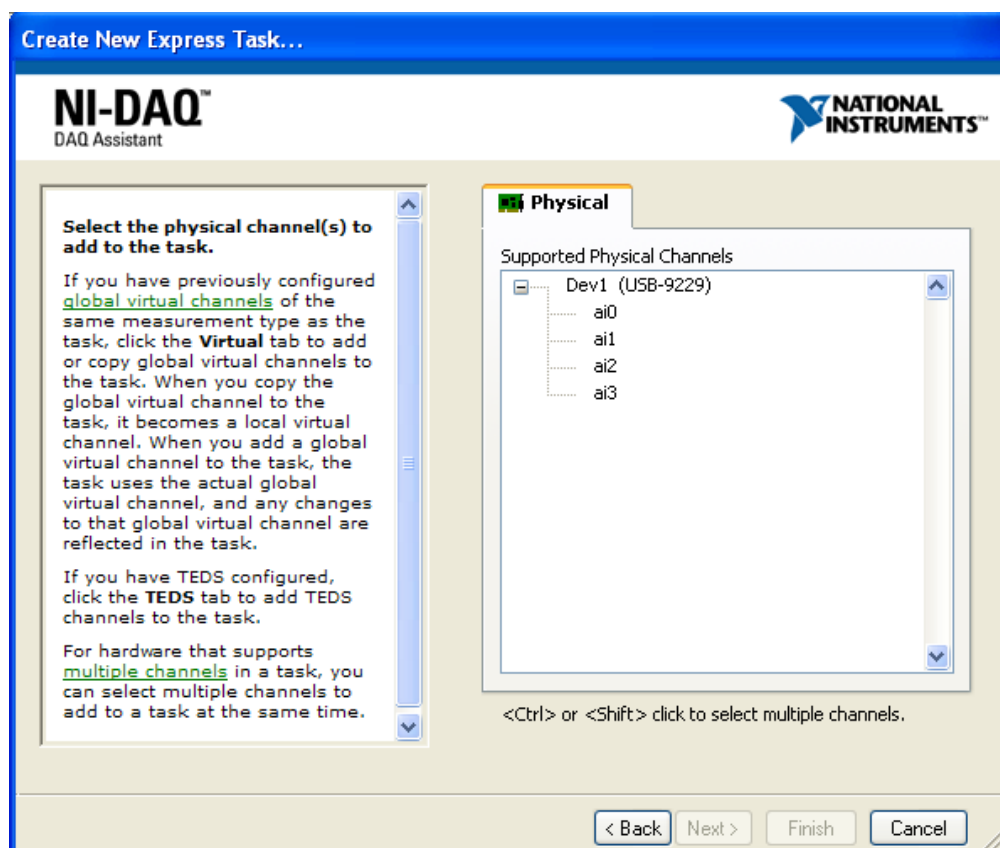
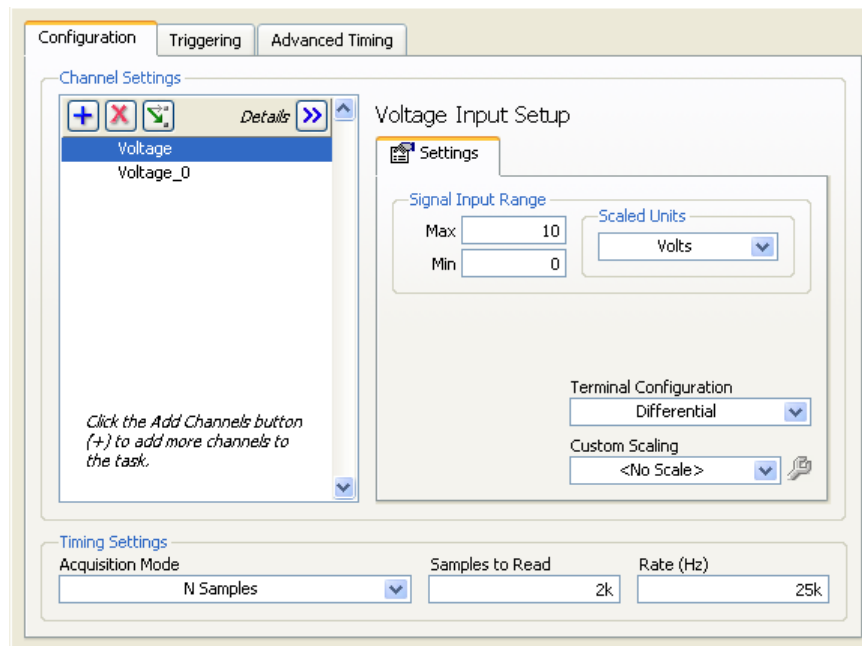


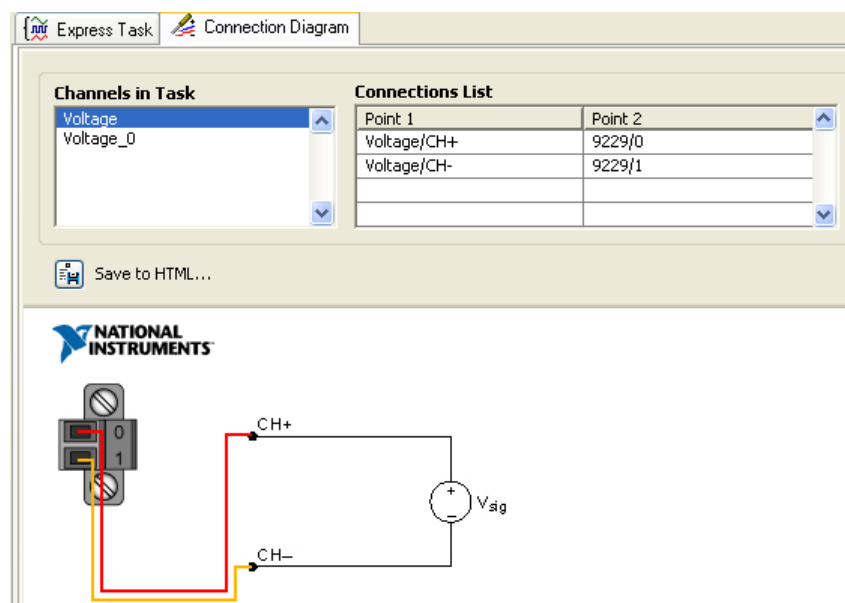
Figura. 4.5. Selección del Canal

Finalmente en la siguiente pantalla (Figura 4.6) del asistente de adquisición se indica el rango de voltaje a medir, la frecuencia y el número de muestras.



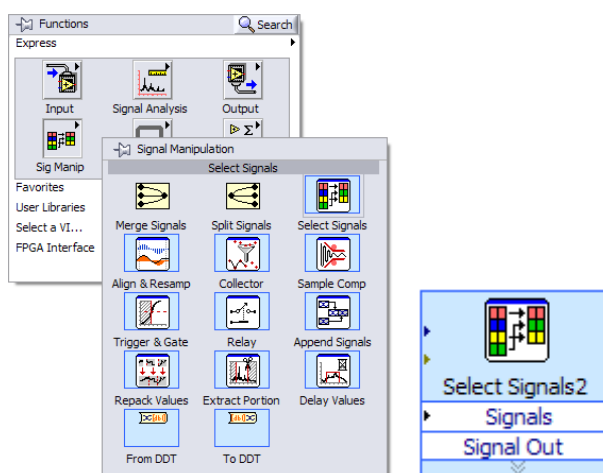
**Figura. 4.6. Parámetros de medición**

Para indicar al usuario un circuito general de conexión entre la tarjeta de adquisición y los sensores, el asistente también facilita el diagrama de conexión mostrado en la Figura 4.7.

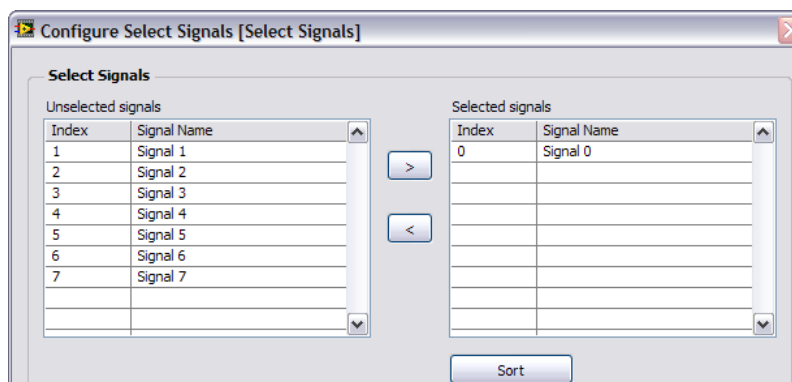


**Figura. 4.7. Diagrama de conexión**

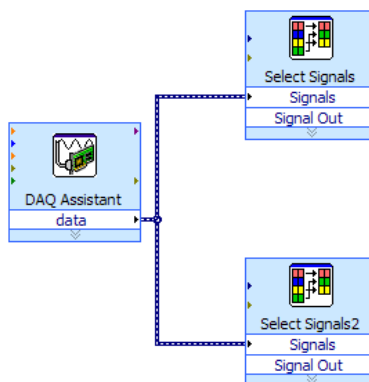
Al ser necesario ejecutar la adquisición en dos canales de forma simultánea se utiliza un selector de señal capaz de permitir la elección del canal y evitar problemas con la sincronización de las señales. El bloque de selección de señal, la configuración y la conexión con el asistente de adquisición se muestran en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 respectivamente.



**Figura. 4.8. Selector de señal**



**Figura. 4.9. Configuración del selector de señal**



**Figura. 4.10. Conexión del Asistente de adquisición y selector de señal**



#### 4.1.2 Interfaz de comunicación para el controlador C500

Entre los varios puertos de comunicación incluidos en el Controlador C500 del manipulador CRS A255 se encuentra el puerto de comunicación, ubicado en el panel frontal del mismo, identificándolo con un conector DB25 adaptable a DB9 para la comunicación serial con el protocolo RS-232.

El puerto serial requiere definir seis parámetros básicos para realizar la comunicación exitosa entre Labview y el controlador C500, en la Tabla 4.1 se indica el nombre y su respectivo valor/designación.

<b>Puerto Serial RS232</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor / Designación</b>
Nombre del puerto	COM1
Velocidad de transmisión	38400 bps
Bits de datos	8
Paridad	Ninguno
Bits de parada	1
Control de flujo	Hardware o ninguno

**Tabla. 4.1. Parámetros de configuración - puerto serial RS232**

Es condición necesaria tanto en el puerto de la computadora como en el bloque de apertura del puerto serial en Labview, la igualdad de los parámetros antes mencionados, solamente de esta forma se garantiza la comunicación exitosa y se evitan conflictos en el envío de los caracteres en hexadecimal.

A pesar de existir varias opciones para el control de flujo en la transmisión de los datos, para las pruebas en este proyecto se han considerado aplicables el control por hardware y sin control de flujo. En ambos casos no existen problemas de comunicación con el controlador C500 y el programa en Labview no deja de funcionar correctamente mientras se realizan las pruebas.

## 4.2 DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA LA INTERFAZ DE COMUNICACIÓN Y CONTROL DEL TELEOPERADOR

El software para la interfaz de comunicación y control del teleoperador se ha desarrollado en Labview y está compuesto por siete etapas obligatoriamente consecutivas, estas permiten comunicar el dispositivo háptico al robot industrial, iniciar el movimiento en línea y finalizar la comunicación, dichas etapas se enumeran a continuación:

- a) Configuración del puerto serial
- b) Inicialización de la comunicación
- c) Ciclo infinito de adquisición de datos y envío de la sentencia de movimiento
- d) Fin de uso del dispositivo háptico
- e) Envío a la posición inicial
- f) Envío de secuencia de finalización
- g) Cerrar el puerto serial

Para visualizar de forma global el funcionamiento del programa principal se indica en la Figura 4.12 el diagrama de flujo y su respectivo diagrama de bloques en Labview se encuentra en el Anexo 7.1.

### 4.2.1 Configuración del puerto serial

El puerto serial se configura correctamente definiendo los parámetros de la Tabla 4.1 en el bloque VISA Configure Serial Port (Figura 4.11).

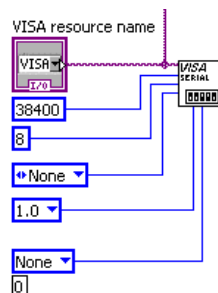
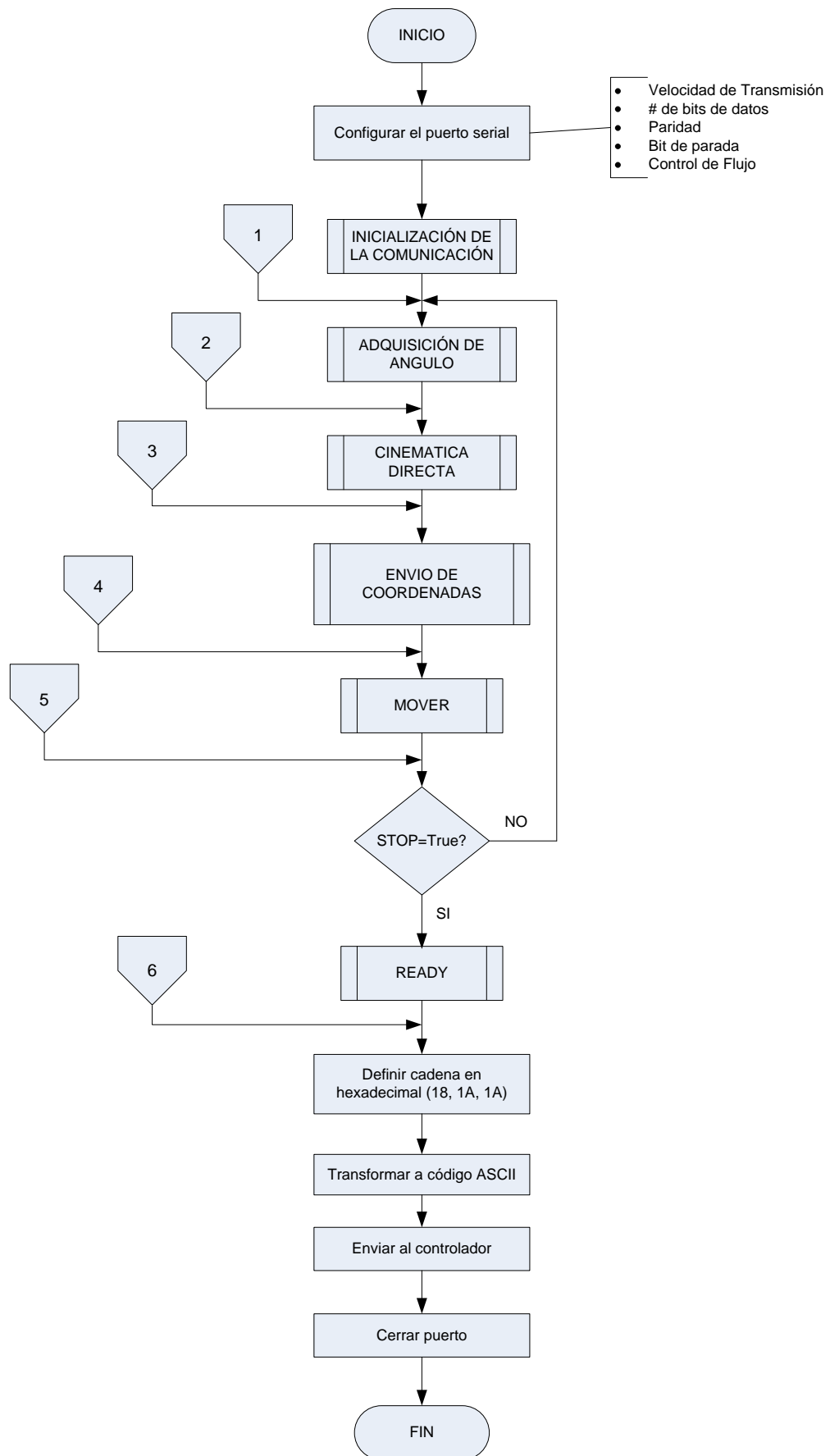


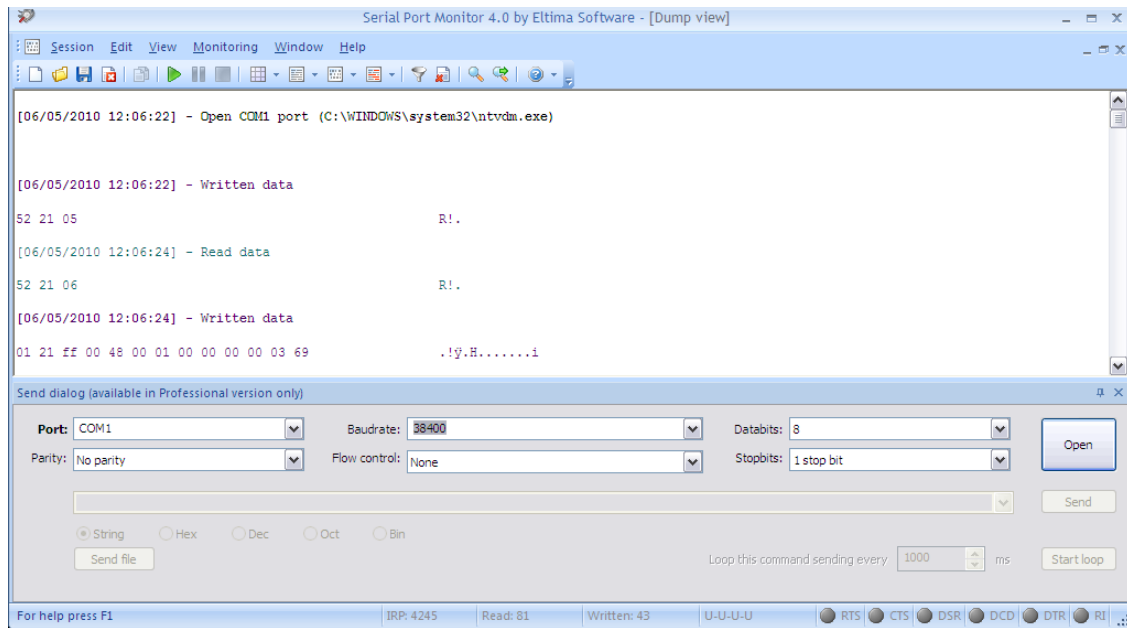
Figura 4.11. Configuración del puerto serial en Labview



**Figura. 4.12. Diagrama de flujo - programa principal (PRINCIPAL.vi)**

### 4.2.2 Inicialización de la comunicación

Realizando ingeniería inversa se determinó la secuencia de inicialización de la comunicación entre la computadora y el controlador C500, se utilizó un lector de puerto serial de uso libre en la web, su resultado se muestra en la Figura 4.13.



**Figura. 4.13. Resultado del lector del puerto serial**

Una vez realizada la comunicación con el controlador C500 desde Labview se puede utilizar cualquier comando de Robcomm, en esta aplicación inmediatamente después del envío de la cadena de inicialización se envía el comando READY para visualizar el movimiento del robot hacia la posición inicial y efectivamente comprobar la comunicación exitosa.

Por motivos de reducir el retardo hasta un valor aceptable se envía también al controlador el comando NOHELP, dicha sentencia no permite al controlador completar automáticamente los comandos. El diagrama de flujo de la inicialización de la comunicación se muestra en la Figura 4.14 y su diagrama de bloques en el Anexo 7.2.

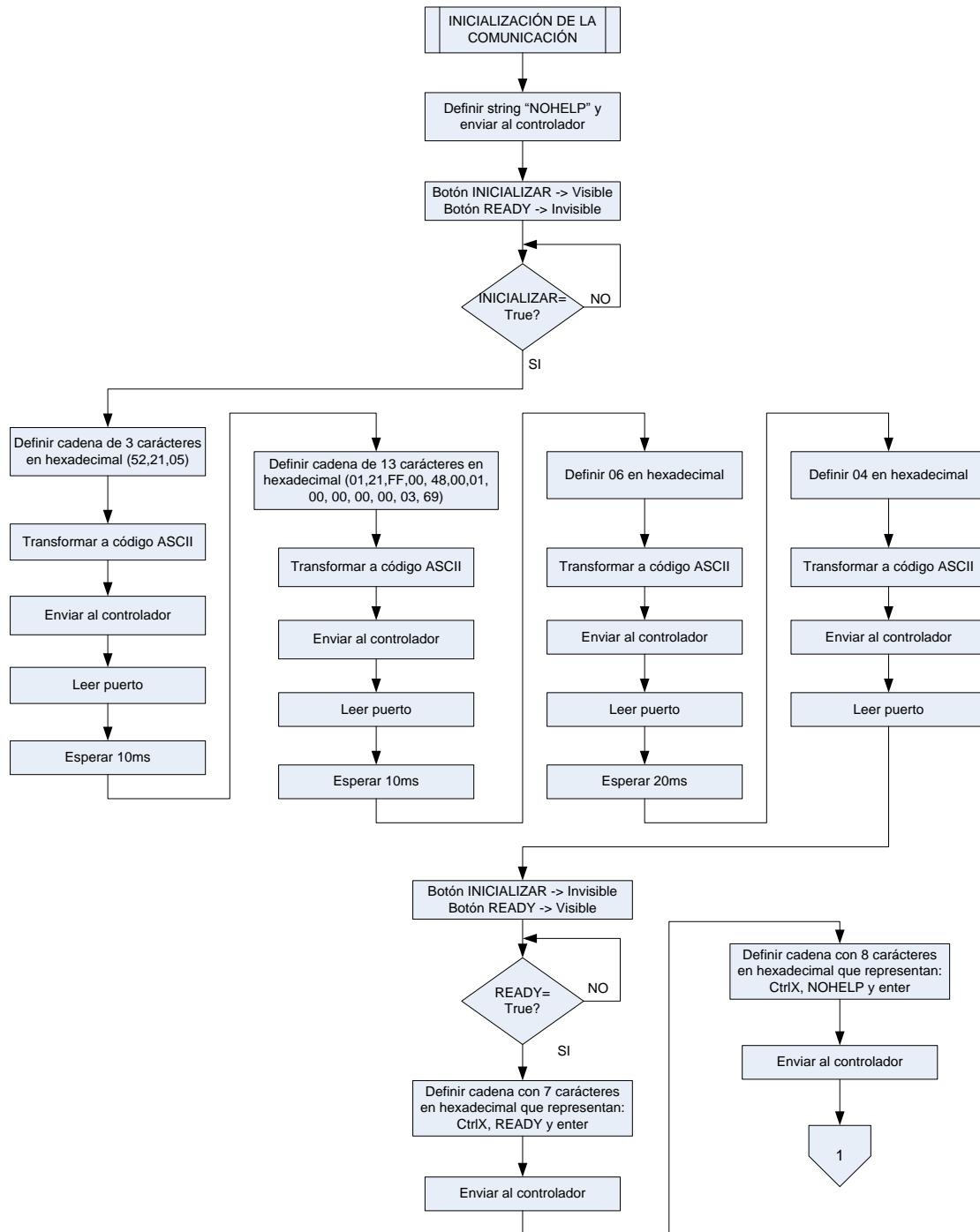


Figura. 4.14. Diagrama de flujo – Inicialización de la comunicación (INICIALIZACION.vi)

### 4.2.3 Ciclo infinito de adquisición de datos y envío de la sentencia de movimiento

Esta etapa del programa se encuentra subdividida en cuatro partes, donde se realiza la adquisición del ángulo, se calcula el punto en coordenadas cartesianas utilizando la cinemática directa y se envía al controlador los valores en el comando POINT para generar movimiento utilizando el comando MOVE.

#### 4.2.3.1 Adquisición del ángulo

Una vez configurado el asistente de adquisición se obtiene un valor de ángulo de giro en cada articulación utilizando la curva de respuesta del sensor, el diagrama de flujo de esta subrutina se muestra en la Figura 4.15 y el respectivo diagrama de bloques en Labview en el Anexo 7.3.

