

DISEÑO Y CONTRUCCION DE PROTOTIPO DE ROBOT SCARA 3 DOF

DIEGO ALBERTO MARTÍNEZ CASTELLANOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

DISEÑO Y CONTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE ROBOT SCARA 3 DOF

DIEGO ALBERTO MARTÍNEZ CASTELLANOS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

CARLOS BORRAS PINILLA

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

*Este triunfo, producto de Muchos esfuerzos
y momentos de gloria va consagrado especialmente:*

A Dios.

*A la memoria de mi Madre, a quien llevo con mucho cariño en mi
corazón, me enseñó el valor de la Fortaleza y
La perseverancia.*

*A mi padre, pilar de mi formación,
Quien siempre me ha apoyado incondicionalmente,
y me ha dado valiosos consejos para la vida.*

*A toda mi familia, que siempre ha sido mi motivo de superación y me ha
dado moral para superar las situaciones difíciles y seguir Adelante.*

*A mis amigos, con quienes he compartido
Valiosas experiencias de vida.*

Diego Martínez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander. Por brindarme la oportunidad de formarme a nivel profesional.

Al profesor Carlos Borrás por sus valiosas orientaciones y su apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros de lucha, a los grupos de investigación DICBOT y ERA de la Universidad Industrial de Santander, por todo el apoyo y colaboración, brindado desde el principio del proyecto en todos los campos.

A Henry Cruz, Gonzalo Calderón y Mauricio Jaraba, técnicos de la escuela de Ingeniería mecánica y Diseño Industrial por su colaboración.

Y especialmente a mi familia, por su comprensión, paciencia y respaldo incondicional durante mi formación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	16
1. DESCRIPCION DEL PROYECTO	18
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2 JUSTIFICACIÓN PARAR LA SOLUCIÓN	18
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	19
1.3.1 Objetivos Generales	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	20
1.5 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	23
1.6 VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS MEDIANTE LA MATRIZ QFD.	25
2. MARCO TEORICO	26
2.1 DEFINICIÓN DE ROBOT	26
2.2 CLASIFICACIÓN GENERAL	26
2.3 ROBOT MANIPULADOR	29
2.4 CARACTERÍSTICAS DE UN ROBOT MANIPULADOR	30
2.5 COMPONENTES DE UN ROBOT MANIPULADOR	32
2.5.1 Estructura mecánica	32
2.5.2 Actuadores	36
2.5.3 Sistema de transmisión	39
2.6 TIPOS DE CONFIGURACIONES	45
2.7 ROBOT SCARA	46

3. DISEÑO MECATRONICO DEL ROBOT SCARA 3 DOF	49
3.1 DIMENSIONAMIENTO DEL ROBOT SCARA	52
3.2 DETERMINACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO	54
3.3 MODELO CINEMÁTICO	55
3.3.1 Modelo cinemático directo	55
3.3.2 Modelo cinemático inverso	58
3.4 DISEÑO MECÁNICO	60
3.4.1 Diseño de la base	63
3.4.2 Diseño del brazo y del Antebrazo	64
3.4.3 Diseño de las Articulaciones	66
3.4.4 Selección de actuadores	73
3.5 DESCRIPCIÓN Y SELECCIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS	77
3.5.1 Descripción de la fuente de Alimentación.	77
3.5.2 Descripción de la Tarjeta de control.	78
3.5.3 Selección de la Tarjeta de potencia.	81
3.5.4 Selección de sensores	84
4. CONTROL DEL ROBOT SCARA 3 DOF	86
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.	86
4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL POR PC.	86
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE.	87
4.4 PROGRAMACIÓN	92
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	105
6. COSTO DEL PROYECTO	110
7. CONCLUSIONES	116
BIBLIOGRAFIA	117

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Especificaciones del robot KR 5 SCARA R350 KUKA ROBOTICS,	22
Figura 2. Especificaciones del robot SCARA R350 E2C251 EPSON.	23
Figura 3. Arquitectura de un robot Industrial.	26
Figura 4. Estructura mecánica de un robot manipulador.	33
Figura 5. Tipos de bases de manipuladores robóticos según su instalación.	34
Figura 6. Tipos de articulaciones más usadas en manipuladores robóticos.	35
Figura 7. Actuadores Hidráulicos en un robot de limpieza del fuselaje de un Avión.	37
Figura 8. Actuadores eléctricos utilizados en robótica: A. Motor DC de imán permanente con codificador. B servomotor Hobbico. C. Motor de pasos. D. motor AC trifásico. E. Actuator linear eléctrico. F. Actuator linear sin escobillas.	38
Figura 9. Actuadores Neumáticos de uso común en robótica.	39
Figura 10. Transmisión de accionamiento directo.	41
Figura 11. Clasificación general de sensores utilizados en robots Manipuladores.	43
Figura 12. Sensores de presencia: A. sensor Óptico. B. sensor Inductivo. C. sensor Reed. D. Final de carrera. E. sensor ultrasónico. F. Sensor de efecto Hall.	44
Figura 13. Sensores de posición: A. Encoder incremental. B. Resolver. C. Potenciómetro. D. Codificador Óptico lineal.	44
Figura 14. Tipos de configuraciones de robots manipuladores industriales.	46