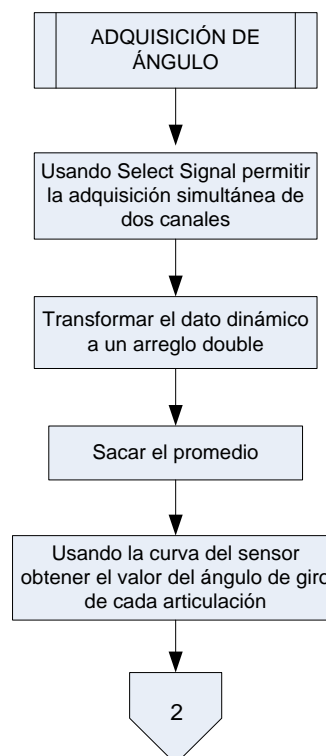


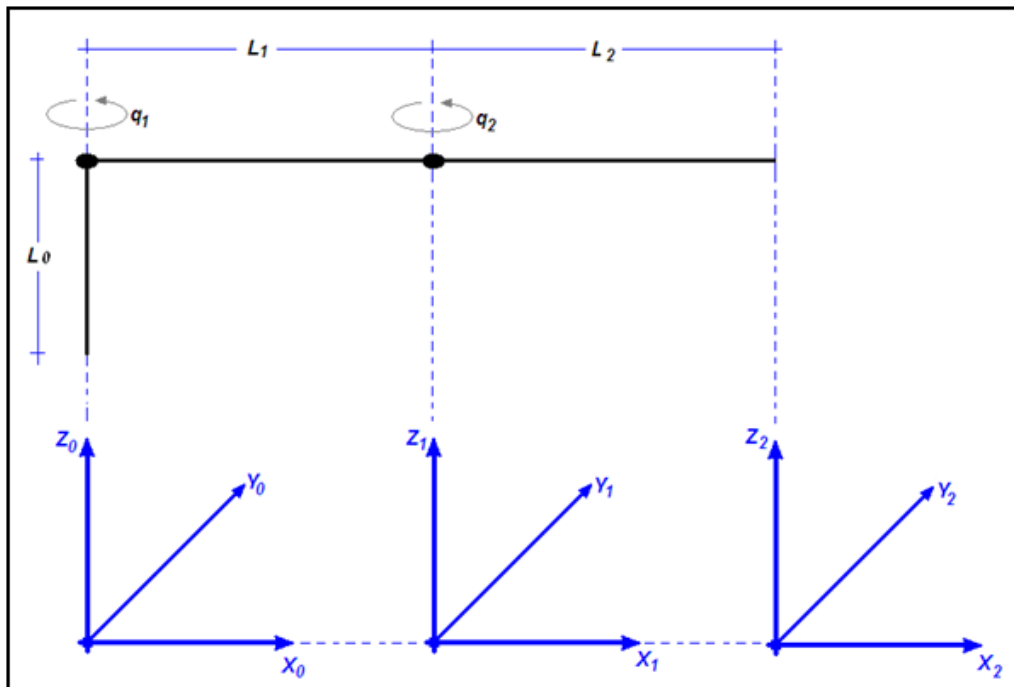
Figura. 4.15. Diagrama de flujo – Adquisición del ángulo (Adquisición resist9229.vi)

**4.2.3.2 Cinemática Directa.**

Para calcular las ecuaciones de la cinemática directa se ha utilizado el algoritmo de Denavit – Hartenberg, obteniendo la Tabla 4.2 a partir de la Figura 4.16.

Eslabón	Articulación	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
0 - 1	1	$q_1$	0	$l_1$	0
1 - 2	2	$q_2$	0	$l_2$	0

**Tabla. 4.2. Parámetros de Denavit - Hartenberg**



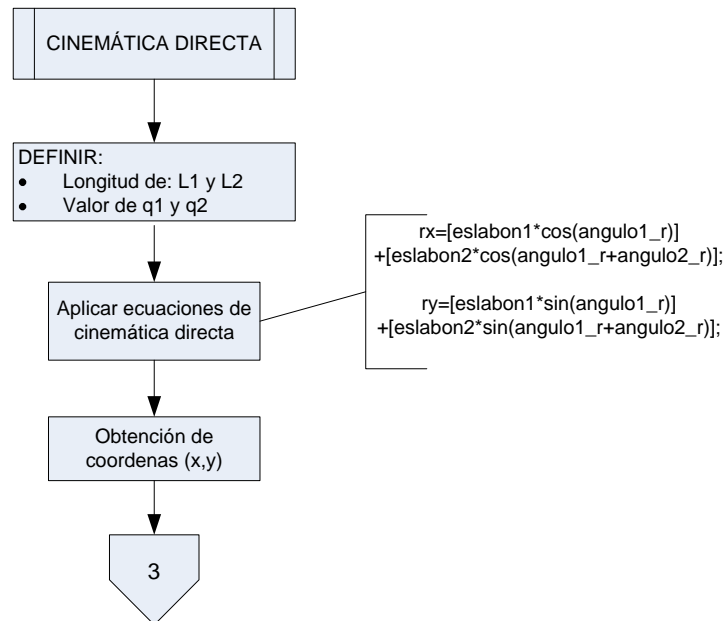
**Figura. 4.16. Gráfico para obtener los parámetros de Denavit - Hartenberg**

Utilizando el programa de cálculo Matematica se determinó la siguiente matriz de transformación de cinemática directa, donde las ecuaciones para  $x$  y  $y$  se indican en la Figura 4.17.

	$\cos[q_1 + q_2]$	$-\sin[q_1 + q_2]$	0	$l_1 \cos[q_1] + l_2 \cos[q_1 + q_2]$
	$\sin[q_1 + q_2]$	$\cos[q_1 + q_2]$	0	$l_1 \sin[q_1] + l_2 \sin[q_1 + q_2]$
Cinemática Directa=	0	0	1	0
	0	0	0	1

**Figura. 4.17. Matriz de transformación de cinemática directa**

El diagrama de flujo de la subrutina Cinemática se muestra en la Figura 4.18 y el diagrama de bloques en el Anexo 7.4



**Figura. 4.18. Diagrama de flujo – Cinemática directa (Cinematica.vi)**

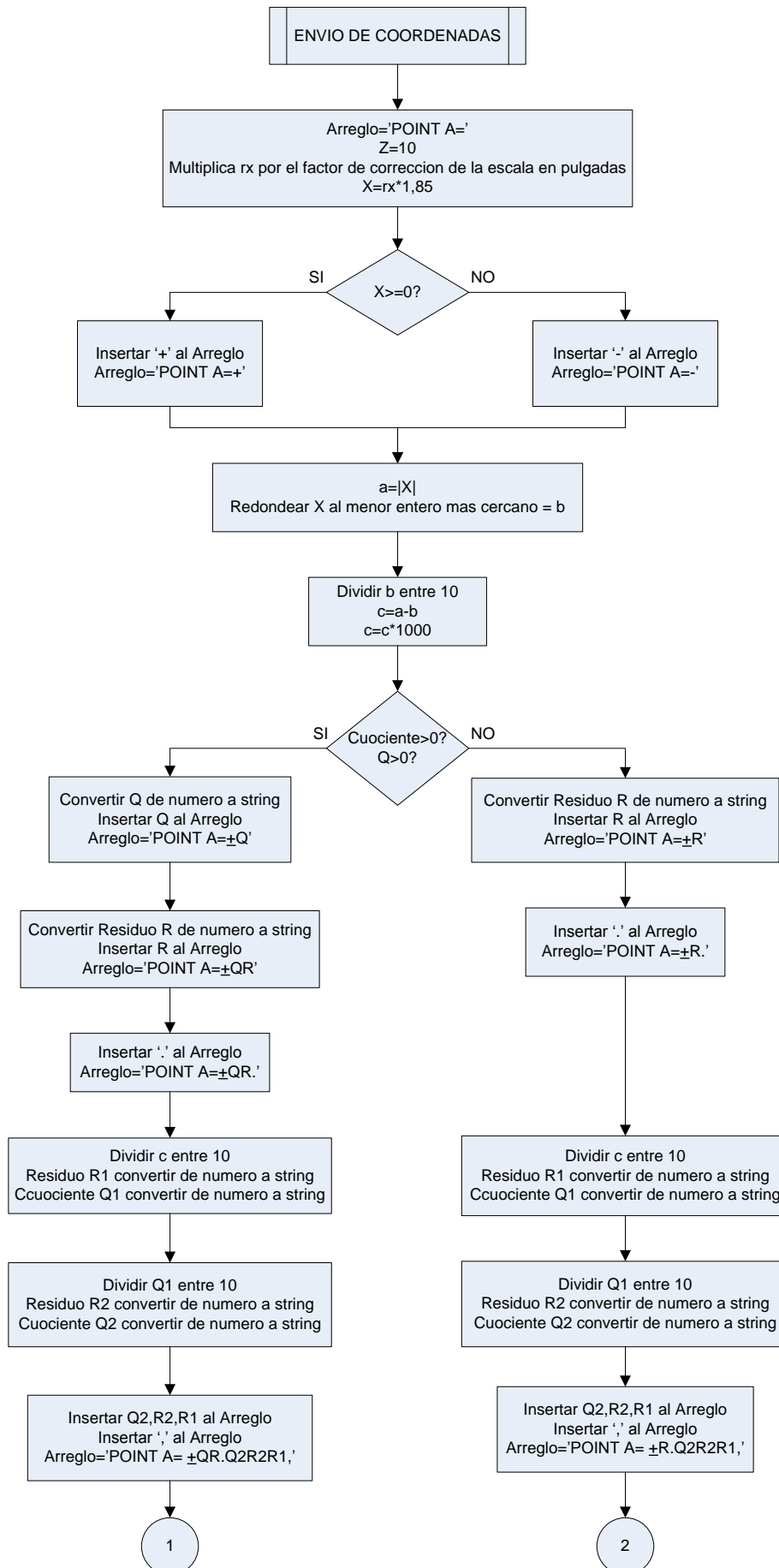
#### 4.2.3.3 Envío de coordenadas.

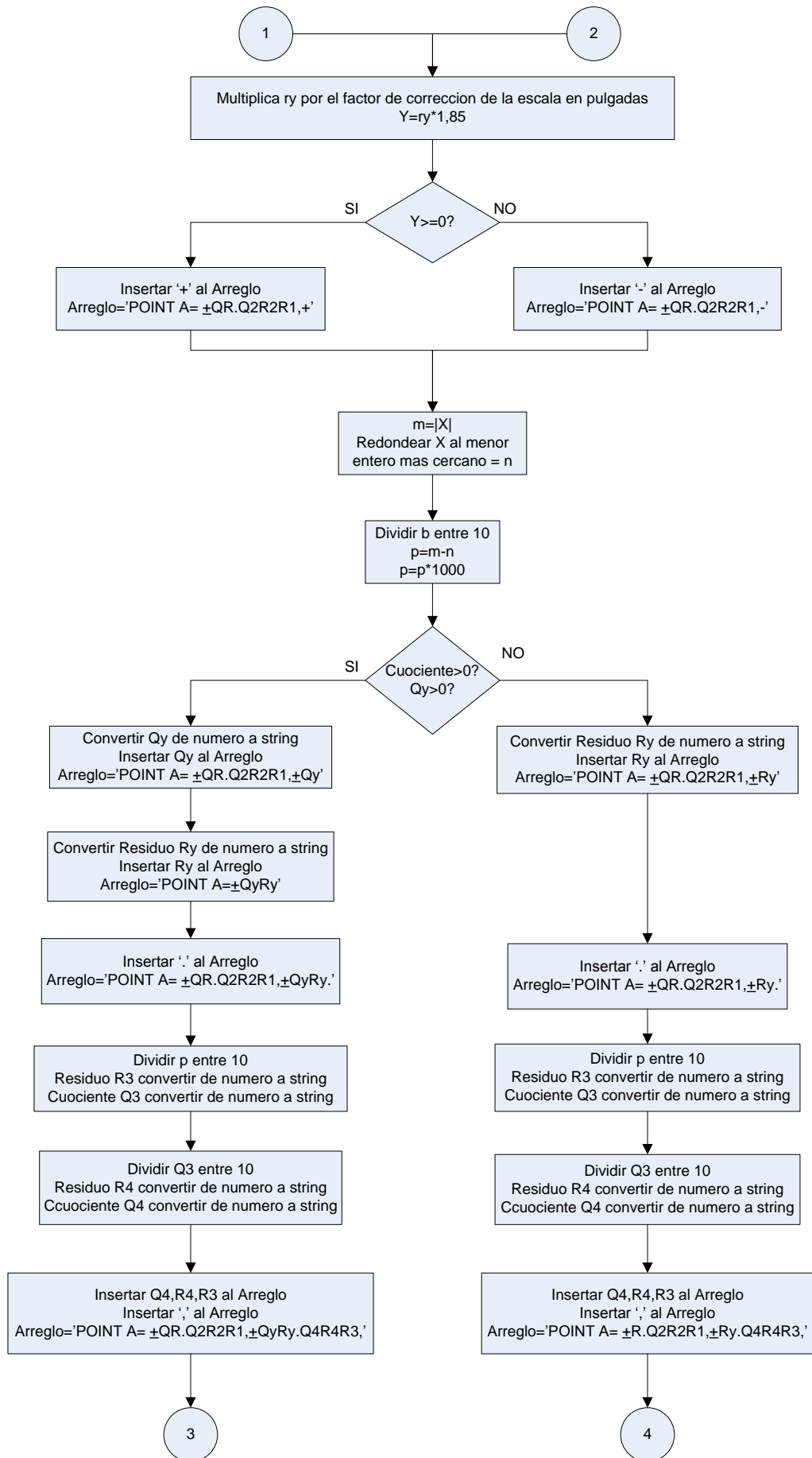
Una vez obtenidas las coordenadas cartesianas del punto final en el prototipo háptico, es necesario enviarlas al controlador C500 como parámetros del comando POINT, para ello se genera un algoritmo que construya el comando “POINT A =x, y, z, yaw, pitch, roll”, donde:

- x, y: son los valores calculados por la cinemática directa
- z: es un valor constante igual a 25,4 cm
- yaw, pitch, roll: son valores que definen la posición del gripper y son iguales a cero

El diagrama de flujo de la subrutina envío de coordenadas se indica en la Figura 4.19, y el diagrama de bloques en el Anexo 7.5.







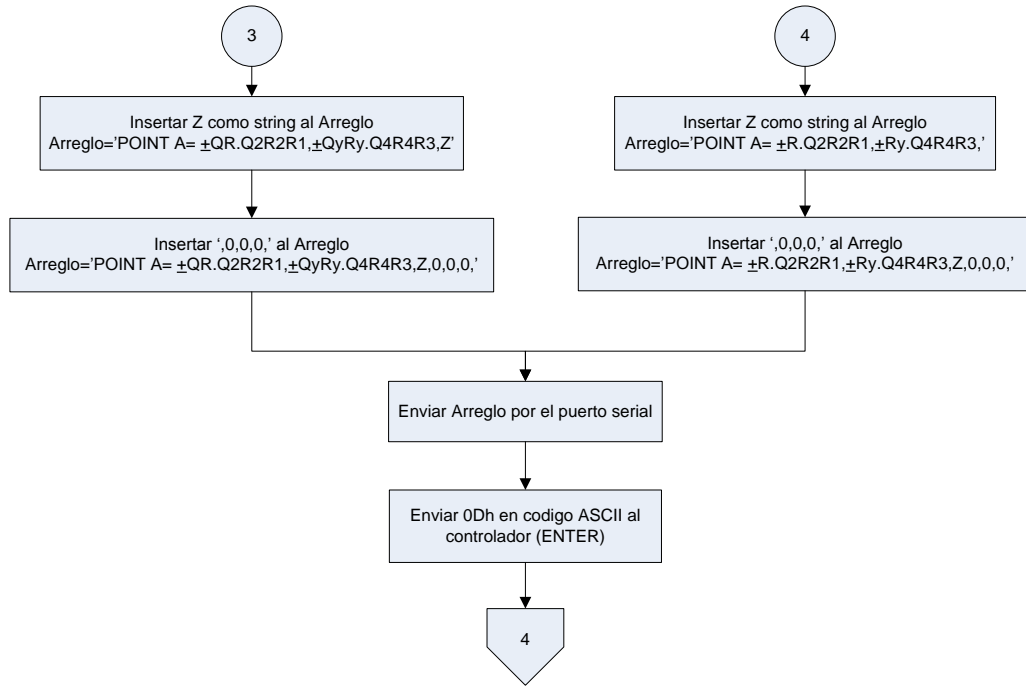


Figura. 4.19. Diagrama de flujo – Envío de coordenadas (ARREGLO\_1.vi)

#### 4.2.3.4 Envío de la sentencia de movimiento.

En este punto de la ejecución del programa el controlador C500 conoce el punto (X, Y), el cual debe ser alcanzado por el manipulador industrial, para generar movimiento se utiliza el comando MOVE, el cual se envía como lo muestra la Figura 4.20, coherente con su diagrama de bloques en el Anexo 7.6.

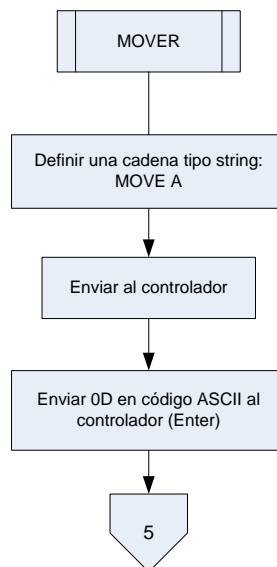


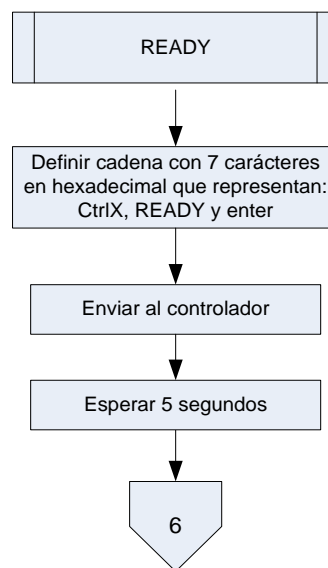
Figura. 4.20. Diagrama de flujo – Mover (MOVE.vi)

#### 4.2.4 *Fin de uso del dispositivo háptico*

Cuando el usuario desea finalizar el movimiento en el manipulador industrial solamente debe presionar el botón STOP, el robot alcanza el último punto cartesiano enviado y detiene los servomotores. El booleano STOP está definido como variable global y se ubica en el control de finalización del lazo while (ítem d Anexo 7.1).

#### 4.2.5 *Envío a la posición inicial*

Para colocar nuevamente el robot en la posición inicial una vez finalizado el movimiento en línea, se envía el comando READY, el diagrama de flujo se indica en la Figura 4.21 y su respectivo diagrama de bloques en el Anexo 7.7.



**Figura. 4.21. Diagrama de Flujo - READY.vi**

#### 4.2.6 *Envío de secuencia de finalización*

Para finalizar correctamente la comunicación entre Labview y el controlador C500 es necesario enviar una secuencia de finalización encargada de terminar el envío y recepción de datos y permitir la correcta apertura del puerto en la siguiente sesión.

El diagrama de bloques de dicha secuencia se indica en el Anexo 7.8.

#### **4.2.7 Cerrar el puerto serial**

Como último paso en el uso del programa y por seguridad del puerto serial, se cierra el puerto desde Labview como parte del programa principal, el bloque que permite esta acción se indica en el ítem g del Anexo 7.1.

## ***CAPÍTULO 5***

### ***IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO***

Como resultado de la investigación en éste proyecto, el presente capítulo comprende:

- a)** Construcción y montaje del prototipo háptico diseñado en el Cap. III
- b)** Integración y funcionamiento del prototipo háptico y el sistema robótico CRS A255
- c)** Pruebas y resultados de la evaluación del desempeño del sistema de teleoperación en el trazo por puntos y de figuras geométricas

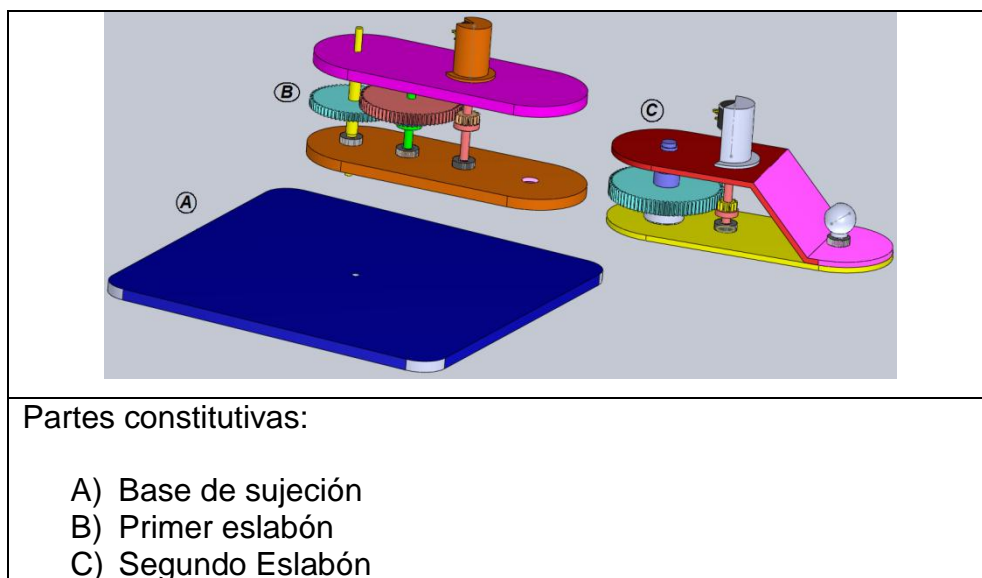
#### ***5.1 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO HÁPTICO***

En función del prototipo háptico diseñado en el capítulo III, se procedió a la construcción y montaje de la estructura mecánica tomando en cuenta las siguientes características de adecuación para el uso aplicables en éste proyecto:

- a)** Los componentes del dispositivo háptico deben construirse con materiales livianos, resistentes y de fácil maquinado.

- b)** En las piezas de sujeción tales como tornillos, tuercas, rodajas, prisioneros y rodamientos se llegará a un acuerdo entre coste y funcionalidad, lo cual no debe representar dificultad en el momento de realizar tareas de ajuste, calibración y mantenimiento.
- c)** El montaje de los componentes y las piezas de sujeción debe realizarse de tal forma de no presentar dificultad en el caso de reemplazar alguna de ellas.

A continuación se describe la estructura mecánica del Prototipo Final, la cual está comprendida por tres partes fundamentales (Figura 5.1) descritas con su respectiva tabla de correspondencia:



**Figura. 5.1. Partes fundamentales del Prototipo Final**

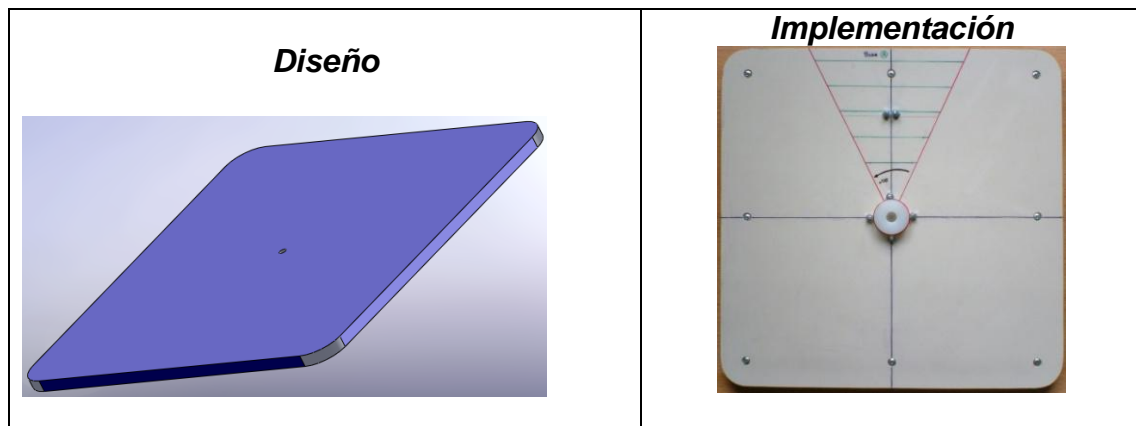
Principalmente los materiales utilizados en la construcción del dispositivo háptico son tres, el detalle de cada uno de estos se encuentra en el Anexo 3:

- a)** Duralón: Material elegido por sus características de dureza y facilidad de maquinado en la fabricación de todos los ejes encargados de soportar los engranes y el elemento terminal de manejo del dispositivo háptico.

- b)** Plástico ABS: Corresponde al material de todos los engranes propiamente dichos independientemente de su tamaño y número de dientes.
- c)** Plástico PVC: Designado para la base de sujeción y el cuerpo del primer y segundo eslabón.

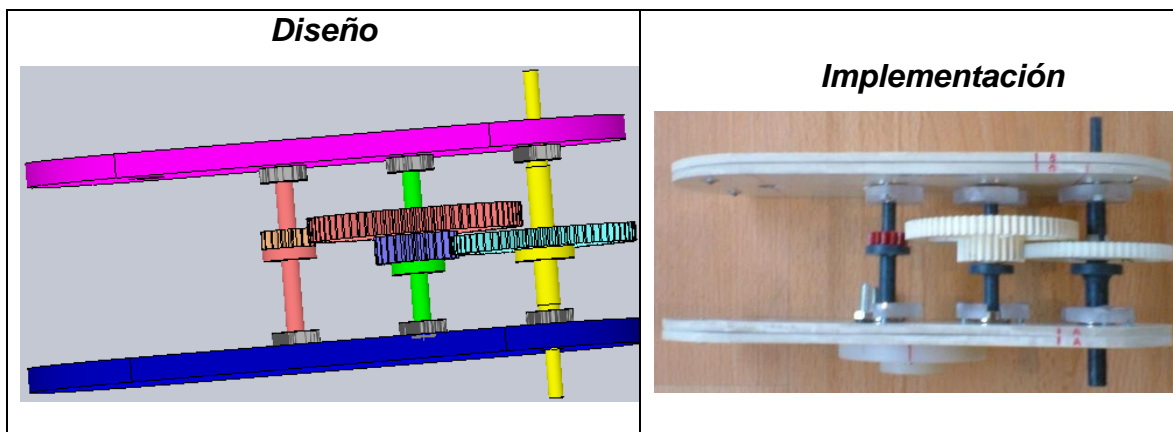
De acuerdo a la Figura 5.1 a continuación se ilustra el diseño y la implementación de cada parte fundamental del dispositivo háptico en conjunto con su gráfico descriptivo de componentes.

- ❖ A: Base de sujeción



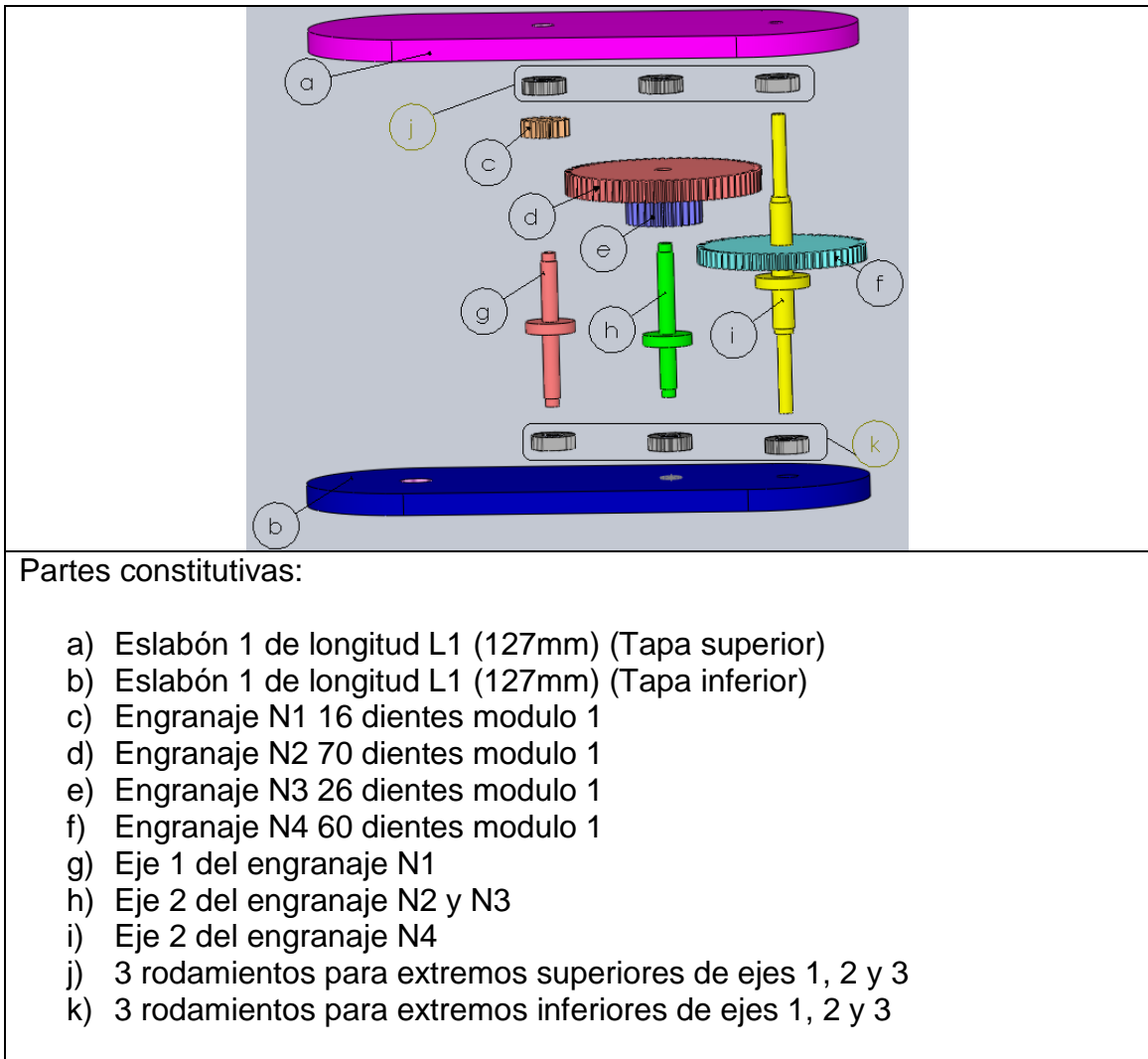
**Figura. 5.2. Base de sujeción: diseño e implementación**

- ❖ B: Primer eslabón



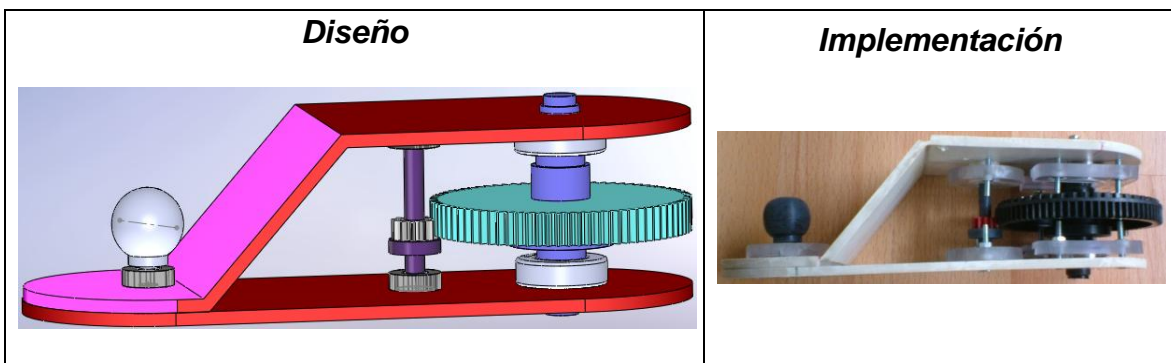
**Figura. 5.3. Primer eslabón: diseño e implementación**



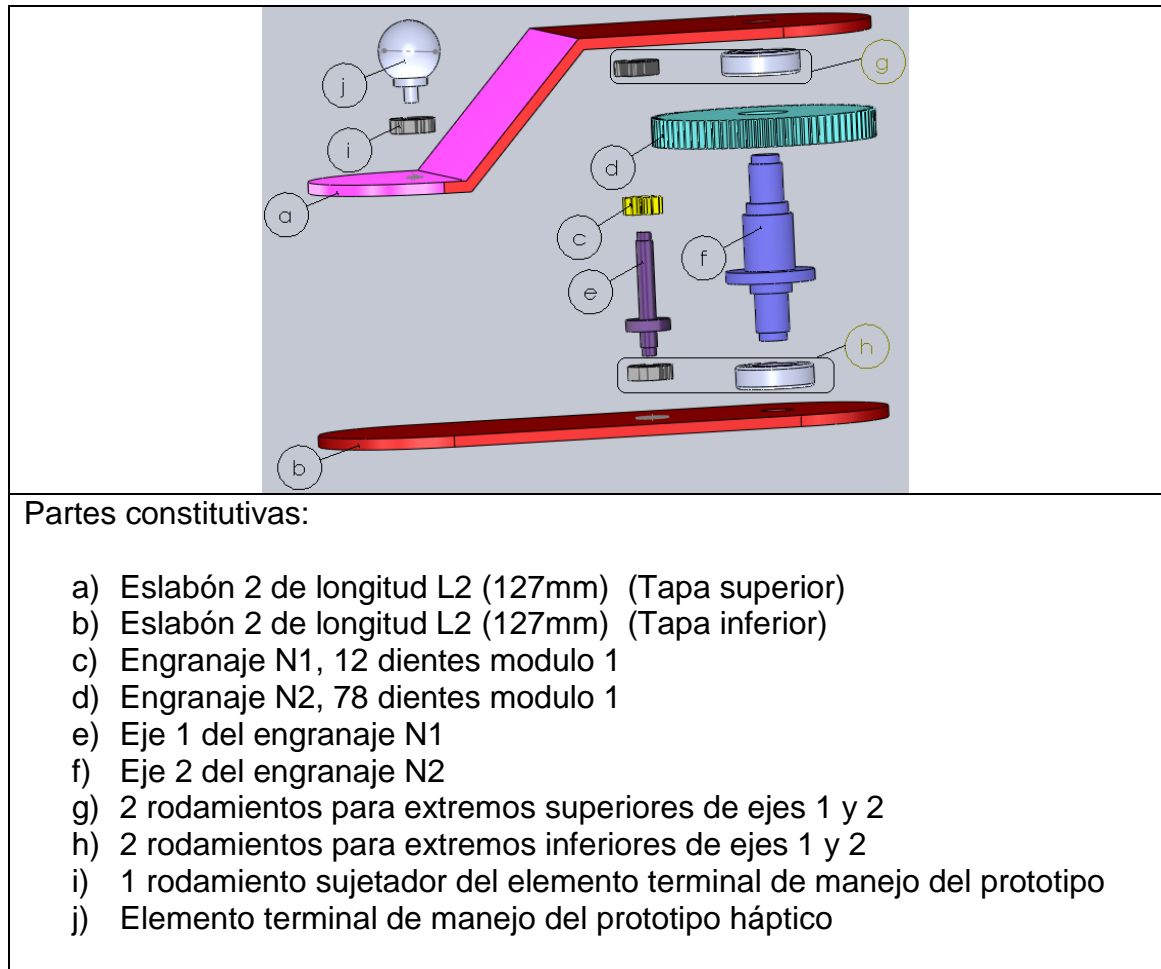


**Figura. 5.4. Primer eslabón – Descripción de componentes**

❖ C: Segundo eslabón

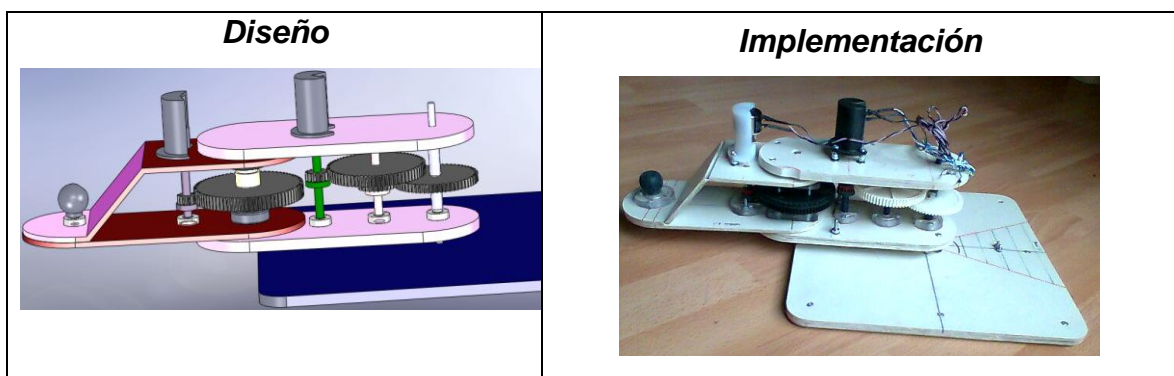


**Figura. 5.5. Segundo eslabón: diseño e implementación**



**Figura. 5.6. Segundo eslabón – Descripción de componentes**

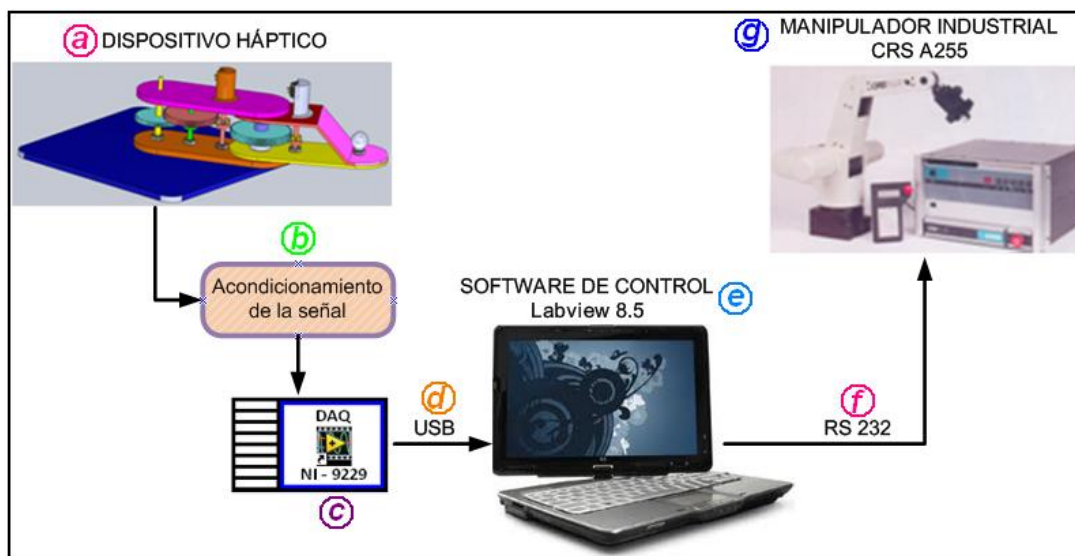
Finalmente en la Figura 5.7 se indica el diseño y la implementación del Prototipo Final, en el Anexo 8 es posible observar el gráfico de descripción de componentes y la lista total de elementos conjuntamente con el costo final.



**Figura. 5.7. Prototipo Final: Diseño e implementación**

## 5.2 INTEGRACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO HÁPTICO Y EL SISTEMA ROBÓTICO CRS A255

El Sistema de Teleoperación integra siete componentes, los cuales permiten el movimiento del manipulador industrial de acuerdo al movimiento del dispositivo háptico. La Figura 5.8 indica un diagrama general de interconexión entre cada uno de ellos.



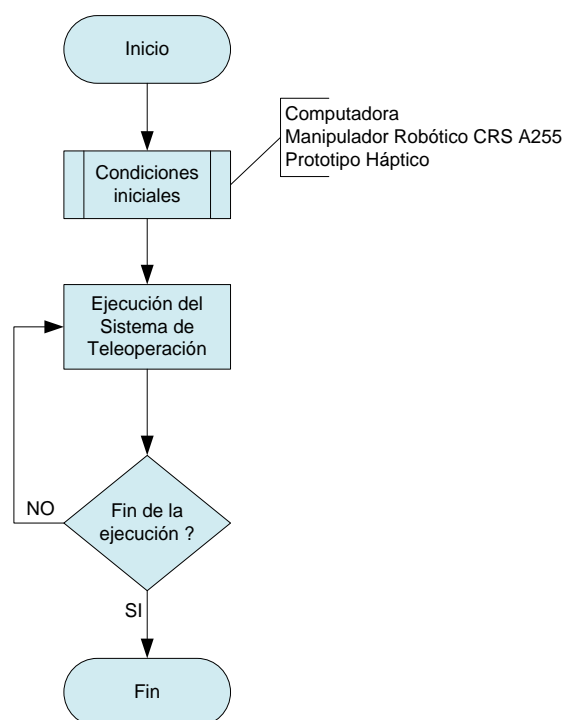
**Figura. 5.8. Integración del Sistema de Teleoperación**

- a)** Dispositivo Háptico
- b)** Acondicionamiento de la señal (divisor de tensión)
- c)** Tarjeta de adquisición de datos (NI - 9229)
- d)** Interfaz USB
- e)** Software de Control (Labview 8.5)
- f)** Interfaz Serial RS 232
- g)** Controlador C500

En resumen el diagrama de la Figura 5.8 se interpreta como sigue, el software de control programado en LABVIEW 8.5 (e) está encargado de la comunicación serial (f) con el controlador C500 (g) así como la comunicación USB (d) con la tarjeta NI-9229 (c).

Los datos obtenidos del acondicionamiento de la señal (b) y a través de la tarjeta de adquisición son procesados por el software de control donde se hallan coordenadas (X, Y) del elemento final del dispositivo háptico (a), para posteriormente generar un comando de movimiento y enviarlo al sistema robótico CRS - A255 alcanzando finalmente el punto (X', Y'), coordenada a escala del punto hallado en el dispositivo háptico.

El funcionamiento del Sistema de Teleoperación se ejecuta de acuerdo al diagrama de bloques ilustrado en la Figura 5.9.



**Figura. 5.9. Funcionamiento del Sistema de Teleoperación**

### 5.2.1 Condiciones iniciales de funcionamiento

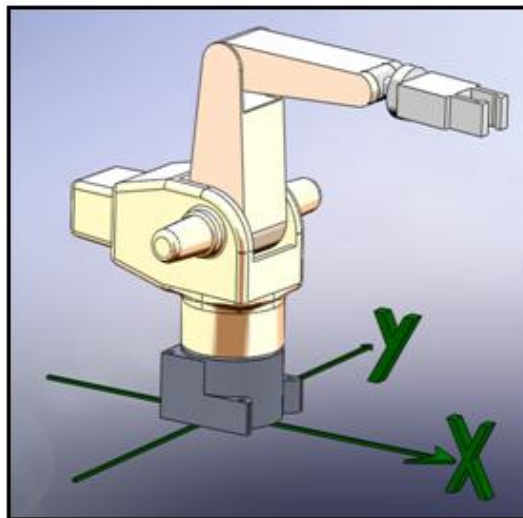
Para un correcto funcionamiento del Sistema de teleoperación son necesarias varias condiciones iniciales para la PC, el manipulador industrial CRS A255 y el prototipo háptico, las cuales se detallan a continuación:

*Para la PC:*

- ❖ Instalar la plataforma de programación LABVIEW 8.5 o superior junto con el software Measurement & Automation.
- ❖ Instalar el complemento DAQmx para la base de datos de tarjetas de adquisición.
- ❖ Disponer mínimo de 2 puertos USB libres, para la tarjeta de adquisición NI-9229 y la interfaz USB-Serial.

*Para el Sistema Robótico CRS-A255:*

- ❖ Encender el controlador C500.
- ❖ Colocar el manipulador industrial en la posición inicial (HOME) utilizando el teach pendant, posición ilustrada en la Figura 5.10.

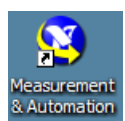


**Figura. 5.10. Posición inicial (HOME) – Manipulador industrial CRS A255**

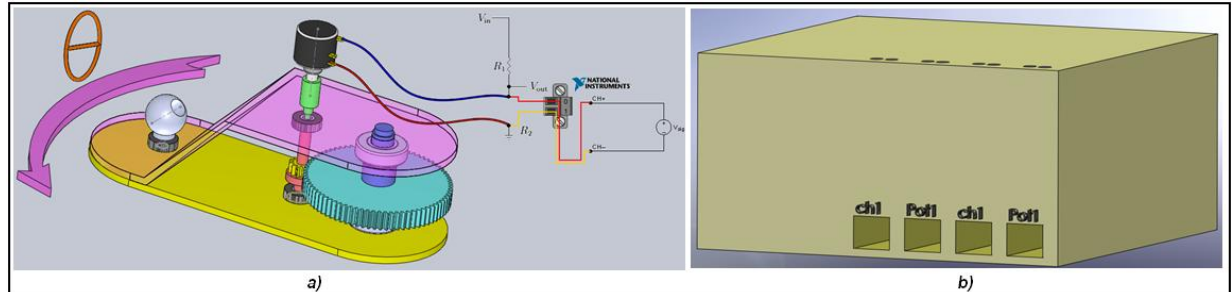
*Para el prototipo háptico:*

- ❖ Conectar la tarjeta NI - 9229 a la computadora y esperar su detección

por el software

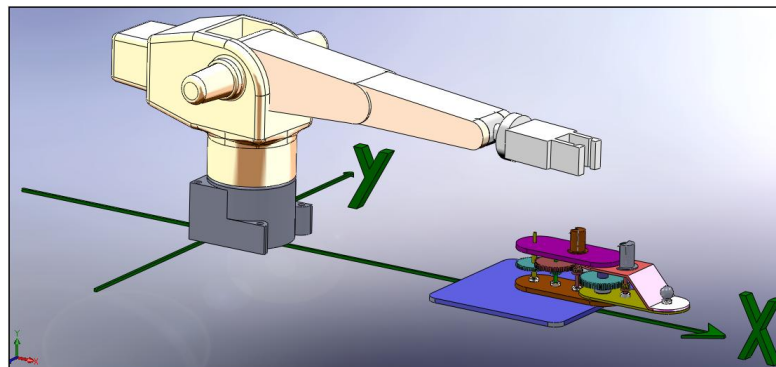


- ❖ Conectar los sensores y los canales de la tarjeta NI-9229 con las borneras correspondientes en la caja de la fuente de voltaje ilustrada en las Figura 5.11 a) y b) respectivamente.



**Figura. 5.11. a) Diagrama de conexión entre el dispositivo háptico y la tarjeta de adquisición. b) Fuente de voltaje para la adquisición de datos**

- ❖ Alinear el prototipo háptico (sus dos eslabones extendidos) con el eje X del manipulador industrial como lo muestra la Figura 5.12.



**Figura. 5.12. Alineación entre el manipulador industrial CRS A255 y el dispositivo háptico**

### 5.2.2 Ejecución del Sistema de Teleoperación

Una vez cumplidas estas condiciones iniciales se debe abrir el panel frontal de los programas **Principal.vi** y **Stop\_Global.vi**, los cuales constituyen la interfaz de usuario (Figura 5.13) donde se puede monitorear y configurar ciertos parámetros del funcionamiento del sistema de teleoperación, a continuación se explica cada etapa de la ejecución del programa:

- ❖ A: Corresponde a la configuración de la comunicación serial, indica valores ya establecidos y no configurables, garantizando el correcto funcionamiento del programa.
- ❖ B: En esta sección de la interfaz se indica el ángulo de giro de cada articulación tomando como 0 grados el eje X del manipulador industrial.
- ❖ C: La cinemática directa muestra la coordenada (X, Y, Z), la cual se desea alcanzar con el manipulador industrial, donde el valor de Z es constante por tratarse del movimiento en un solo plano.
- ❖ D: En esta parte de la interfaz se muestra el comando constituido por todos los parámetros de posición, los cuales están siendo enviados al controlador C500.
- ❖ E: Se muestra la ventana del botón STOP, el cual detiene el movimiento actual del manipulador industrial y lo hace mover a su posición inicial, detiene el programa y finaliza la sesión de comunicación entre la PC y el controlador C500.



Figura. 5.13. Interfaz de usuario del Sistema de Teleoperación

### 5.2.3 Captura de pantallas de la ejecución del programa

Conociendo ya las condiciones iniciales de funcionamiento del sistema de teleoperación se muestra a continuación la captura de las pantallas de la ejecución del software de control.

Al iniciar el funcionamiento del programa **Principal.vi** inmediatamente se mostrará la pantalla correspondiente a la Figura 5.14, donde se dispone al usuario el botón INICIALIZAR, al presionarlo enviará la secuencia de inicialización de la comunicación entre la PC y el controlador C500 configurando a este último en modo inmediato, es decir, obedecerá la ejecución del comando enviado.



Figura. 5.14. Inicializar la comunicación

Después de haber inicializado la comunicación entre la PC y el controlador C500, el usuario deberá presionar el botón READY (Figura 5.15), condición necesaria para iniciar el movimiento del manipulador industrial desde su posición inicial.





Figura. 5.15. Sistema listo

A pesar de no mostrarse en la interfaz de usuario el hecho de haber alcanzado la posición inicial en el manipulador industrial, se enviará al controlador C500 el comando NOHELP, necesario para cancelar el retorno de partes del comando hacia la computadora y evitar errores de sintaxis.

Una vez alcanzada esta etapa del programa se iniciará una secuencia de lazo infinito obteniendo los ángulos de las articulaciones del dispositivo háptico y convirtiéndolas en coordenadas a donde deberá llegar el manipulador industrial.

El indicador **En movimiento** estará encendido siempre y cuando la coordenada a enviar al controlador sea válida (Figura 5.16), evitando errores de cálculo cinemático y un posible daño en la estructura del manipulador industrial. Cuando dicha coordenada no sea válida o esté fuera del área de trabajo especificada, el indicador se apagará y no permitirá el movimiento del manipulador mientras el prototipo no haya cambiado de posición y la coordenada a enviarse sea nuevamente válida, continuando así el funcionamiento normal del sistema de teleoperación.



Figura. 5.16. Validación de movimiento

Cuando el usuario decida detener el funcionamiento del sistema de teleoperación necesitara simplemente presionar el botón STOP (Figura 5.17). Esta acción detendrá el movimiento actual del manipulador para posteriormente colocarlo en su posición inicial y finalmente cerrar la comunicación entre la PC y el controlador C500.

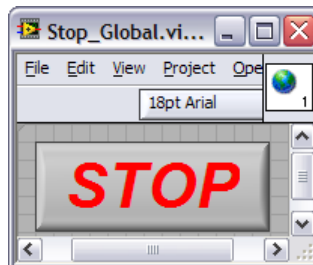


Figura. 5.17. Botón de parada (STOP)

### 5.3 PRUEBAS Y RESULTADOS

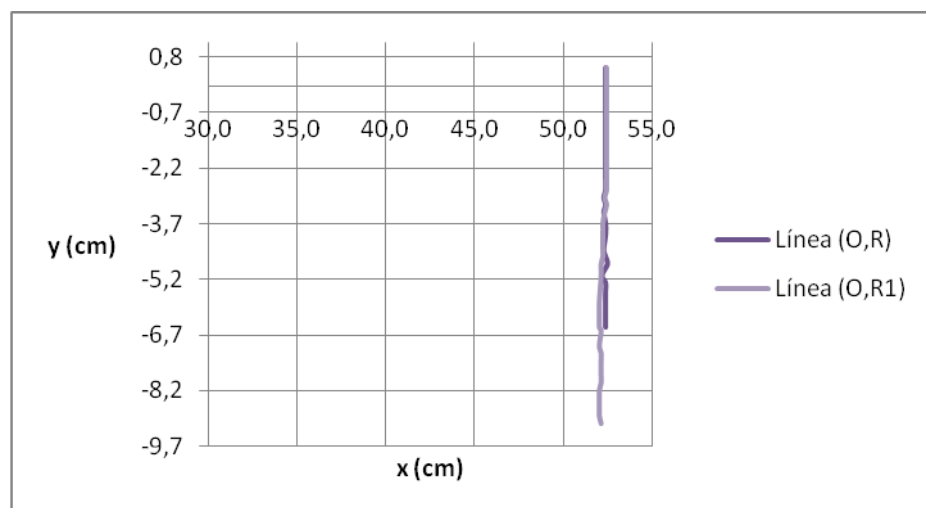
Con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema de teleoperación se ha escogido el método prueba y error debido a la característica del sistema como seguidor de movimiento.