Figura 15. Robot SCARA 4 DOF: a). para montaje en el plano. b).para Manipulación horizontal.	47
Figura 16. Principales Aplicaciones del Robot SCARA.	48
Figura 17. Tópicos que contempla el Diseño Mecatrónico del Robot SCARA.	49
Figura 18. Metodología de aproximación al diseño de robots como sistemas mecatrónicos.	52
Figura 19. Parámetros y dimensiones del robot SCARA.	53
Figura 20. Espacio de trabajo Máximo del ROBOT SCARA 3 DOF, unidades en mm.	54
Figura 21. Parámetros D-H de un manipulador robótico.	56
Figura 22. Parámetros de la cinemática Directa del Robot Scara 3 DOF.	58
Figura 23. Configuraciones para determinar las soluciones del modelo cinemático inverso del robot SCARA 3 DOF	59
Figura 24. Componentes principales de la Estructura Mecánica del Robot SCARA 3 DOF.	61
Figura 25. Componentes de la Base del Robot SCARA 3 DOF.	64
Figura 26. Simulación de esfuerzos y Deformaciones en el antebrazo.	65
Figura 27. Simulación de esfuerzos y Deformaciones en el brazo.	65
Figura 28. Montaje de los elementos de la articulación del Hombro del Robot SCARA 3 DOF.	66
Figura 29. Cuerpo de la articulación del Hombro del Robot SCARA 3 DOF.	67
Figura 30. Detalles de mecanizado de la placa superior del Robot SCARA 3 DOF.	67
Figura 31. Piezas que componen la articulación del Codo del Robot SCARA 3 DOF.	68
Figura 32. Nomograma de Cálculo de los factores de Carga dinámica de un rodamiento.	69
Figura 33. Tabla de Selección de los rodamientos de bolas	70
Figura 34. Dimensiones estándar de un rodamiento de bolas.	70
Figura 35. Circuito neumático del Efecto Final.	76

Figura 36. Módulos eléctricos y electrónicos del Robot SCARA 3 DOF.	77
Figura 37. Elementos que conforman un sistema de adquisición de Datos de National Instruments .	78
Figura 38. Tarjeta de Adquisición de Datos NI USB 6216.	80
Figura 39. Tarjeta de Potencia MAGNEVATION con los Drivers LMD18200t.	81
Figura 40. Diagrama electrónico del circuito integrado LMD18200t.	83
Figura 41. Características del circuito integrado LMD18200t.	84
Figura 42. Componentes de un encoder y las señales generadas.	85
Figura 43. Esquema básico de un sistema de control por PC	87
Figura 44. Panel Frontal de Labview.	89
Figura 45. Diagrama de bloques.	90
Figura 46. Paleta de panel Frontal y Diagrama de bloques.	91
Figura 47. Función de Labview utilizada para la adquisición y generación de señales Instruments	92
Figura 48. Diagrama de Flujo del Programa de control.	93
Figura 49. Configuración de la función bloque de lectura de encoders .	94
Figura 50. Configuración de la función bloque de lectura de señales digitales de finales de carrera.	95
Figura 51. Diagrama de bloques de control retroalimentado de una articulación.	96
Figura 52. Diagrama de bloques de control retroalimentado de una articulación.	97
Figura 53. Diagrama de bloques de controlador on/off.	99
Figura 54.. Bloque del simulador y forma de la onda de la señal PWM .	100
Figura 55. Código fuente del Cálculo del Modelo Cinemático Directo.	101
Figura 56. Presentación de Interfaz grafica de usuario.	102
Figura 57. Presentación de Interfaz grafica de usuario.	103
Figura 58. Sección del panel de pruebas.	104
Figura 59. Sección del panel de pruebas.	104

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Matriz QFD.	25
Tabla 2. Clasificación general de los robots según los institutos y asociaciones mundiales [11].	27
Tabla 3. Mecanismos de transmisión utilizados en robots: ventajas y desventajas.	40
Tabla 4. Dimensiones y parámetros del Robot SCARA 3 DOF.	53
Tabla 5. Representación Denavit-Hartenberg del Robot SCARA 3 DOF.	56
Tabla 6. Cálculo de las cargas que actúan en los elementos mecánicos.	62
Tabla 7. Cálculos del Diseño del resorte de torsión de la articulación del Hombro.	72
Tabla 8. Características del Motor de la articulación del Hombro.	74
Tabla 9. Características del Motor de la articulación del codo.	75
Tabla 10. Características del cilindro neumático.	76
Tabla 11. Especificaciones de la Tarjeta de Adquisición de Datos NI USB 6216.	79
Tabla 12. Resultados de las pruebas de Posicionamiento para la articulación del hombro.	106
Tabla 13. Resultados de las pruebas de Posicionamiento para la articulación del codo.	107