Como primer parámetro se determinará la tolerancia del sistema y en cuanto a pruebas de trazo se iniciará con la marcación de puntos conjuntamente con el parámetro de repetibilidad, para finalizar con el trazo de figuras geométricas como: líneas, polígonos, arcos y circunferencias.

### 5.3.1 Tolerancia del Sistema

La tolerancia del sistema de teleoperación está determinada por el juego natural del tren de engranes en la primera articulación, debido al mayor número de puntos de contacto entre engranes. El juego natural entre dos engranes se considera como el ángulo de giro dentro del cual los engranajes pierden contacto entre sí, es decir, mientras mayor sea el número de contactos mayor será el juego natural.

Para definir dicho parámetro en el sistema de teleoperación de este proyecto se trazó dos segmentos de recta ( $OR$ ,  $OR_1$ ), la primera representa el movimiento hasta antes de vencer el juego del tren de engranes y la segunda después, la tabla de resultados se muestra en el Anexo 9 y su respectivo gráfico en la Figura 5.18.



**Figura. 5.18. Tolerancia del sistema de teleoperación**

La tolerancia para el eje X tiene un valor de  $\pm 0,3$  (cm) y en el eje Y alcanza un valor de  $\pm 2,6$  (cm).

### 5.3.2 Trazo por puntos

Para evaluar el desempeño del sistema de teleoperación en la ubicación de puntos en el plano cartesiano se han realizado pruebas de ubicación hacia los puntos definidos como A, B, C (Figura 5.19).

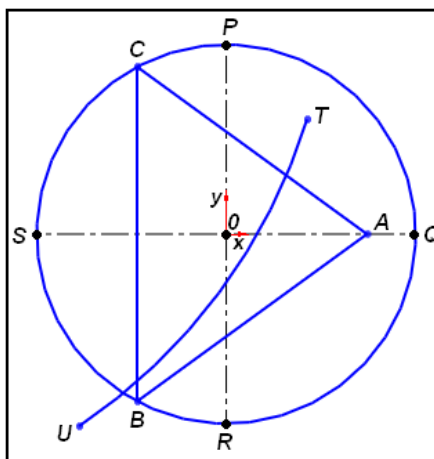


Figura. 5.19. Diagrama para pruebas de trazo del sistema de teleoperación

Los resultados obtenidos en el manipulador robótico (A1, B1, C1) y en el dispositivo háptico (A, B, C) corregidos la escala se muestran en el Anexo 9 y su respectivo gráfico en la Figura 5.20.

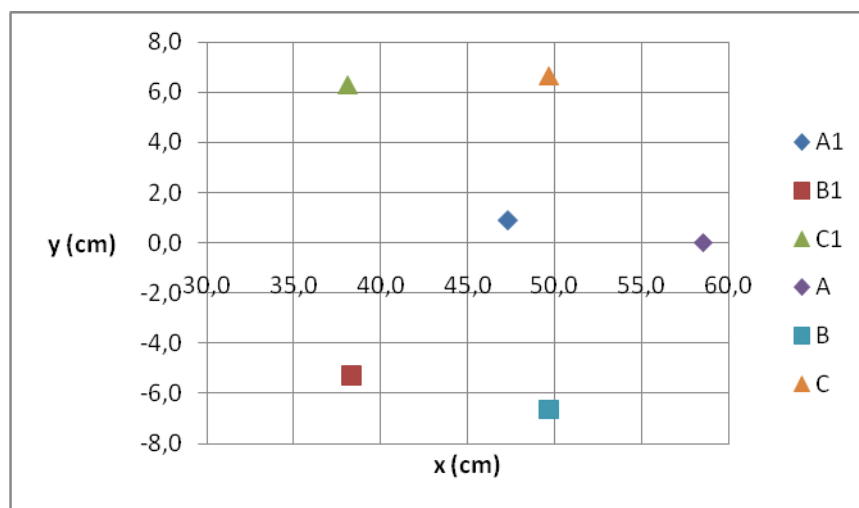


Figura. 5.20. Trazo por puntos – Sistema de Teleoperación (Dispositivo Háptico)

De acuerdo a los datos anteriores se ha calculado la desviación y el error porcentual, en la Tabla 5.1 se indican los resultados.

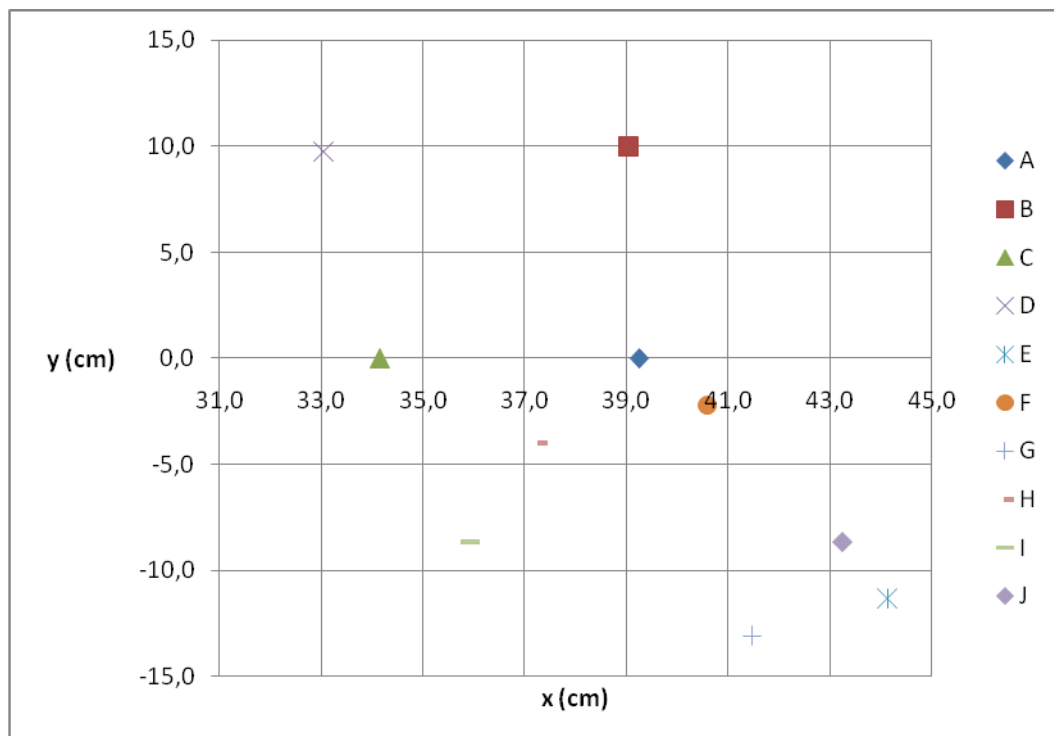
	X	Y
<b>Desviación máxima (cm)</b>	11,6	1,4
<b>MAX error porcentual (%)</b>	23,3	20,3

**Tabla. 5.1. Desviación y Error porcentual – Trazo por puntos**

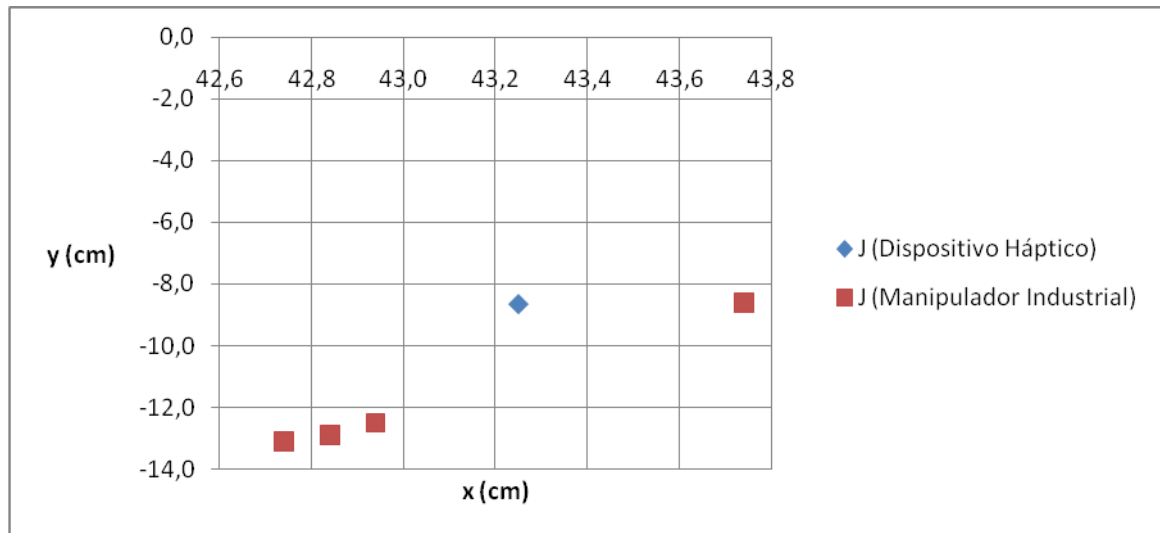
### 5.3.2.1 Repetibilidad

Para determinar la **repetibilidad** del sistema se tomaron 10 puntos (Figura 5.21) con 100 repeticiones de medida para cada uno, de los datos obtenidos se tomo el punto con el mayor número de repeticiones y se calculó el porcentaje de acuerdo al valor del alcance.

En el punto J se obtuvo el mayor número de repeticiones (Figura 5.22), alcanzando una repetibilidad del 51% para X y de 98% para el eje Y. Los resultados del resto de puntos junto con los valores de repetición se encuentran en el Anexo 9.



**Figura. 5.21. Puntos para el cálculo de la repetibilidad del sistema**



**Figura. 5.22. Punto con mayor número de repeticiones (J)**

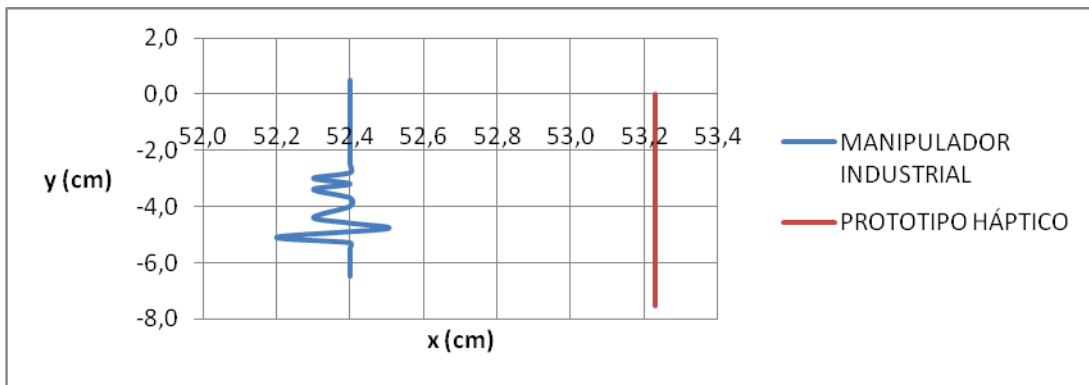
### 5.3.3 Trazo de figuras

Para evaluar el desempeño del sistema de teleoperación en el trazo de formas se han realizado pruebas con las siguientes figuras geométricas:

- a)** Línea (OR)
- b)** Polígono (Triángulo ABC)
- c)** Arco (PQ, UT)
- d)** Circunferencia (PQRS)

#### 5.3.3.1 Trazo de línea

El segmento de recta OR de la Figura 5.19 se utilizó para verificar el trazo de una línea utilizando el sistema de teleoperación. Los datos obtenidos se encuentran en el Anexo 9 y su gráfico correspondiente en la Figura 5.23.



**Figura. 5.23. Trazo de línea – Sistema de Teleoperación**

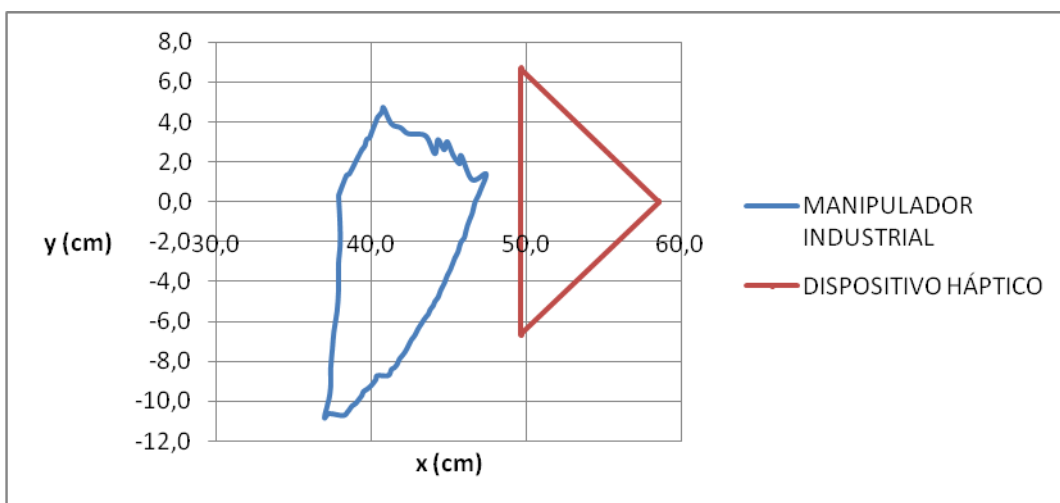
De acuerdo a los datos anteriores se ha calculado la desviación y el error porcentual, en la Tabla 5.2 se indican los resultados.

	X	Y
<b>Desviación máxima (cm)</b>	1,0	0,5
<b>MAX error porcentual (%)</b>	1,9	32,4

**Tabla. 5.2. Desviación y Error porcentual – Trazo de línea**

### 5.3.3.2 Trazo de polígono

Se ha elegido el triángulo ABC (Figura 5.19) para verificar el trazado de un polígono, la tabla de resultados se indica en el Anexo 9 y el gráfico correspondiente en la Figura 5.24.



**Figura. 5.24. Trazo de polígono – Sistema de Teleoperación**

De acuerdo a los datos anteriores se ha calculado la desviación y el error porcentual, en la Tabla 5.3 se indican los resultados.

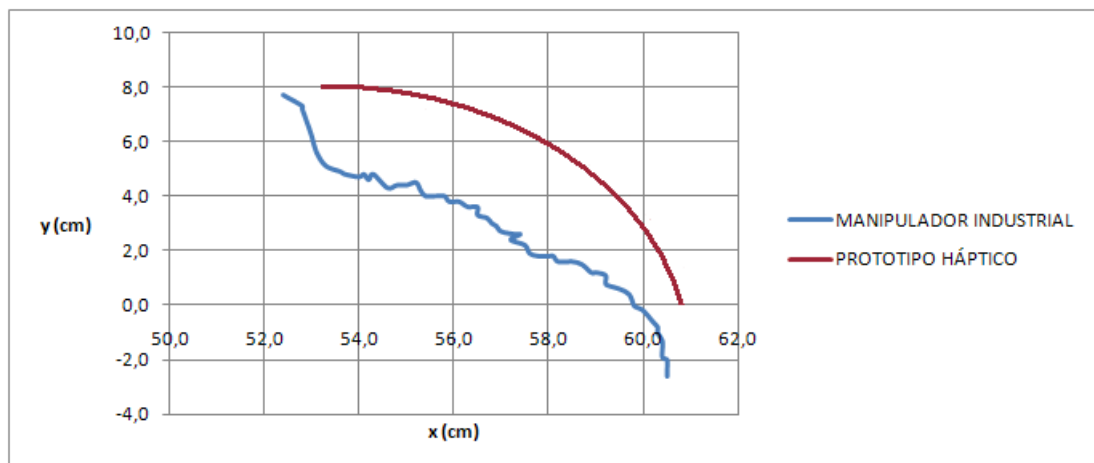
	X	Y
<b>Desviación máxima (cm)</b>	12,7	4,1
<b>MAX error porcentual (%)</b>	25,5	62,3

**Tabla. 5.3. Desviación y Error porcentual – Trazo de polígono**

### 5.3.3.3 Trazo de arco

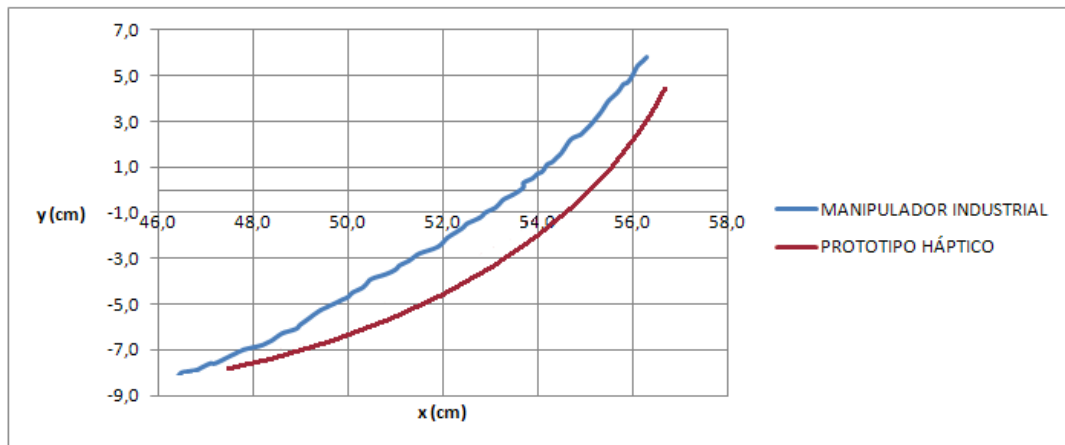
Para verificar el funcionamiento de las articulaciones del dispositivo háptico se ha trazado el arco PQ utilizando dos articulaciones y el arco UT utilizando únicamente la segunda articulación, el trazo del dispositivo háptico se puede visualizar en la Figura 5.19.

Las tablas obtenidas en ambos casos se encuentran en el Anexo 9 y sus correspondientes gráficos se indican en las Figuras 5.25 y 5.26.



**Figura. 5.25. Trazo de arco PQ – Sistema de Teleoperación**





**Figura. 5.26. Trazo de arco UT – Sistema de Teleoperación**

De los datos anteriores se obtuvo los siguientes valores de desviación y error porcentual (Tablas 5.4 y 5.5).

	X	Y
<b>Desviación máxima (cm)</b>	0,1	4,4
<b>MAX error porcentual (%)</b>	0,3	97,3

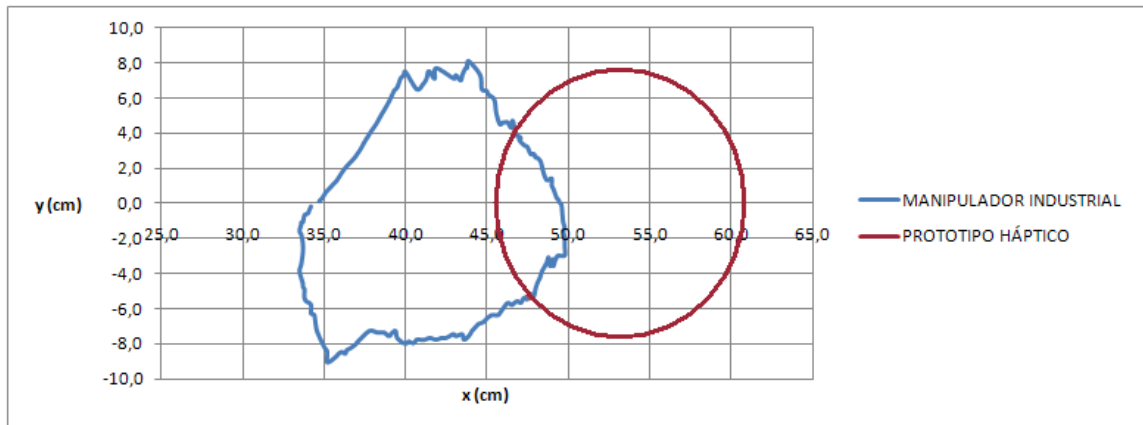
**Tabla. 5.4. Desviación y error porcentual – Trazo de arco PQ**

	X	Y
<b>Desviación máxima (cm)</b>	0,1	4,8
<b>MAX error porcentual (%)</b>	0,3	486,1

**Tabla. 5.5. Desviación y error porcentual – Trazo de arco UT**

#### 5.3.3.4 Trazo de circunferencia

Finalmente se realizó el trazo de la circunferencia descrita por los puntos PQRS en la Figura 5.19. La tabla con los resultados obtenidos en el manipulador industrial y el dispositivo háptico se detallan en el Anexo 9 y la Figura 5.27 indica el gráfico de los datos antes mencionados.



**Figura. 5.27. Trazo de circunferencia – Sistema de Teleoperación**

El cálculo de la desviación y el error porcentual se indica en la Tabla 5.6.

	X	Y
<b>Desviación máxima (cm)</b>	17,1	0,9
<b>MAX error porcentual (%)</b>	33,0	15,6

**Tabla. 5.6. Desviación y error porcentual – Trazo de circunferencia**

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 CONCLUSIONES**

- ❖ El dispositivo háptico fue diseñado e implementado para manipular el movimiento del robot CRS A255 en un solo plano poniendo en marcha el sistema de teleoperación.
- ❖ El dispositivo háptico en dos dimensiones fue caracterizado como un robot SCARA en sus dos primeras articulaciones, el largo de sus eslabones fue calculado en función de la sensibilidad definida en 1mm, alcanzando la mitad de la longitud de los eslabones del manipulador industrial, es decir 12,7 cm. El área cubierta por el prototipo fue del 20% del área definida con una altura de  $z = 25.4$  cm en el manipulador industrial.
- ❖ Para darle una característica háptica al dispositivo diseñado se implementó un sistema de tren de engranes para cada articulación, con la finalidad de añadir a la estructura una fuerza inercial opuesta al movimiento generado por el usuario. En la primera articulación se utilizaron cuatro engranes y en la segunda articulación dos engranes, siendo la fuerza mínima igual a  $F = 5.46 \times 10^{-3} N$  para generar movimiento en la estructura mecánica.

- ❖ El software de control para la interfaz de comunicación entre la estructura mecánica del dispositivo háptico y el robot CRS A255 fue desarrollado bajo la plataforma de programación gráfica Labview 8.5, por la facilidad al momento de realizar la adquisición de datos, comunicación serial, cálculos matemáticos y también por ser un software estándar a nivel mundial en la implementación de instrumentos virtuales a nivel de laboratorio.
- ❖ Se integró el sistema dispositivo háptico y el manipulador industrial CRS A255 a través de un sistema de control constituido por las interfaces serial RS-232 (computadora/Controlador C500) y USB (computadora/dispositivo háptico), exponiendo el comportamiento del sistema mediante una interfaz de usuario fácilmente comprensible dividida en cinco regiones importantes: inicialización de la comunicación, adquisición de datos, cinemática directa, envío de comandos de movimiento al controlador del robot y fin de la sesión.
- ❖ Utilizando un monitor de puerto serial se determinó la existencia de una secuencia de inicio de sesión entre el controlador C500 y la computadora al ejecutar el modo terminal en Robcomm. De igual forma se comprobó el uso de código ASCII al momento de enviar cualquier comando del RAPL II.
- ❖ Gracias al descubrimiento del protocolo de comunicación entre la computadora y el controlador C500 hemos abierto la arquitectura del sistema robótico, haciendo posible el uso de cualquier software provisto de comunicación serial, esta característica permite aumentar la programabilidad del manipulador industrial CRS A255.
- ❖ El dispositivo háptico fue construido en materiales livianos, resistentes y de fácil maquinado como duralón (ejes de engranes), plástico ABS (engranes) y plástico PVC (eslabones), los cuales dan estética a la estructura implementada a la vista del operador.

- ❖ Utilizando el método prueba y error en el sistema de teleoperación se realizaron pruebas de trazos por puntos y de figuras geométricas, siendo el nivel de dificultad mayor el trazo de una circunferencia. En cuanto al trazo por puntos se determinó la repetibilidad alcanzada en un valor de 51% para el eje X y de 98% para el eje Y. En el trazo de la circunferencia se determinó la máxima desviación en el eje X con un valor de 17,1 cm y de 0.9 cm en el eje Y; con respecto al error porcentual se calculó el 33% para el eje X y el 15,6% para el eje Y. Por tanto el sistema de teleoperación implementado en este proyecto es aplicable para la marcación de puntos, no así para el trazo de curvas continuas.
  
- ❖ La tolerancia de éste sistema de teleoperación tiene un valor de  $\pm 0,3$  cm en X y de  $\pm 2,6$  cm en el eje Y, está determinada por el juego natural del tren de engranes de la primera articulación, debido a los cuatro engranes y dos puntos de contacto de los cuales está constituida. Es éste un parámetro trascendente en la pérdida de precisión en cuanto al trazo de curvas continuas

## 6.2 RECOMENDACIONES

- ❖ Para reducir al máximo posible la tolerancia del sistema de teleoperación utilizando el sistema de tren de engranes para generar realimentación de fuerza, se recomienda utilizar como máximo dos engranes por cada articulación.
- ❖ De aplicar otro tipo de realimentación de fuerza en el dispositivo háptico, es preferible colocar el sensor de posición directamente en el eje de la articulación, esto reduciría aún más la tolerancia del sistema permitiendo el trazo de curvas continuas.
- ❖ El eje principal de cada articulación del tren de engranes se lo debe fabricar en materiales de mayor grado de dureza, puede ser aluminio o bronce. Esto evita problemas de cabeceo de la estructura y mayor error en la precisión en el funcionamiento del sistema de teleoperación.
- ❖ Es necesario realizar un análisis más profundo de la comunicación entre la computadora y el controlador C500 en un proyecto posterior, incluyendo todo el volumen de trabajo del manipulador CRS A255 a fin de reducir retardos en la comunicación y problemas de error en la sintaxis de los comandos de movimiento.
- ❖ Si se busca alcanzar una respuesta en tiempo real entre el movimiento del dispositivo háptico y el manipulador industrial es necesario trabajar en parámetros dinámicos del robot, lo cual provoca un movimiento más fluido utilizando un mínimo de recursos en cuanto al funcionamiento de los servomotores del manipulador industrial.

- ❖ Para obtener realimentación de fuerza en un futuro diseño de dispositivos hápticos se pueden integrar en las articulaciones actuadores como: motores, músculos de alambre o imanes. Los cuales brindan una resistencia controlada al movimiento del usuario, dando la característica necesaria para alcanzar tiempo real entre el dispositivo maestro y esclavo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] [http://www.gmr.v.es/~cgarre/TDRV\\_Hapticos\\_Cgarre.pdf](http://www.gmr.v.es/~cgarre/TDRV_Hapticos_Cgarre.pdf),  
Técnicas y Dispositivos para Realidad Virtual.
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/H%C3%A1ptica>, Háptica.
- [3] Brooks, F. P., Jr., 1977, << *The computer "scientist" as tool smith--studies in interactive computer graphics* >>, Proceedings of IFIP 1977, 625-634.
- [4] <http://www.acm.org/crossroads/espanol/xrds3-3/haptic.html#8>,  
Factores humanos en Interfaces Hápticas.
- [5] <http://www.egrafica.unizar.es/ingegraf/pdf/Comunicacion17018.pdf>,  
Interfaces Hápticas. Aplicación en entornos virtuales.
- [6] Barrientos, A.; Peñín, L.; Balaguer, C.; Aracil, R. (2007), << *Fundamentos de Robótica* >>, Segunda Edición, Editorial McGraw Hill, Impreso en España.
- [7] CRS Robotics Corporation (1993), << *Robot Arm Installation and Operation Manual* >>, A255 Series Small Industrial Robot System, Ontario – Canadá
- [8] Coughlin, R.; Driscoll, F. (1999), << *Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales* >>, Quinta Edición, Editorial Prentice Hall, Impreso en México, 128-129.



## ***ANEXOS***

***ANEXO 1***

***Comandos para ROBCOMM***

<b>Comandos de Movimiento</b>	<b>Descripción</b>
ALIGN	Alinea la herramienta con el eje mayor que se encuentre más cerca
APPRO	Mueve el robot una distancia especificada desde la posición actual
CIRCLE	Mueve el robot en un camino circular definido
CPATH	Ejecuta un trazo continuo
CTPATH	Programa un trazo continuo incluyendo puntos aprendidos
DEPART	Mueve el robot fuera de su localización actual
FINISH	Termina un movimiento completo y continua la programación
GAIN	Cambia la ganancia de posición de los servos
GOPATH	Ejecuta un trazo continuo programado con CTPATH
HALT	Detiene todos los movimientos y setea "mantener el bloqueo" en la entrada
JOG	Mueve el TCP (Punto Central de la Herramienta) un incremento cartesiano (X, Y, Z)
REMOTE	Permite a un usuario remoto acceder a los comandos de movimiento del brazo
X	Mueve el TCP un incremento en la dirección X
Y	Mueve el TCP un incremento en la dirección Y
Z	Mueve el TCP un incremento en la dirección Z
YAW	Gira la herramienta alrededor del TCP por un incremento en el ángulo de YAW (giro)
PITCH	Gira la herramienta alrededor del TCP por un incremento en el ángulo de PITCH (inclinación)
ROLL	Gira la herramienta alrededor del TCP por un incremento en el ángulo de ROLL (torsión)
JOINT	Mueve una articulación por un desplazamiento angular indicado
LIMP	Desactiva los seguros de todos los servos
LOCK	Bloquea el movimiento de una articulación
MA	Mueve todas las articulaciones en un valor radial absoluto
MI	Mueve todas las articulaciones en un valor radial incremental
MOTOR	Selecciona un motor por un número indicado de pulsos
MOVE	Mueve el TCP a una localización específica
NOLIMP	Activa los seguros de los servos
ONLINE	Setea el modo ONLINE para todos los comandos de movimiento siguientes
READY	Mueve el brazo a la posición de READY
SPEED	Setea velocidad para el movimiento del robot
UNLOCK	Permite moverse a las articulaciones seleccionadas
VIA	Mueve a través de los puntos seleccionados en el modo JOINT o WORLD

<b>Comandos de Entrada/Salida</b>	<b>Descripción</b>
ARM	Habilita o deshabilita la fuente de poder del brazo
CONFIG	Setea la configuración en el puerto RS232
DEVICE	Selecciona el puerto RS232 para usar
IFPOWER	Revisa el estado de la fuente de poder del brazo
IFSIG	Estado condicional basado en una entrada (s) seleccionada
IGNORE	Apaga las interrupciones automática del robot
INPUT	Ingresa un dato durante la corrida de un programa
ONPOWER	Espera a que se encienda la fuente de poder del brazo
ONSIG	Enciende las interrupciones automáticas del robot
OUTPUT	Enciende las salidas seleccionadas
PRINTF	Información de la salida string estructurada en el puerto seleccionado
SERIAL	Despliega el estado del puerto RS232
TRIGGER	Cambia el estado de una salida digital en el movimiento indicado
WAIT	Espera por una condición seleccionada en una entrada digital del puerto
<b>Comandos de Sistema</b>	<b>Descripción</b>
?	Muestra la lista de comandos
;	Agrega una línea de comentario
ALLOC	Particiona y borra la memoria del robot
AXSTATUS	Muestra el estatus de la tarjeta de cada eje
COPY	Duplica un programa
DELETE	Borra un programa
DPROG	Igual que DELETE
DISABLE	Apaga un interruptor por software
ENABLE	Enciende un interruptor por software
FREE	Muestra el estado del uso de la memoria
HELP	Enciende el constructor de sintaxis
HIMEM	Reserva una parte del buffer de programa para otros usos
IORD	Lee un valor de byte o palabra en el puerto de salida del 80286
IOWR	Escribe el valor de una constante o variable en el puerto de salida del 80286
LISTP	Enlista los programas de un dispositivo seleccionado
LPROG	Igual que LISTP
MEMRD	Lee el contenido de una dirección de memoria
MEMWR	Escribe una constante o variable en una dirección de memoria
NEW	Borra un espacio de memoria
NOHELP	Apaga el constructor de sintaxis
NOMANUAL	Deshabilita el modo Manual
NOTRACE	Deshabilita el modo Trace
PASSWORD	Permite el acceso a los comandos de nivel Monitor
RENAME	Cambia al nombre de un programa
@@SETUP	Altera los controles de operación por defecto del controlador
STATUS	Despliega el estado que opera la aplicación del robot
SYSTEM	Despliega el estado de la configuración de hardware
@@XNET	Configura la red interna

<b>Comandos de flujo de programa</b>	<b>Descripción</b>
ABORT	Termina la ejecución del programa y detiene el movimiento
GOSUB	Pasa el control a un sub-programa especificado
GOTO	Salto incondicional a un número de línea
IF	Ejecuta si la expresión variable es verdadera
IFPOWER	Ejecuta en el estado de encendido del robot
IFSIG	Ejecuta en el estado de las estradas seleccionadas
IFSTART	Ejecuta en el estado del interruptor Auto Start
IFSTRING	Ejecuta en el estado de una comparación de string
ONPOWER	Espera a que la alimentación del brazo sea encendida
ONSIG	Enciende las interrupciones del robot
ONSTART	Espera a que el interruptor Auto Start sea presionado
PAUSE	Detiene el flujo del programa hasta el comando PROCEED
PROCEED	Continúa el flujo del programa después del comando PAUSE o el "soft-abort" (<Ctrl-A)
RETRY	Sigue una corrección de error, éste comando reintentará la línea
RETURN	Regresa el control de la subrutina al programa principal
RUN	Inicia un programa varias veces
STOP	Comando que indica la finalización de un programa
<b>Comandos Miscelánea</b>	<b>Descripción</b>
DELAY	Indica de un tiempo de retardo
DIR	Enlista los nombres de los programas existentes
EDIT	Ingresa una línea de comando o crea un nuevo programa
EXECUTE	Ejecuta un programa en lenguaje de maquina del 80286
NEXT	Salto simple a través del programa
PROCEED	Resume la ejecución de un programa
RUN	Ejecuta un programa desde la memoria
TRACE	Despliega las líneas de programa cuando una instrucción es ejecutada
<b>Comandos para la asignación de localización del robot</b>	<b>Descripción</b>
ACTUAL	Define una localización en la posición actual del robot incluyendo el error posicional
DLOCN	Borra una localización almacenada
HERE	Define una localización en la posición actual del robot
LISTL	Enlista una o todas las direcciones almacenadas en memoria
LLOC	Igual que LISTL
OFFSET	Redefine la coordenada base
POINT	Define una localización
SET	Igual una nueva localización con una localización existente
SHIFT	Cambia una localización por un incremento equivalente en X, Y, Z
SHIFTA	Cambia una localización por un incremento equivalente en una o toda las coordenadas

**ANEXO 2**

***Hoja Técnica - Robot CRS A255***

## INDUSTRIAL ROBOT ASYSTEM

# A255

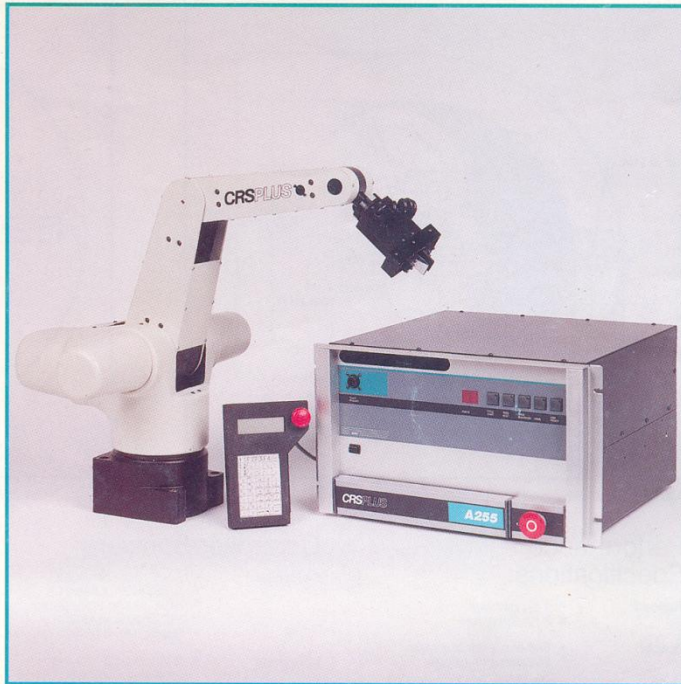
- Articulated robot
- 5 degrees of freedom
- 2 Kg payload
- 2.0 second cycle time
- 0.05 mm repeatability
- 560 mm reach
- C500 controller

CRS Robotics takes the risk out of high performance robotic systems. Our robots offer affordable automation to industry with low initial cost, short start-up time, and fast payback... often as short as six months.

The A255 delivers high performance and reliability that is unmatched by other small articulated robots in its price range. The A255 offers the highest speed and best repeatability in a small articulated robot. It will automate undesirable tasks, improve quality through high repeatability and increase production rates.

As with all CRS Robots, the A255 is programmed using the RAPL-II programming language. This simple, English-like language is easy to learn, easy to use and will handle the most complex of tasks. Programming features include continuous path, joint interpolation, point-to-point relative motions, straight line plus the ONLINE path planner in joint or straight line mode for unmatched throughput.

With 5 degrees of freedom, the A255 Robot performs much like a human arm. In fact, many tasks done by humans can be handled by the A255 Robot. Over 900 CRS Robots are working in industry performing such tasks as product testing, laboratory automation, spray painting, machine loading and education/research.



The A255 Robot is designed to work with a wide variety of peripherals including rotary tables, bowl feeders, conveyor belts, host computers, vision systems and other advanced sensors.

To assure you of reliable performance, we insist on only the highest standards of quality at every step of our production process. 100% of all components are inspected prior to installation and every robot system must successfully perform a 74 hour thermal cycling burn-in before shipping.

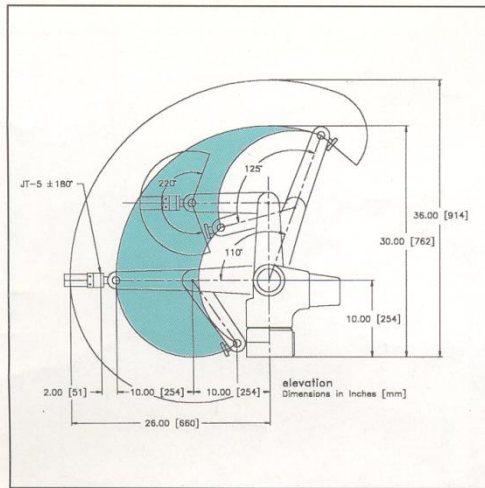
#### Options:

Grippers, ROBCOMM-II host computer software, protective covers for harsh environments, opto-isolated digital I/O buffering, PLC interface for expanded inputs and outputs, homing bracket,

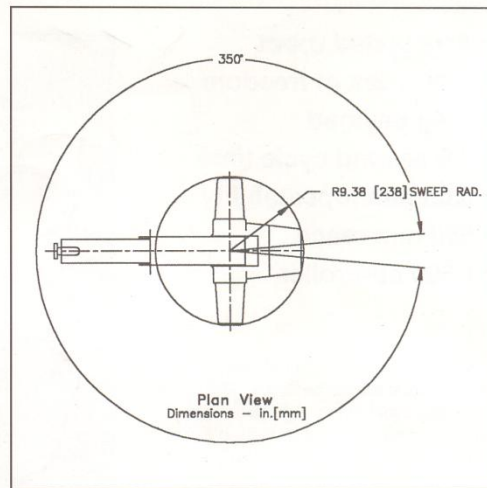
spares kit, operator panel, service manual and software for dispensing and spraying applications.



# A255



A255 Elevation



A255 Plan View

## Performance Specifications:

- Payload:**
- 1 Kg nominal
  - 2 Kg maximum
- Reach:**
- 560 mm without gripper
  - 660 mm with gripper
- Speed:**
- standard pick and place cycle in 1.8 seconds
  - 2.90 m/s in compounded joint interpolated motions
  - 0.46 m/s in linear and path motions
- Repeatability:**
- +/- 0.05 mm

## Mechanical Arm:

- Configuration:**
- Articulated
  - Five degrees of freedom
  - Vertical or inverted mounting
- Drive:**
- DC servo motors with optical encoders
- Transmission:**
- Harmonic drives with pre-loaded drive chains
- Gripper:**
- 4-way pneumatic solenoid
  - Servo gripper connector
- Safety:**
- Workspace reduction using adjustable hard stops

## Controller/Software:

- Controller:**
- C500 robot controller
  - 80286/80287 based
  - RISC based (transputer)
  - PID control algorithm
  - Support for 3 additional axes
- Language:**
- RAPL-II programming language and multi-tasking operating system
- Program:**
- Trace mode for program debugging
- Development:**
- Path, location and program editor
  - ROBCOMM-II (optional)
- Teaching:**
- LIMP mode (lead-by-the-hand)
  - Off-line
  - Teach Pendant
- Path Types:**
- Point-to-Point
  - Straight Line
  - Continuous Path
  - Relative motion paths
  - Blended motion
  - Circular interpolation
- Communication:**
- Dual RS232, 38.4k baud is standard
- Input/output:**
- 16 opto-isolated inputs
  - 4 contact relay outputs
  - 12 opto-isolated outputs (300ma at 24 volts)

- User Memory:**
- 24 VDC isolated power supply for external I/O
  - Expandable using PLC interfaces (optional)
  - 256 Kbytes of battery backed RAM memory
  - 256 Kbytes FLASH memory for non-volatile backup
- Temperature:**
- +10 to +40°C
- Power:**
- 100/115/230 VAC, 60/50 Hz (selectable), 350 VA
- Safety:**
- Meets UL1740/ANSI/RIA 15.06 robot safety standards

## Teach Pendant:

- Configuration:**
- Hand held with 3m cable
- Display:**
- 4 line x 20 character LCD
- Safety:**
- Meets ANSI/RIA 15.02 teach pendant standards

## Physical Characteristics:

- Arm:**
- 17 Kg
- Controller:**
- 31 Kg
  - 267mm x 483mm x 400mm
  - 19 inch rack mountable
- Shipping:**
- 59 Kg

Represented By:



CRS Robotics Corporation  
 5344 John Lucas Drive  
 Burlington, Ontario  
 L7N 6A6  
 Phone: (905) 332-2000 Fax: (905) 332-1114  
 USA Phone: 1-800-365-7587



### **ANEXO 3**

***Materiales para la fabricación de la estructura mecánica del  
Prototipo Uno y del Prototipo Final***

**Duralón:** Es un polímero de ingeniería de la familia del Nylon, principalmente de los compuestos usados en el Nylon 6, Nylon 6,6 y Nylon 12. Ofrece gran flexibilidad, resistencia al impacto y nivel de dureza comparable con el cobre o bronce. Es utilizado principalmente en aplicaciones de moldeado por inyección para fabricar partes de automóviles debido a que es un excelente aislante eléctrico.

**Nylon:** Es un polímero artificial de ingeniería perteneciente al grupo de las poliamidas. Comparable a una fibra textil elástica y resistente, no la ataca la polilla, no precisa planchado y se utiliza en la confección de medias, tejidos y telas de punto, también cerdas y sedales. El nylon moldeado se utiliza como material duro en la fabricación de diversos utensilios, como mangos de cepillos, peines, etc.

**Plástico ABS:** El Acrilonitrilo Butadieno Estireno o ABS es un plástico muy resistente al impacto (golpes) muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos. Se le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes, como son las polioleofinas (polietileno, polipropileno)

El rasgo más importante del ABS es su gran tenacidad, incluso a baja temperatura (sigue siendo tenaz a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Además es duro y rígido, tiene una resistencia química aceptable y baja absorción de agua, por lo tanto buena estabilidad dimensional y alta resistencia a la abrasión. Es común recubrirlo con una capa metálica mediante electrólisis dándole distintos baños de metal.

**Plástico PVC:** El Policloruro de vinilo es un polímero común, termoplástico y reciclable por varios métodos, se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  y se descompone sobre  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El plástico PVC es un polímero por adición y además una resina resultante de la polimerización del cloruro de vinilo o cloroetileno. Tiene una muy buena resistencia eléctrica y a la llama.

En la industria existen dos tipos:

- Rígido: para envases, ventanas, tuberías, las cuales han reemplazado en gran medida al hierro (que se oxida más fácilmente).
- Flexible: cables, juguetes, calzados, pavimentos, recubrimientos, techos tensados...

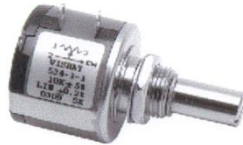
**ANEXO 4**  
***Hoja Técnica - Potenciómetro de Precisión Vishay 534***



# Model 533, 534, 535

Vishay Spectrol

## 7/8" (22.2 mm) Multiturn Wirewound 533: 3 Turns/534: 10 Turns/535: 5 Turns



### FEATURES

- Bushing and servo mount designs available
- Special resistance tolerances to 1 %
- Rear shaft extensions and support bearing
- Metric shaft available
- Dual gang configuration and concentric shafts
- High torque, center tap, slipping clutch on request
- Special markings and front shaft extensions



### Note

- The color of this product may either be black (US market) or blue (other regions)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS			
PARAMETER	MODEL 533	MODEL 534	MODEL 535
Resistance Range - Standard Values	50 Ω to 20 kΩ	100 Ω to 100 kΩ	50 Ω to 50 kΩ
Capability Range	5 Ω to 60 kΩ	10 Ω to 200 kΩ	5 Ω to 100 kΩ
Standard Tolerance	± 5 %	± 5 %	± 5 %
Linearity (Independent)	± 0.25 %	± 0.25 %	± 0.25 %
Noise	100 Ω ENR	100 Ω ENR	100 Ω ENR
Rotation (Electrical and Mechanical)	1080° +10° -0°	3600° +10° -0°	1800° +10° -0°
Power Rating (at 70 °C)	1.0 W	2.0 W	1.5 W
Insulation Resistance	1000 MΩ minimum 500 V <sub>DC</sub>		
Dielectric Strength	1000 V <sub>RMS</sub> minimum 60 Hz		
Absolute Minimum Resistance	Not to exceed linearity x total resistance or 1 Ω, whichever is greater		
Temperature Coefficient	20 ppm/°C (standard values, wire only)		
End Voltage	0.25 % of total applied voltage, maximum		
Phasing	CCW end points - section 2 phased to section 1 within ± 2°		
Taps	Center tap only		

MARKING	
Unit Identification	Manufacturer's name and model number, resistance value and tolerance, linearity specification date code and terminal identification

RESISTANCE VALUES	
Ohms 533:	50R, 100R, 200R, 500R, 1K, 2K, 5K, 10K, 20K
534:	100R, 200R, 500R, 1K, 2K, 5K, 10K, 20K, 50K, 100K
535:	50R, 100R, 200R, 500R, 1K, 2K, 5K, 10K, 20K, 50K

ORDERING INFORMATION/DESCRIPTION								
The Models 533 (3 turns), 534 (10 turns) and 535 (5 turns) can be ordered by stating								
534	B	2	10K	20K	5 %	C	BO10	e4
MODEL	MOUNTING	NUMBER OF SECTIONS	OHMIC VALUE SECTION N° 1	OHMIC VALUE SECTION N° 2	TOLERANCE ON OHMIC VALUE	LINEARITY	PACKAGING	LEAD FINISH
	B: Bushing S: Servo					± 0.25 % (STD)	Box of 10 pieces	

SAP PART NUMBERING GUIDELINES							
534	B	2	103	203	J	C	B10
MODEL	STYLE	NUMBER OF SECTIONS	OHMIC VALUE SECTION N° 1	OHMIC VALUE SECTION N° 2	TOLERANCE ON OHMIC VALUE	LINEARITY	PACKAGING
	B: Bushing S: Servo		103 = 10K	203 = 20K	J: ± 5 % F: ± 1 %	C: ± 0.25 % CUSTOM: L: ± 0.20 % D: ± 0.1 %	Box of 10 pieces

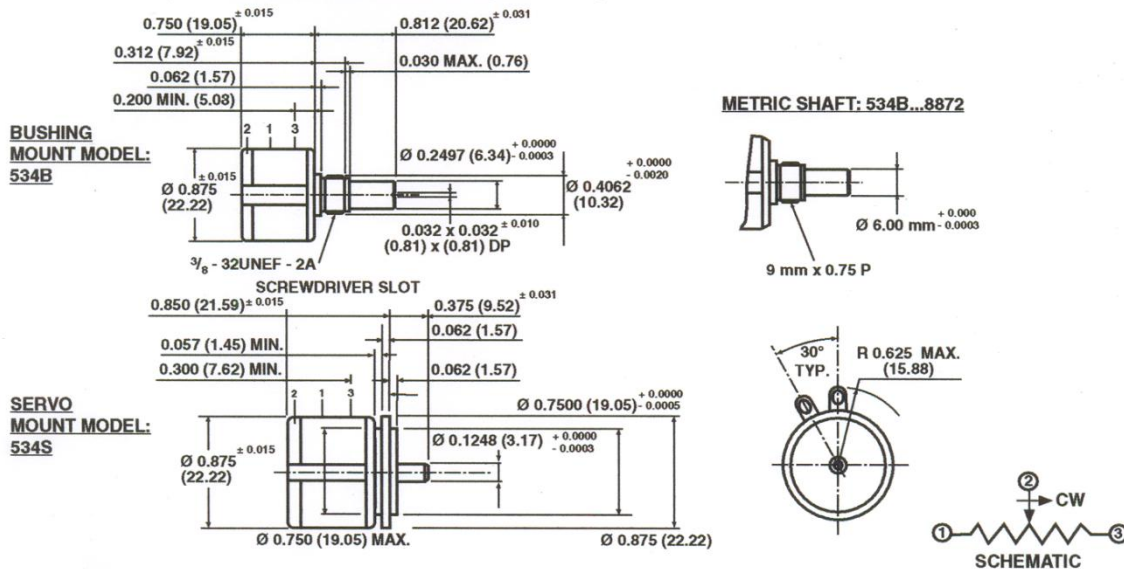
# Model 533, 534, 535



Vishay Spectrol

7/8" (22.2 mm) Multiturn Wirewound  
 533: 3 Turns/534: 10 Turns/535: 5 Turns

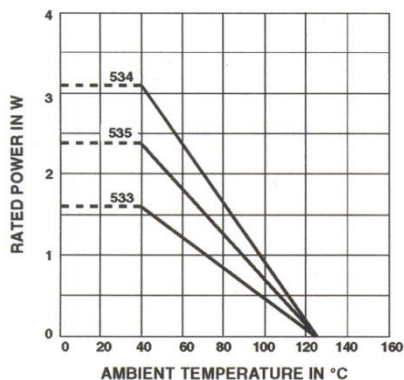
## SINGLE SECTION DIMENSIONS in inches (millimeters)



Mounting hardware, washer and panel nut, nickel plated

MECHANICAL SPECIFICATIONS		
PARAMETER		
Bearing Type	Bushing: Sleeve bearing	Servo: Ball bearing
Torque (Maximums): Starting	<b>534</b>	<b>533/535</b>
Section 1	0.5 oz. - in (36 g - cm)	0.7 oz. - in (50 g - cm)
Section 2	0.9 oz. - in (65 g - cm)	1.1 oz. - in (79 g - cm)
Torque (Maximums): Running	<b>534</b>	<b>533/535</b>
Section 1	0.4 oz. - in (28.80 g - cm)	0.6 oz. - in (43.20 g - cm)
Section 2	0.7 oz. - in (50.40 g - cm)	0.9 oz. - in (64.8 g - cm)
Weight (Maximums)		
Section 1	0.75 oz. (21.26 g)	
Section 2	1.25 oz. (35.44 g)	
Stop Strength	75 oz. - in (static) (5.4 kg - cm)	
Ganging	2 sections maximum	

## POWER RATING CHART



ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS	
Vibration	15 g thru 2000 Hz
Shock	50 g
Rotational Life (Shaft Revolution)	
533	300 000
534	1 000 000
534 (Servo)	> 1 000 000
535	500 000
Load Life	900 h
Temperature Range	- 55 °C to + 125 °C



***ANEXO 5***

***Hoja Técnica - NI USB 9229, NI USB 9239***



Ventas  
Ecuador  
1 800 999 119 pedir enlace a 1  
800 433 3488  
orders@ni.com

## NI USB-9229, NI USB-9239

### Módulos de Entrada Analógica de 24 Bits de 4 Canales

- Aislamiento entre canales de 250 Vrms
- Entradas simultáneas 50 kS/s/canal
- Filtros anti alias para medidas de señales verdaderas
- Rango de  $\pm 60$  V (USB-9229)
- Rango de  $\pm 10$  V (USB-9239)
- Aislamiento de canal a tierra de 2,300 Vrms (5 s continuo)



### Información General

El NI USB-9229 ( $\pm 60$  V) y USB-9239 ( $\pm 10$  V) son módulos de la Serie C de 24 bits de cuatro canales para tener alta velocidad y precisión. Éstos son módulos de entrada analógica de uso general ideales ya que su resolución, velocidad de muestreo y rango de entrada.

Con aislamiento entre canales, su sistema completo incluyendo el dispositivo bajo prueba, están protegidos contra picos de voltaje perjudiciales dentro del rango de aislamiento. Además de la seguridad, el aislamiento elimina errores de medidas causados por lazos a tierra ya que la circuitería frontal del módulo está flotada.

El USB-9229 y USB-9239 utilizan conectores de dos posiciones de terminal de tornillo. Los módulos incluyen los cuatro conectores y usted puede pedir adicionales para usarlos como repuestos o para realizar cambios en el equipo de prueba entre los dispositivos bajo prueba. Esos conectores se venden como modelo NI 9976.

Armazones de liberación de tensión para la seguridad de los cables de señal y protección contra alto voltaje (cant. 4): NI 9971

Conectores extras para módulos de conector de dos posiciones (cant. 10): NI 9976

### Especificaciones

#### Documentos con Especificaciones

- Especificaciones Detalladas
- Hoja de Datos (inglés)

#### Resumen de Especificaciones

#### Resumen de Especificaciones

##### General

Producto	USB-9229
----------	----------



<b>Familia de Productos</b>	<b>Acondicionamiento de Señales</b>
<b>Formato Físico</b>	USB
<b>Sistema Operativo/Objetivo</b>	Windows
<b>Tipos de Medida</b>	Voltaje
<b>Tipo de Aislamiento</b>	Aislamiento Entre Canales
<b>Compatibilidad con RoHS</b>	Si
<b>Acondicionamiento de Señales</b>	Filtro anti-aliasing
<b>Producto</b>	USB-9239
<b>Familia de Productos</b>	<b>Acondicionamiento de Señales</b>
<b>Formato Físico</b>	USB
<b>Sistema Operativo/Objetivo</b>	Windows
<b>Tipos de Medida</b>	Voltaje
<b>Tipo de Aislamiento</b>	Aislamiento Entre Canales
<b>Compatibilidad con RoHS</b>	Si
<b>Acondicionamiento de Señales</b>	Filtro anti-aliasing
<b>Entrada Analógica</b>	
<b>Canales</b>	0 , 4
<b>Canales de una sola terminal</b>	0
<b>Canales Diferenciales</b>	4
<b>Resolución</b>	24 bits
<b>Velocidad de Muestreo</b>	50 kS/s
<b>Máx. Voltaje de Entrada Analógica</b>	60 V
<b>Rango de Voltaje Máximo</b>	-60 V , 60 V
<b>Precisión Máxima del Rango de Voltaje</b>	0.11 V
<b>Rango de Voltaje Mínimo</b>	-60 V , 60 V
<b>Mínima Precisión del Rango de Voltaje</b>	0.11 V
<b>Muestreo Simultáneo</b>	Si
<b>Canales</b>	0 , 4
<b>Canales de una sola terminal</b>	0

<b>Canales Diferenciales</b>	4
<b>Resolución</b>	24 bits
<b>Velocidad de Muestreo</b>	50 kS/s
<b>Máx. Voltaje de Entrada Analógica</b>	10 V
<b>Rango de Voltaje Máximo</b>	-10 V , 10 V
<b>Precisión Máxima del Rango de Voltaje</b>	0.019 V
<b>Rango de Voltaje Mínimo</b>	-10 V , 10 V
<b>Mínima Precisión del Rango de Voltaje</b>	0.019 V
<b>Muestreo Simultáneo</b>	Si
<b>Salida Analógica</b>	
<b>Canales</b>	0
<b>Canales</b>	0
<b>E/S Digital</b>	
<b>Canales Bidireccionales</b>	0
<b>Canales de Entrada Únicamente</b>	0
<b>Canales de Salida Únicamente</b>	0
<b>Número de Canales</b>	0 , 0 , 0
<b>Canales Bidireccionales</b>	0
<b>Canales de Entrada Únicamente</b>	0
<b>Canales de Salida Únicamente</b>	0
<b>Número de Canales</b>	0 , 0 , 0
<b>Contadores/Temporizadores</b>	
<b>Número de Contadores/Temporizadores</b>	0
<b>Número de Contadores/Temporizadores</b>	0
<b>Especificaciones Físicas</b>	
<b>Longitud</b>	9 cm
<b>Ancho</b>	2.3 cm
<b>Altura</b>	9 cm
<b>Conector de E/S</b>	MINI-COMBICON, 3.5 mm (2 Posiciones)
<b>Temperatura de Operación</b>	0 °C
<b>Temperatura de Operación</b>	55 °C

<b>Temperatura de Almacenamiento</b>	-10 °C
<b>Temperatura de Almacenamiento</b>	70 °C
<b>Longitud</b>	9 cm
<b>Ancho</b>	2.3 cm
<b>Altura</b>	9 cm
<b>Conector de E/S</b>	MINI-COMBICON, 3.5 mm (2 Posiciones)
<b>Temperatura de Operación</b>	0 °C
<b>Temperatura de Operación</b>	55 °C
<b>Temperatura de Almacenamiento</b>	-10 °C
<b>Temperatura de Almacenamiento</b>	70 °C

**ANEXO 6**

***Hoja Técnica - Amplificador Operacional LM741***

## LM741 Operational Amplifier

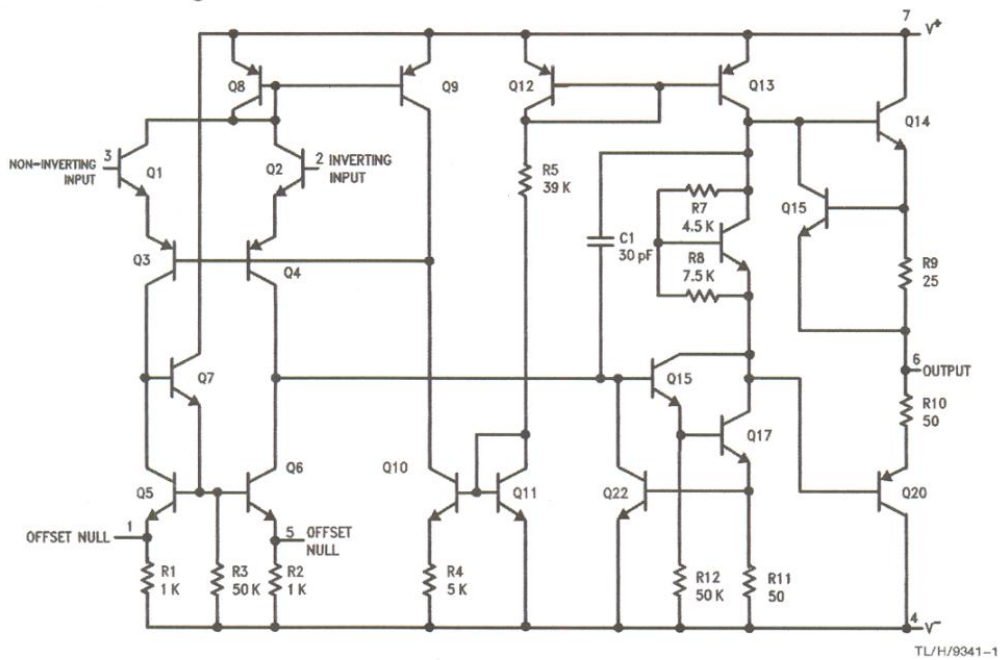
### General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications. The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

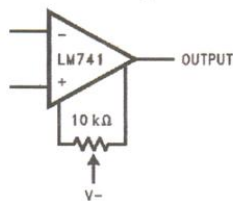
The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

### Schematic Diagram



TL/H/9341-1

Offset Nulling Circuit



TL/H/9341-7

## Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.  
(Note 5)

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C	0°C to +70°C	-55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C	100°C	150°C	100°C
Soldering Information				
N-Package (10 seconds)	260°C	260°C	260°C	260°C
J- or H-Package (10 seconds)	300°C	300°C	300°C	300°C
M-Package				
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.				
ESD Tolerance (Note 6)	400V	400V	400V	400V

## Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV mV
Average Input Offset Voltage Drift				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	±10				±15			±15		mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30		20	200		20	200	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70		85	500			300	nA
Average Input Offset Current Drift				0.5							$\text{nA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500		80	500	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210			1.5			0.8	$\mu\text{A}$
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		$\text{M}\Omega$
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									$\text{M}\Omega$
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							±12	±13		V
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				±12	±13					V
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	50			50	200		20	200		V/mV V/mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	32									V/mV V/mV
	$V_S = \pm 5\text{V}$ , $V_O = \pm 2\text{V}$	10			25			15			V/mV

### Electrical Characteristics (Note 3) (Continued)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20V$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$\pm 16$ $\pm 15$									V V
	$V_S = \pm 15V$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$				$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		V V
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	10 10	25	35 40		25			25		mA mA
Common-Mode Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12V$ $R_S \leq 50\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12V$	80	95		70	90		70	90		dB dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20V$ to $V_S = \pm 5V$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	86	96		77	96		77	96		dB dB
Transient Response Rise Time Overshoot	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain		0.25 6.0	0.8 20		0.3 5			0.3 5		$\mu\text{s}$ %
Bandwidth (Note 4)	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain	0.3	0.7			0.5			0.5		V/ $\mu\text{s}$
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_S = \pm 20V$ $V_S = \pm 15V$		80	150		50	85		50	85	mW mW
LM741A	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			165 135							mW mW
LM741E	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			150 150							mW mW
LM741	$V_S = \pm 15V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$					60 45	100 75				mW mW

**Note 1:** For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and  $T_j$  max. (listed under "Absolute Maximum Ratings").  $T_j = T_A + (\theta_{JA} P_D)$ .

Thermal Resistance	Cerclip (J)	DIP (N)	HO8 (H)	SO-8 (M)
$\theta_{JA}$ (Junction to Ambient)	100°C/W	100°C/W	170°C/W	195°C/W
$\theta_{JC}$ (Junction to Case)	N/A	N/A	25°C/W	N/A

**Note 2:** For supply voltages less than  $\pm 15V$ , the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

**Note 3:** Unless otherwise specified, these specifications apply for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$  (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ .

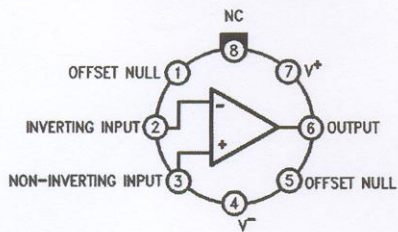
**Note 4:** Calculated value from: BW (MHz) =  $0.35/\text{Rise Time}(\mu\text{s})$ .

**Note 5:** For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.

**Note 6:** Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

## Connection Diagrams

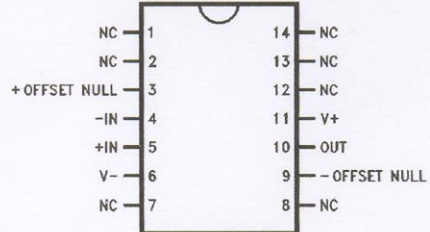
**Metal Can Package**



TL/H/9341-2

Order Number LM741H, LM741H/883\*,  
LM741AH/883 or LM741CH  
See NS Package Number H08C

**Ceramic Dual-In-Line Package**



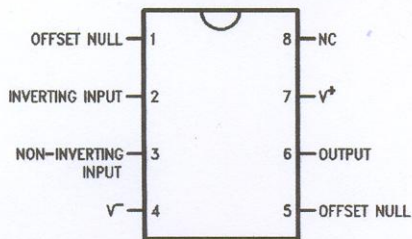
TL/H/9341-5

Order Number LM741J-14/883\*, LM741AJ-14/883\*\*  
See NS Package Number J14A

\*also available per JM38510/10101

\*\*also available per JM38510/10102

**Dual-In-Line or S.O. Package**



TL/H/9341-3

Order Number LM741J, LM741J/883,  
LM741CM, LM741CN or LM741EN  
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

**Ceramic Flatpak**



TL/H/9341-6

Order Number LM741W/883  
See NS Package Number W10A

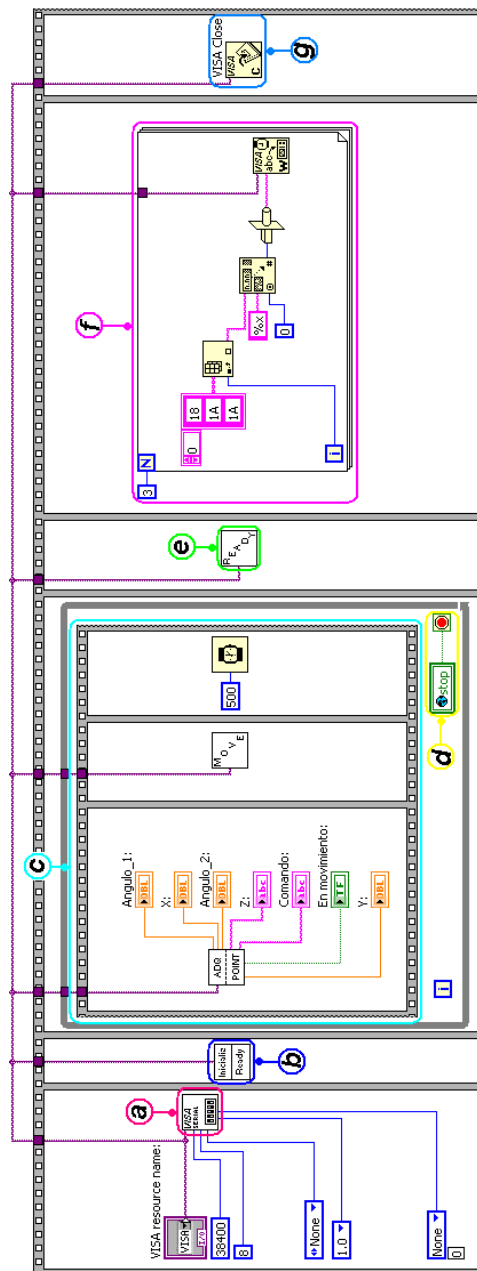


## **ANEXO 7**

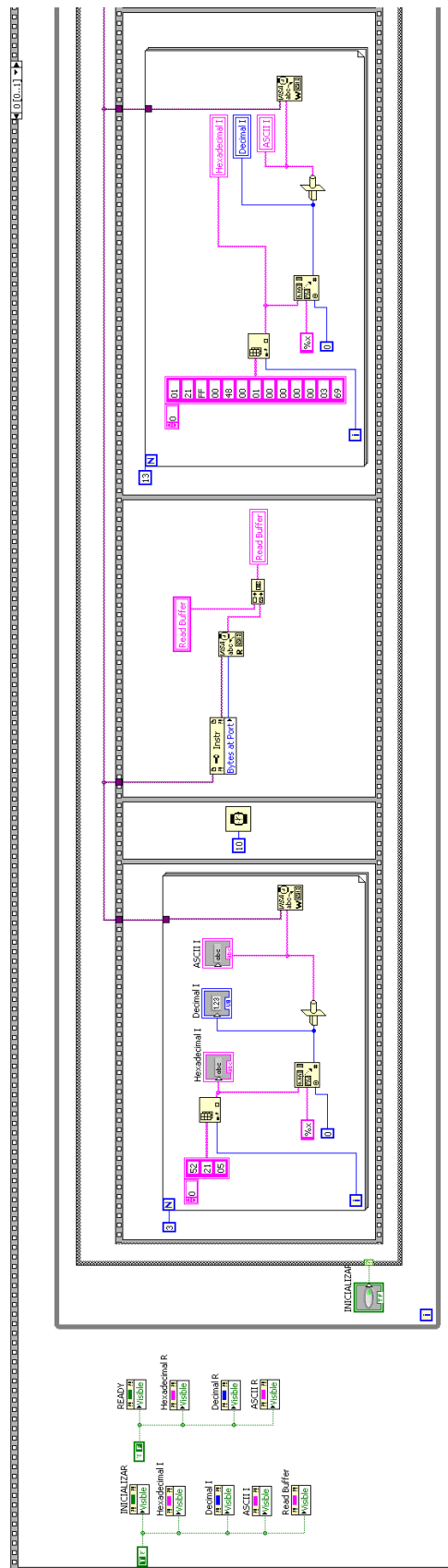
***Diagramas de bloques del software para la interfaz de comunicación y control del teleoperador***

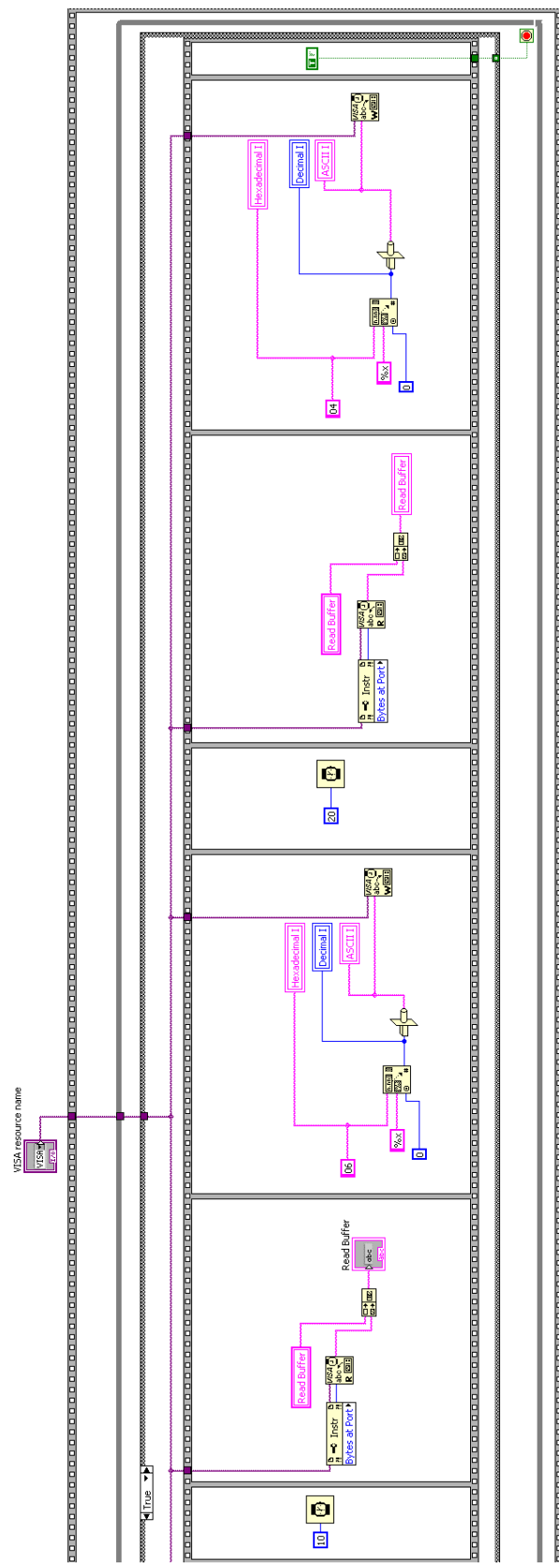
## 7.1. Diagrama de Bloques - Programa Principal (PRINCIPAL.vi)

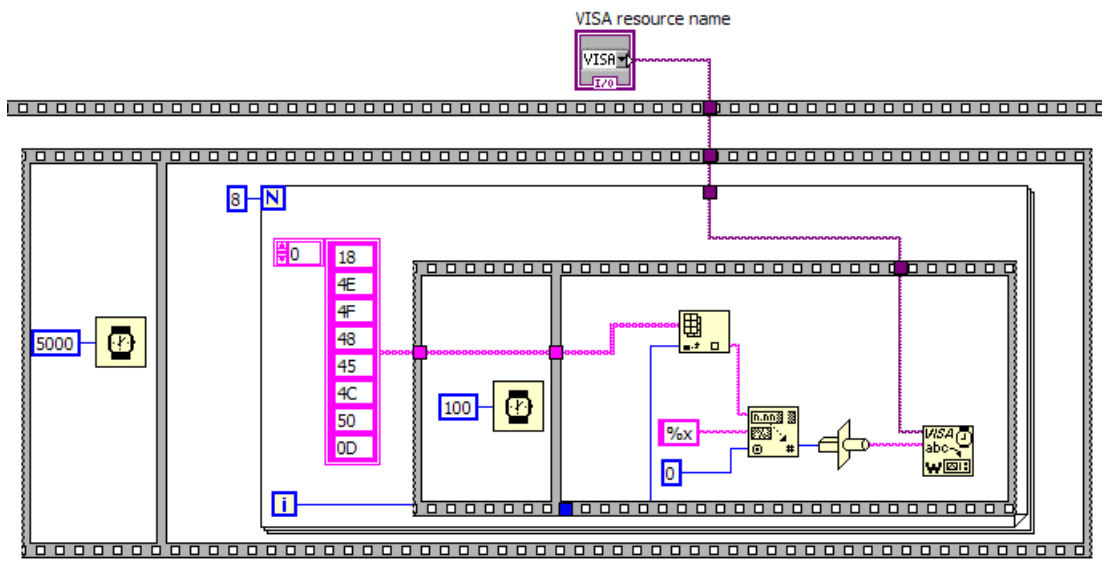
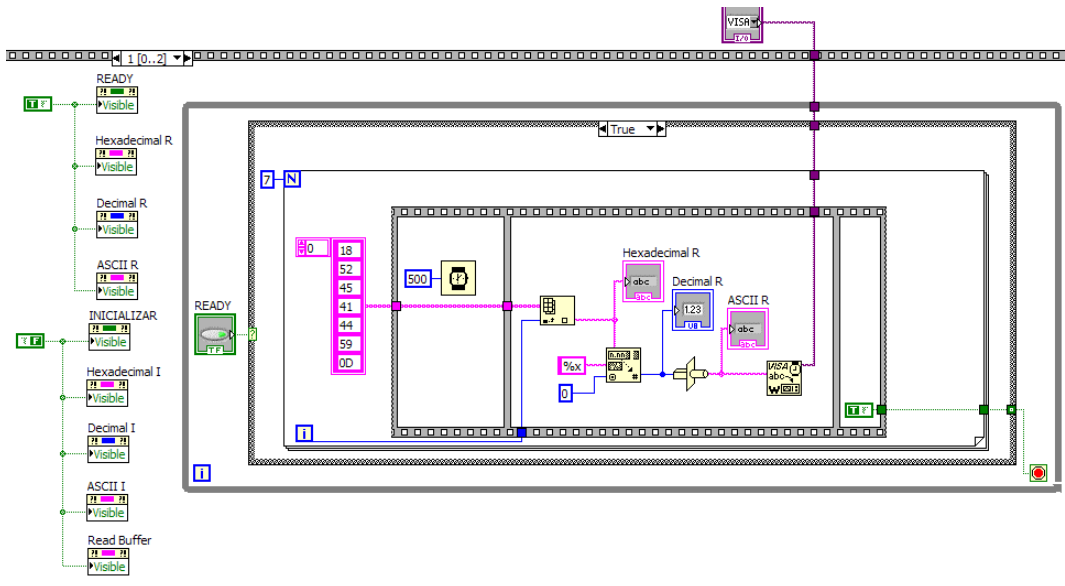
- h)** Configuración del puerto serial
- i)** Inicialización de la comunicación
- j)** Ciclo infinito de adquisición de datos y envío de la sentencia de movimiento
- k)** Fin de uso del dispositivo háptico
- l)** Envío a la posición inicial
- m)** Envío de secuencia de finalización
- n)** Cerrar el puerto serial



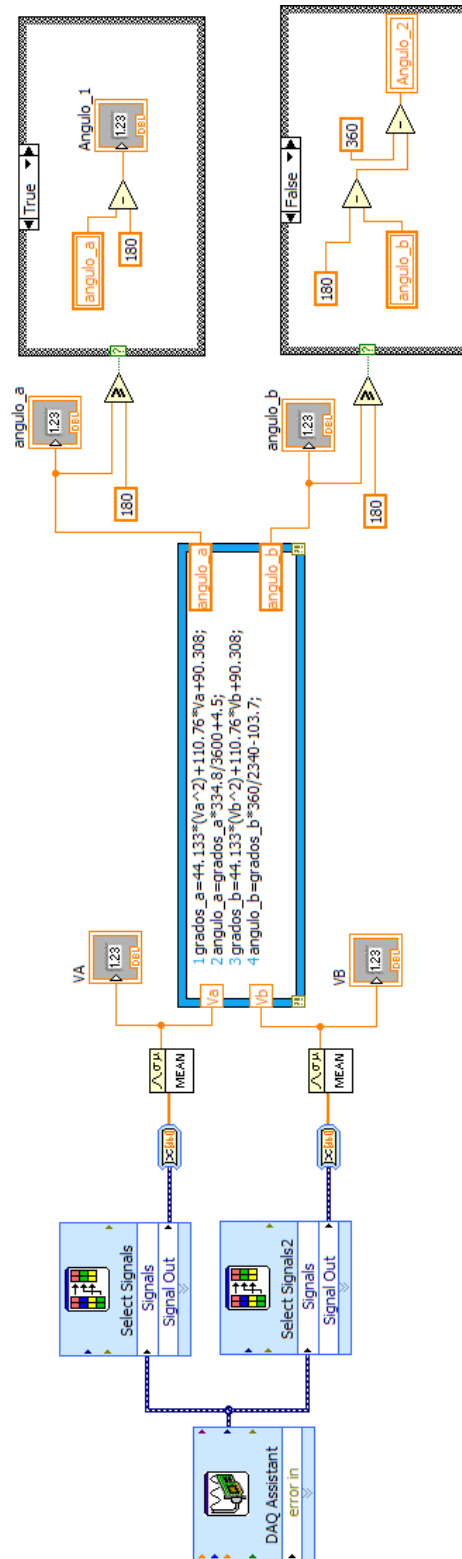
## 7.2. Diagrama de bloques – Inicialización de la comunicación (INICIALIZACION.vi)



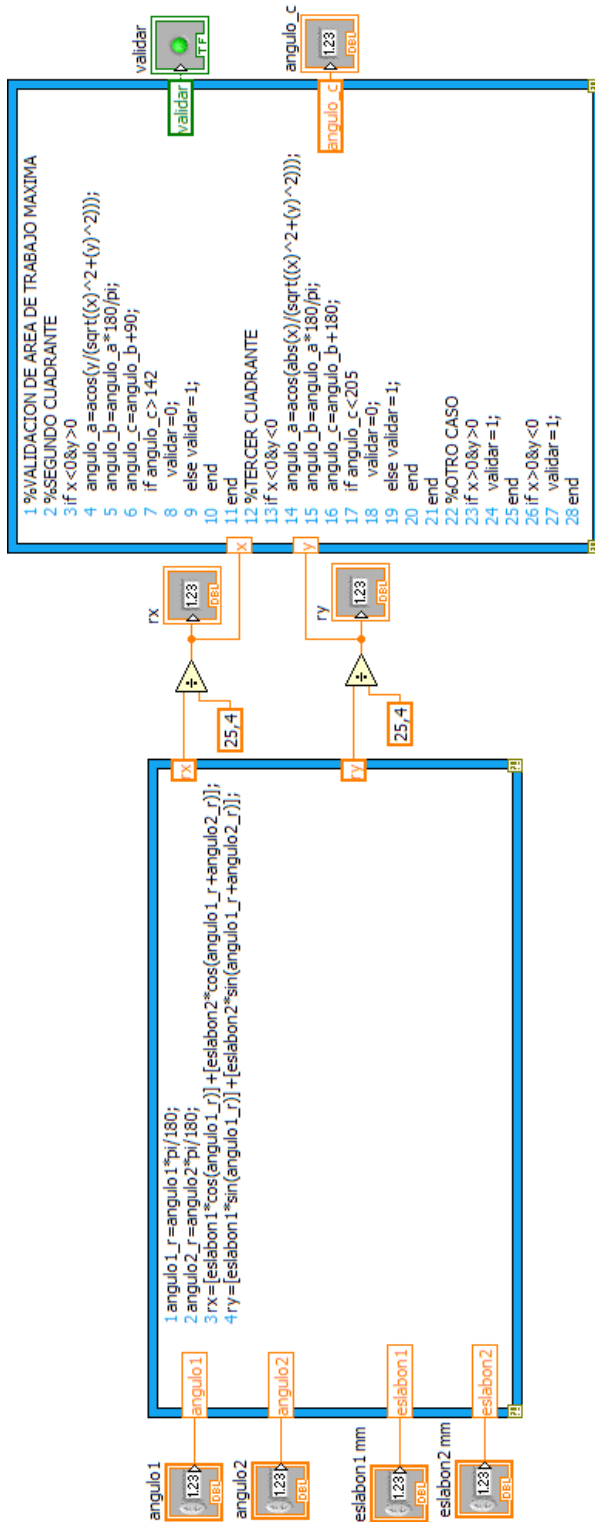




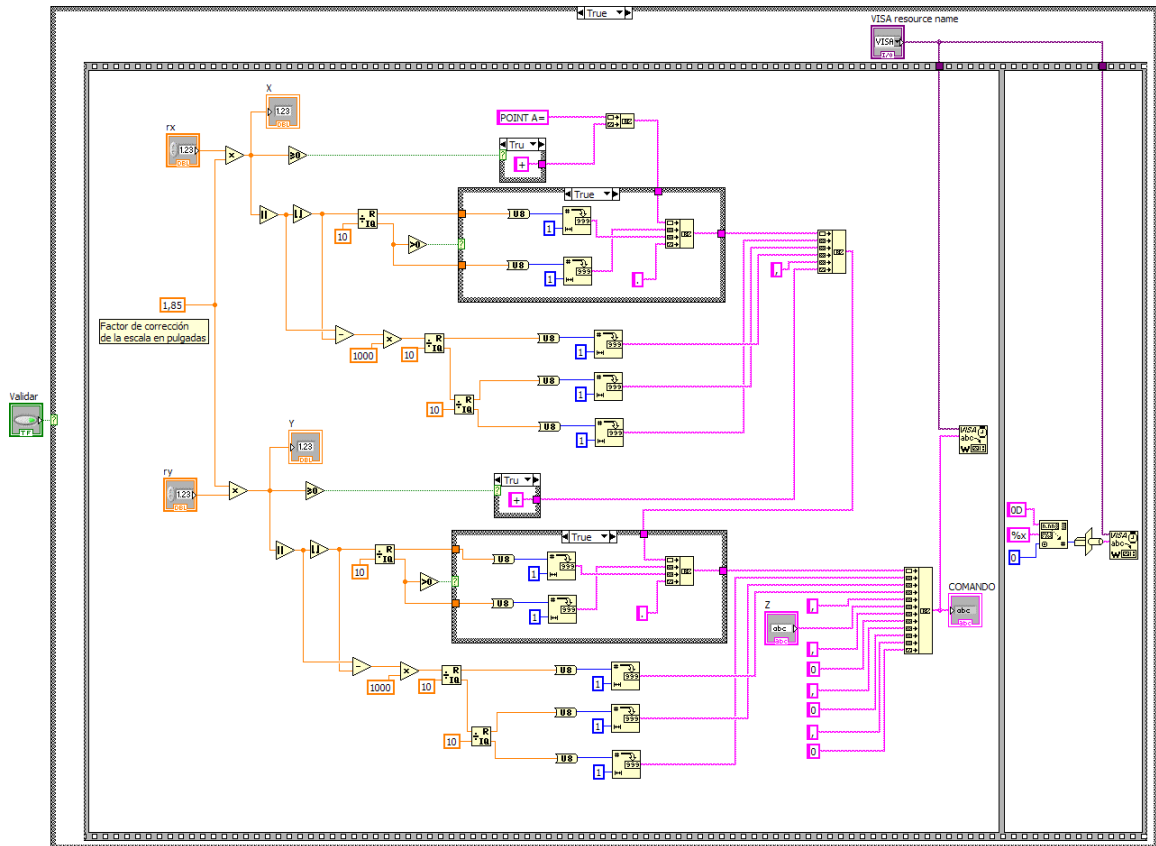
### 7.3. Diagrama de bloques - Adquisición del ángulo (Adquisición resist9229.vi)



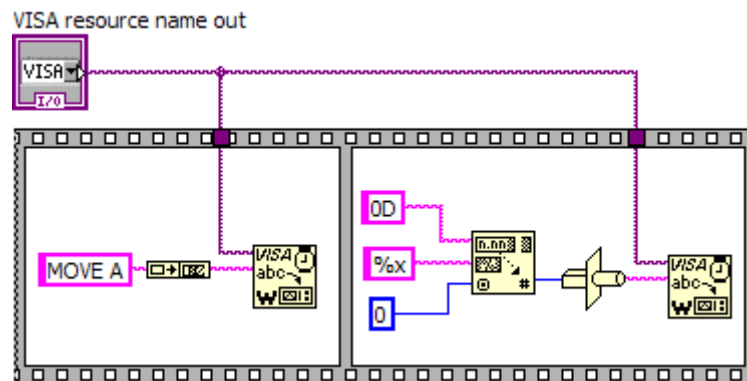
## 7.4. Diagrama de bloques – Cinemática directa (Cinematica.vi)



## 7.5. Diagrama de bloques – Envío de coordenadas (ARREGLO\_1.vi)

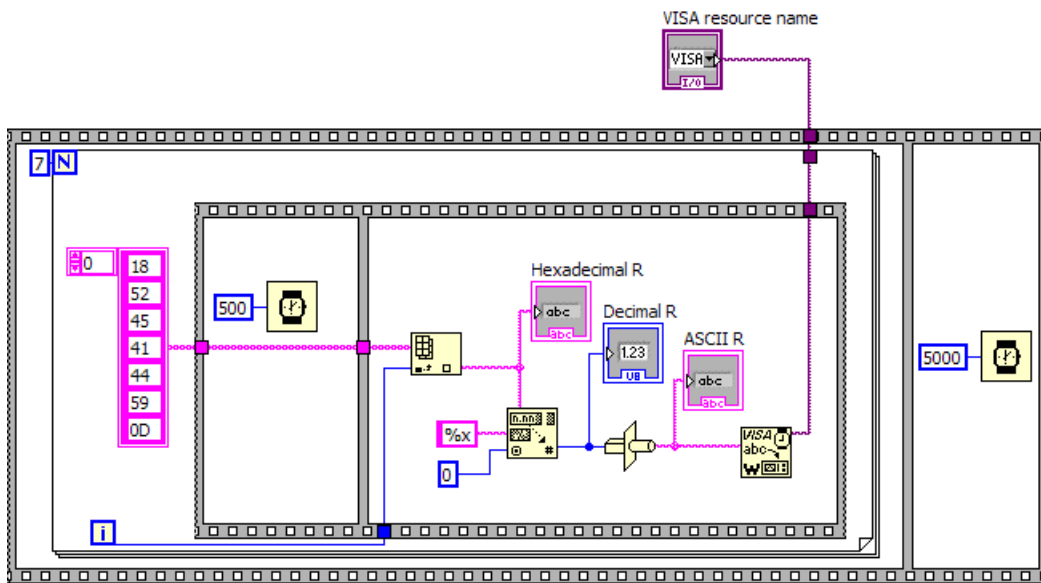


## 7.6. Diagrama de bloques – Mover (MOVE.vi)

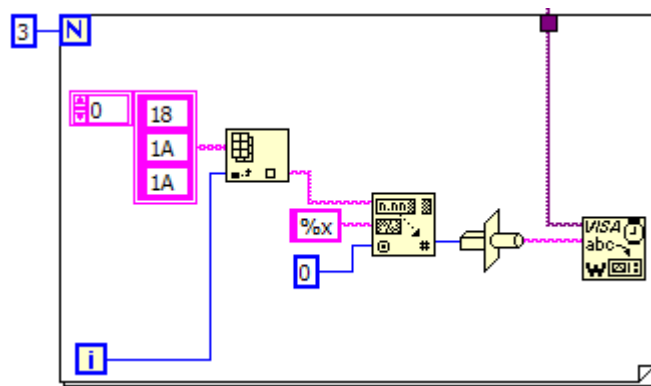




### 7.7. Diagrama de Bloques - READY.vi



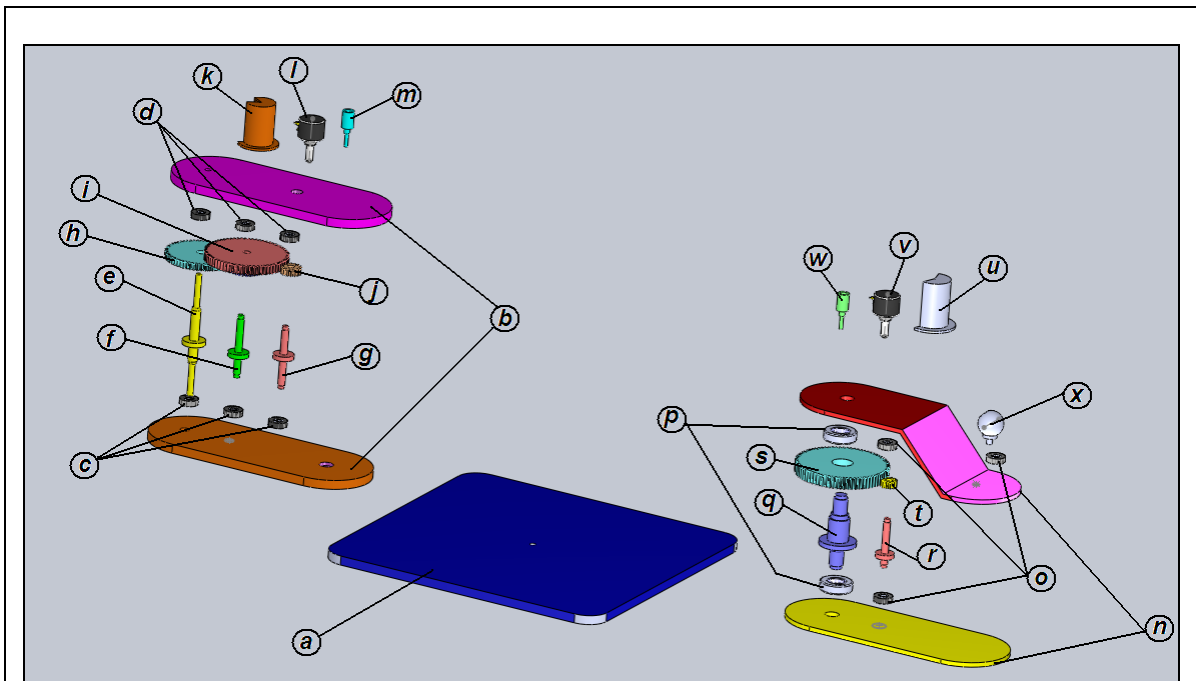
### 7.8. Diagrama de bloques – Secuencia de finalización



## **ANEXO 8**

***Lista de componentes del Dispositivo Háptico y costo de fabricación***

## 8.1. Lista de componentes del Dispositivo Háptico



Partes constitutivas:

- a) Base de la estructura
- b) Eslabón 1 de longitud L1 (Tapas superior e inferior)
- c, d, o) 9 rodamientos de 5mm de diámetro interno x 5mm de espesor
- e) 1 Eje 3 del engranaje N4
- f) 1 Eje 2 del engranaje N2 y N3
- g) 1 Eje 1 del engranaje N1
- h) 1 Engranaje N4 60 dientes modulo 1
- i) 1 Engranaje compuesto: N2 70 dientes modulo 1 y N3 26 dientes modulo 1
- j) 1 Engranaje N1 16 dientes modulo 1
- k) 1 Pieza sujetadora del potenciómetro eslabón 1
- l, v) 2 Potenciómetros correspondientes al eslabón 1 y 2
- m, w) 2 extensiones para ejes de potenciómetros
- n) Eslabón 2 de longitud L2 (Tapas superior e inferior)
- p) 2 rodamientos de 8mm de diámetro interno x 5mm de espesor
- q) Eje 2 del engranaje N2
- r) Eje 1 del engranaje N1
- s) Engranaje N2, 78 dientes modulo 1
- t) Engranaje N1, 12 dientes modulo 1
- u) 1 Pieza sujetadora del potenciómetro eslabón 2
- x) Elemento terminal de manejo del prototipo háptico

## 8.2. Costo de fabricación

<i>Cantidad</i>	<i>Elemento</i>	<i>Valor Unitario</i>	<i>Costo total</i>
1	Base de la estructura	3,0	3,0
1	Eslabón 1 de longitud L1 (Tapas superior e inferior)	3,0	3,0
9	Rodamientos de 5mm de diámetro interno x 5mm de espesor	4,0	36,0
1	Eje 3 del engranaje N4	10,0	10,0
1	Eje 2 del engranaje N2 y N3	10,0	10,0
1	Eje 1 del engranaje N1	10,0	10,0
1	Engranaje N4 60 dientes modulo 1	2,0	2,0
1	Engranaje compuesto: N2 70 dientes modulo 1 y N3 26 dientes modulo 1	4,0	4,0
1	Engranaje N1 16 dientes modulo 1	1,0	1,0
1	Pieza sujetadora del potenciómetro eslabón 1	5,0	5,0
2	Potenciómetros correspondientes al eslabón 1 y 2	35,0	70,0
2	Extensiones para ejes de potenciómetros	2,5	5,0
1	Eslabón 2 de longitud L2 (Tapas superior e inferior)	3,0	3,0
2	Rodamientos de 8mm de diámetro interno x 5mm de espesor	3,0	6,0
1	Eje 2 del engranaje N2	10,0	10,0
1	Eje 1 del engranaje N1	10,0	10,0
1	Engranaje N2, 78 dientes modulo 1	2,0	2,0
1	Engranaje N1, 12 dientes modulo 1	1,0	1,0
1	Pieza sujetadora del potenciómetro eslabón 2	5,0	5,0
1	Elemento terminal de manejo del prototipo háptico	10,0	10,0
20	Tornillos milimetrados 3x10mm	0,0	0,4
40	Tornillos milimetrados 3x15mm	0,0	0,8
2	Tornillos prisioneros 4x10mm	0,2	0,3
2	Tornillos prisioneros 3x10mm	0,2	0,3
		<b>TOTAL</b>	<b>207,2</b>

## **ANEXO 9**

### ***Resultados del desempeño – Sistema de Teleoperación***

## 9.1. Tolerancia

<i>Línea (O,R)</i>		<i>Línea (O,R1)</i>	
<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>
52,4	0,5	52,4	0,5
52,4	-0,3	52,4	-0,3
52,4	-0,5	52,4	-0,5
52,4	-0,8	52,4	-0,8
52,4	-1,0	52,4	-1,0
52,4	-1,3	52,4	-1,3
52,4	-1,7	52,4	-1,7
52,4	-2,2	52,4	-2,2
52,4	-2,5	52,4	-2,5
52,4	-2,8	52,4	-2,8
52,3	-3,0	52,3	-3,0
52,4	-3,2	52,4	-3,2
52,3	-3,4	52,3	-3,4
52,4	-3,7	52,2	-3,7
52,4	-4,0	52,2	-3,9
52,3	-4,4	52,2	-4,2
52,4	-4,6	52,2	-4,4
52,5	-4,8	52,2	-4,6
52,2	-5,1	52,1	-4,8
52,4	-5,3	52,1	-5,1
52,4	-5,5	52,0	-5,8
52,4	-5,7	52,0	-6,2
52,4	-5,7	52,0	-6,5
52,4	-5,8	52,1	-6,6
52,4	-5,6	52,0	-7,0
52,4	-6,2	52,1	-7,2
52,4	-6,4	52,1	-7,4
52,4	-6,5	52,1	-7,6
		52,1	-7,8
		52,1	-8,0
		52,0	-8,2
		52,0	-8,5
		52,0	-8,7
		52,0	-8,9
		52,1	-9,1

## 9.2. Trazo de puntos

	<b>MANIPULADOR INDUSTRIAL</b>			<b>DISPOSITIVO HÁPTICO</b>	
<b>PUNTO</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>PUNTO</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>
A1	47,3	0,9	A	58,6	0,0
B1	38,3	-5,3	B	49,7	-6,7
C1	38,1	6,3	C	49,7	6,7

## 9.3. Repetibilidad

<b>DISPOSITIVO HÁPTICO</b>		
<b>PUNTO</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>
<b>A</b>	39,3	0,0
<b>B</b>	39,0	10,0
<b>C</b>	34,2	0,0
<b>D</b>	33,0	9,8
<b>E</b>	44,1	-11,3
<b>F</b>	40,6	-2,2
<b>G</b>	41,5	-13,1
<b>H</b>	37,3	-4,0
<b>I</b>	35,9	-8,7
<b>J</b>	43,3	-8,7

<b>DISPOSITIVO HÁPTICO</b>	<b>MANIPULADOR INDUSTRIAL</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>Repeticiones</b>
<b>A</b>	<b>A1</b>	39,4	-4,1	3
	<b>A2</b>	39,5	-1,7	21
	<b>A3</b>	39,5	-1,1	24
	<b>A4</b>	39,5	-1,2	14
	<b>A5</b>	39,4	-2,2	3
	<b>A6</b>	39,4	-2,5	3
	<b>A7</b>	39,4	-1,0	7
	<b>A8</b>	39,4	-1,4	24
<b>B</b>	<b>B1</b>	39,1	4,6	13
	<b>B2</b>	39,1	4,1	17
	<b>B3</b>	39,2	3,7	20
	<b>B4</b>	39,0	4,7	3
	<b>B5</b>	39,1	4,0	33
	<b>B6</b>	39,2	3,8	10
	<b>B7</b>	39,1	4,3	3

<i>DISPOSITIVO HÁPTICO</i>	<i>MANIPULADOR INDUSTRIAL</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>Repeticiones</i>
<b>C</b>	<b>C1</b>	34,9	-1,6	47
	<b>C2</b>	34,8	-1,8	26
	<b>C3</b>	34,9	-1,4	26
<b>D</b>	<b>D1</b>	34,0	7,1	5
	<b>D2</b>	34,5	4,3	30
	<b>D3</b>	34,5	4,5	35
	<b>D4</b>	34,5	4,0	20
	<b>D5</b>	34,4	4,7	10
<b>E</b>	<b>E1</b>	43,8	-13,0	31
	<b>E2</b>	43,9	-13,5	31
	<b>E3</b>	43,8	-13,3	38
<b>F</b>	<b>F1</b>	40,7	-4,9	42
	<b>F2</b>	40,8	-5,1	50
	<b>F3</b>	41,0	-5,5	8
<b>G</b>	<b>G1</b>	41,8	-13,5	60
	<b>G2</b>	41,9	-13,9	10
	<b>G3</b>	41,8	-13,7	30
<b>H</b>	<b>H1</b>	37,8	-4,8	10
	<b>H2</b>	38,2	-5,5	60
	<b>H3</b>	38,1	-5,3	30
<b>I</b>	<b>I1</b>	36,8	-9,8	7
	<b>I2</b>	37,1	-8,9	36
	<b>I3</b>	37,2	-8,7	21
	<b>I4</b>	36,9	-9,1	21
	<b>I5</b>	37,2	-8,2	7
	<b>I6</b>	36,9	-9,5	7
<b>J</b>	<b>J1</b>	43,7	-8,6	8
	<b>J2</b>	42,8	-12,9	69
	<b>J3</b>	42,9	-12,5	15
	<b>J4</b>	42,7	-13,1	8



#### 9.4. Trazo de línea OR

<b>LÍNEA (O,R)</b>			
<b>DISPOSITIVO HÁPTICO</b>		<b>MANIPULADOR INDUSTRIAL</b>	
<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>
24,0	0,0	52,4	0,5
24,0	-0,1	52,4	-0,3
24,0	-0,2	52,4	-0,5
24,0	-0,3	52,4	-0,8
24,0	-0,4	52,4	-1,0
24,0	-0,5	52,4	-1,3
24,0	-0,6	52,4	-1,7
24,0	-0,7	52,4	-2,2
24,0	-0,8	52,4	-2,5
24,0	-0,9	52,4	-2,8
24,0	-1,0	52,3	-3,0
24,0	-1,1	52,4	-3,2
24,0	-1,2	52,3	-3,4
24,0	-1,3	52,4	-3,7
24,0	-1,4	52,4	-4,0
24,0	-1,5	52,3	-4,4
24,0	-1,6	52,4	-4,6
24,0	-1,7	52,5	-4,8
24,0	-1,8	52,2	-5,1
24,0	-1,9	52,4	-5,3
24,0	-2,0	52,4	-5,5
24,0	-2,1	52,4	-5,7
24,0	-2,2	52,4	-5,7
24,0	-2,3	52,4	-5,8
24,0	-2,4	52,4	-5,6
24,0	-2,5	52,4	-6,2
24,0	-2,6	52,4	-6,4
24,0	-2,7	52,4	-6,5
24,0	-2,8		
24,0	-2,9		
24,0	-3,0		
24,0	-3,1		
24,0	-3,2		
24,0	-3,3		
24,0	-3,4		

## 9.5. Trazo de triángulo ABC

TRIÁNGULO ABC							
DISPOSITIVO HÁPTICO		MANIPULADOR INDUSTRIAL					
X (cm)	Y (cm)	X (cm)	Y (cm)	X (cm)	Y (cm)	X (cm)	Y (cm)
58,6	0,0	37,9	0,3	46,0	-1,8	39,5	-9,5
49,7	-6,7	38,4	1,3	45,9	-1,9	39,4	-9,7
49,7	6,7	38,6	1,4	45,8	-2,0	39,2	-9,9
58,6	0,0	39,0	2,0	45,7	-2,2	39,0	-10,1
		39,2	2,3	45,6	-2,5	38,8	-10,2
		39,4	2,6	45,4	-2,8	38,6	-10,4
		39,6	2,8	45,3	-3,0	38,5	-10,5
		39,7	3,1	45,2	-3,2	38,2	-10,7
		39,9	3,2	45,1	-3,4	37,3	-10,6
		40,0	3,4	44,9	-3,7	37,0	-10,8
		40,2	3,8	44,8	-3,9	37,3	-9,8
		40,4	4,2	44,7	-4,1	37,4	-9,1
		40,5	4,3	44,5	-4,4	37,4	-8,3
		40,7	4,5	44,4	-4,6	37,5	-7,4
		40,8	4,7	44,3	-4,8	37,6	-6,5
		41,3	3,9	44,1	-5,0	37,8	-5,5
		41,9	3,7	44,0	-5,2	37,9	-4,4
		42,4	3,4	43,8	-5,4	37,9	-3,1
		43,5	3,3	43,7	-5,6	38,0	-2,2
		44,1	2,4	43,6	-5,7	38,0	-1,2
		44,3	3,1	43,5	-5,8	37,9	0,3
		44,7	2,6	43,4	-5,9		
		44,9	3,0	43,0	-6,4		
		45,3	2,3	42,8	-6,7		
		45,7	1,9	42,6	-6,9		
		45,8	2,3	42,4	-7,2		
		46,5	1,1	42,2	-7,5		
		47,4	1,4	42,0	-7,7		
		47,0	0,5	41,8	-7,9		
		46,9	0,3	41,7	-8,1		
		46,7	0,0	41,5	-8,3		
		46,6	-0,3	41,3	-8,4		
		46,5	-0,6	41,1	-8,7		
		46,4	-0,8	40,4	-8,7		
		46,3	-1,0	40,3	-8,9		
		46,2	-1,2	40,0	-9,2		
		46,1	-1,5	39,7	-9,4		

## 9.6. Trazo de arco PQ

ARCO PQ					
DISPOSITIVO HÁPTICO		MANIPULADOR INDUSTRIAL			
X (cm)	Y (cm)	X (cm)	Y (cm)	X (cm)	Y (cm)
24,0	3,5	52,4	7,7	57,3	2,6
24,1	3,5	52,8	7,3	57,4	2,6
24,2	3,5	52,8	7,2	57,2	2,4
24,3	3,4	52,9	6,7	57,5	2,2
24,4	3,4	53,0	6,2	57,6	1,9
24,5	3,4	53,1	5,6	57,8	1,8
24,7	3,4	53,3	5,1	58,0	1,8
24,9	3,3	53,6	4,9	58,1	1,8
25,1	3,3	53,7	4,8	58,2	1,6
25,3	3,1	54,0	4,7	58,5	1,6
25,5	3,0	54,1	4,8	58,7	1,5
25,7	3,0	54,2	4,6	58,9	1,2
25,9	2,9	54,3	4,8	59,0	1,2
26,0	2,8	54,6	4,3	59,2	1,1
26,1	2,7	54,8	4,4	59,2	0,8
26,3	2,6	55,0	4,4	59,3	0,7
26,5	2,4	55,2	4,5	59,5	0,6
26,6	2,3	55,3	4,2	59,7	0,4
26,7	2,2	55,4	4,0	59,8	0,0
26,8	2,0	55,6	4,0	59,9	-0,1
26,9	1,9	55,8	4,0	60,0	-0,2
27,0	1,7	55,9	3,8	60,2	-0,6
27,1	1,5	56,1	3,8	60,3	-0,8
27,2	1,3	56,2	3,7	60,3	-1,0
27,3	1,1	56,3	3,6	60,4	-1,3
27,3	0,9	56,5	3,6	60,4	-1,6
27,4	0,8	56,5	3,3	60,4	-1,9
27,4	0,6	56,7	3,2	60,5	-2,0
27,4	0,4	56,8	3,0	60,5	-2,3
27,4	0,2	56,9	2,9	60,5	-2,6
27,4	0,0	57,0	2,7		

### 9.7. Trazo de arco UT

<b>ARCO UT</b>					
<b>DISPOSITIVO HÁPTICO</b>		<b>MANIPULADOR INDUSTRIAL</b>			
<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>
25,6	2,0	56,3	5,8	50,5	-3,9
25,5	1,8	56,2	5,6	50,4	-4,1
25,4	1,6	56,1	5,4	50,3	-4,3
25,4	1,4	56,0	5,0	50,1	-4,5
25,3	1,2	55,9	4,7	50,0	-4,7
25,2	1,0	55,8	4,6	49,9	-4,8
25,1	0,8	55,7	4,3	49,7	-5,0
25,0	0,6	55,5	3,9	49,4	-5,3
24,9	0,4	55,4	3,6	49,2	-5,6
24,8	0,2	55,3	3,3	49,0	-5,9
24,7	0,0	55,1	2,8	48,9	-6,1
24,6	-0,2	55,0	2,6	48,6	-6,3
24,5	-0,4	54,9	2,4	48,4	-6,6
24,4	-0,5	54,7	2,2	48,2	-6,8
24,3	-0,6	54,5	1,6	48,0	-6,9
24,2	-0,7	54,4	1,4	47,8	-7,0
24,1	-0,9	54,3	1,2	47,6	-7,2
24,0	-1,0	54,2	1,1	47,5	-7,3
23,9	-1,1	54,1	0,8	47,2	-7,6
23,8	-1,2	54,0	0,7	47,1	-7,6
23,7	-1,4	53,9	0,5	46,9	-7,8
23,6	-1,5	53,7	0,3	46,8	-7,9
23,5	-1,6	53,7	0,1	46,5	-8,0
23,4	-1,7	53,5	-0,2	46,4	-8,2
23,3	-1,9	53,3	-0,4	46,2	-8,3
23,2	-2,0	53,2	-0,6		
23,0	-2,1	53,1	-0,8		
22,9	-2,3	52,9	-1,0		
22,8	-2,4	52,8	-1,2		
22,7	-2,5	52,6	-1,4		
22,6	-2,6	52,5	-1,5		
22,5	-2,7	52,4	-1,7		
22,3	-2,8	52,1	-2,1		
22,2	-2,9	51,9	-2,5		
22,1	-3,0	51,5	-2,8		
21,9	-3,2	51,3	-3,1		
21,7	-3,3	51,1	-3,3		
21,6	-3,4	51,0	-3,5		

## 9.8. Trazo de circunferencia

<i>DISPOSITIVO HÁPTICO</i>							
<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>
53,2	7,7	55,7	-7,2	47,6	5,3	45,8	-2,4
53,5	7,7	56,1	-6,9	47,4	5,1	45,8	-2,0
53,7	7,7	56,6	-6,7	47,2	4,9	45,6	-1,8
53,9	7,6	57,0	-6,7	47,0	4,4	45,6	-1,3
54,1	7,5	57,4	-6,4	46,7	4,2	45,6	-0,9
54,3	7,5	57,7	-6,2	46,5	3,8	45,6	-0,4
54,8	7,4	57,9	-6,0	46,3	3,3	45,6	0,0
55,2	7,3	58,3	-5,8	46,1	2,9		
55,7	7,2	58,8	-5,3	45,8	2,4		
56,1	6,9	59,0	-5,1	45,8	2,0		
56,6	6,7	59,2	-4,9	45,6	1,8		
57,0	6,7	59,4	-4,4	45,6	1,3		
57,4	6,4	59,7	-4,2	45,6	0,9		
57,7	6,2	59,9	-3,8	45,6	0,4		
57,9	6,0	60,1	-3,3	45,6	0,0		
58,3	5,8	60,3	-2,9	53,2	-7,7		
58,8	5,3	60,6	-2,4	52,9	-7,7		
59,0	5,1	60,6	-2,0	52,7	-7,7		
59,2	4,9	60,8	-1,8	52,5	-7,6		
59,4	4,4	60,8	-1,3	52,3	-7,5		
59,7	4,2	60,8	-0,9	52,1	-7,5		
59,9	3,8	60,8	-0,4	51,6	-7,4		
60,1	3,3	60,8	0,0	51,2	-7,3		
60,3	2,9	53,2	7,7	50,7	-7,2		
60,6	2,4	52,9	7,7	50,3	-6,9		
60,6	2,0	52,7	7,7	49,8	-6,7		
60,8	1,8	52,5	7,6	49,4	-6,7		
60,8	1,3	52,3	7,5	49,0	-6,4		
60,8	0,9	52,1	7,5	48,7	-6,2		
60,8	0,4	51,6	7,4	48,5	-6,0		
60,8	0,0	51,2	7,3	48,1	-5,8		
53,2	-7,7	50,7	7,2	47,6	-5,3		
53,5	-7,7	50,3	6,9	47,4	-5,1		
53,7	-7,7	49,8	6,7	47,2	-4,9		
53,9	-7,6	49,4	6,7	47,0	-4,4		
54,1	-7,5	49,0	6,4	46,7	-4,2		
54,3	-7,5	48,7	6,2	46,5	-3,8		
54,8	-7,4	48,5	6,0	46,3	-3,3		
55,2	-7,3	48,1	5,8	46,1	-2,9		

**MANIPULADOR INDUSTRIAL**

<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>	<i>X (cm)</i>	<i>Y (cm)</i>
34,7	0,1	45,0	6,4	49,3	-3,1	42,2	-7,7	33,5	-3,9
34,9	0,3	45,1	6,2	49,2	-3,3	41,9	-7,8	33,6	-3,5
35,1	0,6	45,4	6,0	49,1	-3,6	41,5	-7,7	33,7	-2,8
35,4	0,9	45,5	5,8	49,1	-3,2	41,2	-7,8	33,7	-2,3
35,5	1,0	45,6	5,1	48,9	-3,6	40,9	-7,8	33,6	-1,8
35,8	1,3	45,8	4,5	48,8	-3,1	40,7	-7,8	33,5	-1,6
36,0	1,6	46,0	4,6	48,7	-3,4	40,5	-8,0	33,6	-1,2
36,3	2,0	46,1	4,6	48,4	-3,9	40,2	-7,9	33,6	-1,1
36,6	2,3	46,3	4,6	48,3	-4,2	40,1	-8,0	33,7	-1,1
36,9	2,6	46,5	4,3	48,2	-4,4	39,9	-8,0	33,8	-0,7
37,2	3,0	46,6	4,7	48,1	-4,6	39,5	-7,7	34,0	-0,6
37,5	3,5	46,8	3,9	48,0	-4,9	39,4	-7,3	34,1	-0,4
37,7	3,8	47,0	3,8	47,9	-5,3	39,2	-7,4	34,2	-0,2
37,9	4,1	47,1	3,7	47,7	-5,2	39,0	-7,6		
38,2	4,5	47,0	3,6	47,5	-5,5	38,7	-7,4		
38,5	5,0	47,3	3,3	47,3	-5,4	38,3	-7,4		
39,0	5,8	47,5	3,2	47,1	-5,7	37,8	-7,3		
39,3	6,4	47,7	2,8	46,9	-5,6	37,2	-7,8		
39,5	6,6	47,9	2,8	46,7	-5,7	37,0	-8,0		
39,7	7,1	48,0	2,6	46,6	-5,8	36,9	-8,1		
39,9	7,3	48,1	2,6	46,5	-5,8	36,6	-8,3		
40,0	7,5	48,3	2,4	46,3	-5,7	36,4	-8,4		
40,7	6,5	48,4	2,1	46,1	-5,9	36,3	-8,6		
41,1	6,8	48,5	1,7	45,8	-6,3	36,1	-8,5		
41,3	7,1	48,7	1,3	45,7	-6,4	35,9	-8,6		
41,4	7,5	49,0	1,4	45,5	-6,4	35,7	-8,8		
41,5	7,5	49,0	1,0	45,3	-6,4	35,2	-9,1		
41,8	7,1	49,1	0,8	45,0	-6,6	35,2	-8,5		
41,9	7,7	49,3	0,3	44,8	-6,8	35,0	-8,2		
43,0	7,1	49,4	0,2	44,5	-6,9	34,6	-7,4		
43,1	7,3	49,5	0,0	44,3	-7,1	34,5	-7,0		
43,4	7,0	49,6	-0,1	44,1	-7,3	34,4	-6,4		
43,5	7,3	49,7	-1,1	43,9	-7,6	34,2	-6,3		
43,7	7,7	49,8	-1,4	43,6	-7,8	34,2	-5,8		
43,8	7,7	49,7	-1,6	43,5	-7,5	33,9	-5,6		
43,8	7,9	49,8	-2,0	43,1	-7,6	33,8	-5,4		
43,9	8,1	49,8	-2,5	43,0	-7,5	33,8	-4,9		
44,6	7,3	49,8	-3,0	42,9	-7,5	33,7	-4,8		
44,7	6,5	49,4	-3,0	42,5	-7,7	33,7	-4,6		

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

Figura. 2.1.	Sistemas constitutivos de un dispositivo háptico .....	8
Figura. 2.2.	Elementos de un sistema de teleoperación maestro - esclavo ...	12
Figura. 2.3.	Sistema robótico CRS A255 .....	13
Figura. 2.4.	Articulaciones del manipulador CRS - A255 .....	14
Figura. 2.5.	Espacio de trabajo radial .....	15
Figura. 2.6.	Espacio de trabajo vertical.....	15
Figura. 2.7.	Tráfico de datos del controlador robótico C500 .....	16
Figura. 2.8.	Elementos del sistema de teleoperación a implementarse .....	20

### CAPÍTULO III

Figura. 3.1.	a) Espacio de trabajo vertical descrito por el fabricante. b) Diagrama del área vertical máxima .....	22
Figura. 3.2.	Perímetro y área de la superficie vertical máxima de trabajo .....	23
Figura. 3.3.	a) Espacio de trabajo horizontal descrito por el fabricante. b) Diagrama del área horizontal máxima .....	23
Figura. 3.4.	Perímetro y área de la superficie horizontal máxima de trabajo .....	24
Figura. 3.5.	Robot SCARA [6].....	25
Figura. 3.6.	a) Vista aérea de la configuración de las articulaciones del prototipo háptico. b) Esquema en el plano cartesiano XY. ....	26
Figura. 3.7.	Diseño del Prototipo Uno en SolidWorks .....	27
Figura. 3.8.	Modelo terminado – Prototipo Uno .....	28
Figura. 3.9.	Alcance radial del Prototipo Uno.....	28
Figura. 3.10.	Parámetros característicos de un tren de engranes .....	30
Figura. 3.11.	Tren de engranes de la articulación uno.....	31
Figura. 3.12.	Tren de engranes de la articulación dos .....	32
Figura. 3.13.	Fuerzas incidentes sobre el Prototipo Final.....	33
Figura. 3.14.	Propiedades físicas del Prototipo Final.....	34
Figura. 3.15.	Diseño del Prototipo Final en SolidWorks.....	35
Figura. 3.16.	Alcance radial del Prototipo Final .....	36
Figura. 3.17.	a) Diagrama del área de trabajo del Prototipo Final. b) Perímetro y área de la superficie de trabajo del Prototipo Final .....	36
Figura. 3.18.	Convertidor de voltaje diferencial a corriente [8].....	37
Figura. 3.19.	Divisor de Tensión .....	38
Figura. 3.20.	Respuesta del Potenciómetro Lineal – Prototipo Uno .....	39
Figura. 3.21.	Respuesta del Potenciómetro Lineal – Prototipo Final .....	41

Figura. 3.22. Línea de tendencia polinomial de segundo grado de la curva de respuesta del sensor Vishay 534.....	41
--	----

#### CAPÍTULO IV

Figura. 4.1. Interfaces de comunicación para el sistema de teleoperación ...	42
Figura. 4.2. Adquisición de voltaje en el Prototipo Final .....	43
Figura. 4.3. Asistente de adquisición .....	43
Figura. 4.4. Asignación del tipo de señal .....	44
Figura. 4.5. Selección del Canal .....	44
Figura. 4.6. Parámetros de medición.....	45
Figura. 4.7. Diagrama de conexión.....	45
Figura. 4.8. Selector de señal.....	46
Figura. 4.9. Configuración del selector de señal.....	46
Figura. 4.10. Conexión del Asistente de adquisición y selector de señal .....	46
Figura. 4.11. Configuración del puerto serial en Labview .....	48
Figura. 4.12. Diagrama de flujo - programa principal (PRINCIPAL.vi) .....	49
Figura. 4.13. Resultado del lector del puerto serial.....	50
Figura. 4.14. Diagrama de flujo – Inicialización de la comunicación (INICIALIZACION.vi).....	51
Figura. 4.15. Diagrama de flujo – Adquisición del ángulo (Adquisición resist9229.vi) .....	52
Figura. 4.16. Gráfico para obtener los parámetros de Denavit - Hartenberg ...	53
Figura. 4.17. Matriz de transformación de cinemática directa.....	53
Figura. 4.18. Diagrama de flujo – Cinemática directa (Cinematica.vi) .....	54
Figura. 4.19. Diagrama de flujo – Envío de coordenadas (ARREGLO_1.vi)....	57
Figura. 4.20. Diagrama de flujo – Mover (MOVE.vi) .....	57
Figura. 4.21. Diagrama de Flujo - READY.vi .....	58

#### CAPÍTULO V

Figura. 5.1. Partes fundamentales del Prototipo Final .....	61
Figura. 5.2. Base de sujeción: diseño e implementación.....	62
Figura. 5.3. Primer eslabón: diseño e implementación .....	62
Figura. 5.4. Primer eslabón – Descripción de componentes.....	63
Figura. 5.5. Segundo eslabón: diseño e implementación .....	63
Figura. 5.6. Segundo eslabón – Descripción de componentes.....	64
Figura. 5.7. Prototipo Final: Diseño e implementación .....	64
Figura. 5.8. Integración del Sistema de Teleoperación.....	65



Figura. 5.9.	Funcionamiento del Sistema de Teleoperación .....	66
Figura. 5.10.	Posición inicial (HOME) – Manipulador industrial CRS A255 .....	67
Figura. 5.11.	a) Diagrama de conexión entre el dispositivo háptico y la tarjeta de adquisición. b) Fuente de voltaje para la adquisición de datos.....	68
Figura. 5.12.	Alineación entre el manipulador industrial CRS A255 y el dispositivo háptico .....	68
Figura. 5.13.	Interfaz de usuario del Sistema de Teleoperación.....	69
Figura. 5.14.	Inicializar la comunicación .....	70
Figura. 5.15.	Sistema listo .....	71
Figura. 5.16.	Validación de movimiento.....	72
Figura. 5.17.	Botón de parada (STOP) .....	72
Figura. 5.18.	Tolerancia del sistema de teleoperación .....	73
Figura. 5.19.	Diagrama para pruebas de trazo del sistema de teleoperación..	74
Figura. 5.20.	Trazo por puntos – Sistema de Teleoperación (Dispositivo Háptico)	74
Figura. 5.21.	Puntos para el cálculo de la repetibilidad del sistema .....	75
Figura. 5.22.	Punto con mayor número de repeticiones (J) .....	76
Figura. 5.23.	Trazo de línea – Sistema de Teleoperación .....	77
Figura. 5.24.	Trazo de polígono – Sistema de Teleoperación .....	77
Figura. 5.25.	Trazo de arco PQ – Sistema de Teleoperación .....	78
Figura. 5.26.	Trazo de arco UT – Sistema de Teleoperación .....	79
Figura. 5.27.	Trazo de circunferencia – Sistema de Teleoperación.....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO II

Tabla. 2.1	Características de la línea Phantom .....	9
Tabla. 2.2	Características de la línea Premium .....	10
Tabla. 3.1.	Superficie del área de trabajo horizontal de acuerdo a la altura en z .....	24

### CAPÍTULO III

Tabla. 3.2.	Ángulo de giro dependiendo de la longitud del eslabón .....	26
Tabla. 3.3.	Cálculo del torque mínimo para la articulación uno .....	31
Tabla. 3.4.	Cálculo del torque mínimo para la articulación dos .....	32
Tabla. 3.5.	Resumen de valores de torque e inercia .....	35
Tabla. 3.6.	Resistencia Vs. Ángulo potenciómetro lineal – Prototipo Uno ....	39
Tabla. 3.7.	Voltaje Vs. Ángulo potenciómetro lineal – Prototipo Final .....	40

### CAPÍTULO IV

Tabla. 4.1.	Parámetros de configuración - puerto serial RS232 .....	47
Tabla. 4.2.	Parámetros de Denavit - Hartenberg .....	53

### CAPÍTULO V

Tabla. 5.1.	Desviación y Error porcentual – Trazo por puntos .....	75
Tabla. 5.2.	Desviación y Error porcentual – Trazo de línea .....	77
Tabla. 5.3.	Desviación y Error porcentual – Trazo de polígono .....	78
Tabla. 5.4.	Desviación y error porcentual – Trazo de arco PQ .....	79
Tabla. 5.5.	Desviación y error porcentual – Trazo de arco UT .....	79
Tabla. 5.6.	Desviación y error porcentual – Trazo de circunferencia .....	80

## GLOSARIO

**Grado de libertad:** Se refiere a la capacidad de movimiento en un espacio tridimensional hacia: delante/atrás, arriba/abajo, izquierda/derecha, guiñada, cabeceo y alabeo. El movimiento a lo largo de cada uno de los ejes es independiente de los otros, y cada uno es independiente de la rotación sobre cualquiera de los ejes.

**Háptico:** No aparece en el diccionario de la Real Academia Española y proviene del griego *háptō* que significa relativo al tacto.

**Repetibilidad:** Capacidad de reproducción de las mediciones realizadas con un dispositivo al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación. Se considera en general su valor máximo y se expresa en porcentaje del alcance (span).

**Resolución:** Cantidad más pequeña de incremento posible de determinar, siendo por tanto la cantidad de medida más pequeña a detectar.

**Retroalimentación de fuerza:** Área de la háptica, trata con dispositivos que interactúan con músculos y tendones, dando al humano una sensación de aplicación de fuerza.

**Retroalimentación propioceptiva:** Permite obtener información acerca de la posición del cuerpo del operador, analizando información sobre el funcionamiento armónico de músculos, tendones y articulaciones.

**Retroalimentación táctil:** Trata con dispositivos que interactúan con los nervios terminales en la piel los cuales indican la presencia de calor, presión y textura.

**Sensibilidad:** Es la razón de cambio de la salida frente a cambios en la entrada. También es definida como la salida obtenida por unidad de entrada.

**Teleoperación:** Conjunto de tecnologías que comprenden la operación o gobierno a distancia de un dispositivo por un ser humano.

## ***HOJA DE RECEPCIÓN***

El presente proyecto fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército desde Sangolquí, 24 de Marzo del 2011

---

Ing. Víctor Proaño

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

---

Fausto R. Gómez P.

---

Karina A. Hernández F.