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. HOJAS DE DATOS DE LOS ACTUADORES Y SENSORES UTILIZADOS	119
ANEXO B. HOJA DE ESPECIFICACIONES DE LA TARJETA DE ADQUISICION.	124
ANEXO C. HOJA DE DATOS DEL CONTROLADOR PUENTE H Y LA TARJETA DE POTENCIA	125
ANEXO D. ESPECIFICACIONES DE LA FUENTE DE POTENCIA	127
ANEXO E. TABLA DE SELECCIÓN DEL RODAMIENTO.	128
ANEXO F. CARACTERISTICAS DE LA ELECTROVALVULA NEUMATICA	129
ANEXO G. PLANO DE CONEXIONES ELECTRÓNICAS	130

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT SCARA 3 DOF*.

AUTOR: DIEGO ALBERTO MARTINEZ CASTELLANOS**.

PALABRAS CLAVES: Manipulador Industrial, Control de posición, Cinemática Directa, Cinemática Inversa, Mecatrónica, control ON/OFF, control retroalimentado.

El objetivo de este proyecto de grado es diseñar y construir un prototipo experimental de robot SCARA de 3 grados de libertad controlado por computador en su primera etapa, como herramienta de investigación y apoyo académico en las áreas de Robótica industrial, Sistemas Mecatrónicos e Ingeniería de control.

El robot SCARA es uno de los manipuladores industriales más utilizados en procesos productivos automatizados, debido a su estructura simple y versatilidad al momento de realizar operaciones de movimiento de objetos y ensamblaje en el plano horizontal es ideal para desarrollar tareas requieran cierta precisión, velocidad y flexibilidad, características que actualmente están mejorando y que son objeto de investigación para extender sus aplicaciones a otros campos.

El diseño del prototipo se llevó a cabo abordando una metodología de aproximación al diseño mecatrónico en donde se analizaron conjuntamente el sistema mecánico, el sistema electrónico y el sistema de control por computador basado en los requerimientos de funcionamiento planteados. Inicialmente se hizo una revisión de la teoría de la robótica haciendo énfasis en los modelos de Cinemática Directa y Cinemática Inversa. El diseño CAD y las simulaciones se realizaron haciendo uso de las herramientas informáticas (Matlab, Solid Works y Lab View). El sistema de control se realizó mediante una interfaz gráfica en LabView que permite el monitoreo de las variables articulares y las coordenadas de posición mediante un dispositivo de adquisición de datos que al mismo tiempo permite la implementación de controladores de lazo abierto (ON/OFF) y un control de posición con retroalimentación (PID).

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Carlos Borrás Pinilla.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SCARA ROBOT PROTOTYPE 3 DOF*

AUTOR: DIEGO ALBERTO MARTINEZ CASTELLANOS**

KEYWORDS: Industrial Manipulator, Position, Forward Kinematics, Inverse Kinematics, Mechatronics, On/Off control, Feedback control .

The objective of this degree project is to design and construct a experimental SCARA robot prototype of 3 degrees of freedom controlled by computer, in the first stage, as a research tool and academic support in the areas of Industrial Robotics, Mechatronics Systems and Control Engineering.

The SCARA robot is one of the most widely used industrial manipulators automated production processes due to its simple structure and versatility when performing operations of assembly and movement of objects in the horizontal plane is ideal for development tasks require some precision, speed and flexibility, features that are currently being improved and are under investigation to extend their applications to other fields.

The prototype design was done addressing methodology mechatronic design approach where the system is analyzed together mechanical, electronic and computer control system based on functional requirements posed. Initially, we reviewed the theory of robotic emphasizing on the Direct Kinematics and Inverse Kinematics. CAD design and simulations were performed using the tools (Matlab, Solid Works and LabView). The control system was performed using a LabView graphical interface that allows monitoring of the joint variables and the coordinates of position by a data acquisition device at the same time allows the implementation of open-loop controllers(ON / OFF) and position control with feedback (PID).

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Eng. Carlos Borrás Pinilla

INTRODUCCION

Actualmente la industria nacional se enfrenta al reto de mantener y mejorar su competitividad en el mercado mundial, en la cual la optimización de los procesos productivos mediante la automatización es clave para alcanzar este propósito y en consecuencia, la Universidad Industrial de Santander en su actividad misional considera los proyectos de grado como una estrategia para fortalecer en los estudiantes la capacidad investigativa y así contribuir al desarrollo del conocimiento y su aplicación para generar impacto en el sector productivo regional y nacional. En el campo de la automatización industrial, la escuela de Ingeniería Mecánica ha venido desarrollando actividades curriculares y de investigación enfocadas a reforzar y actualizar conocimientos en esta área.

Dado que el campo de aplicación de la automatización es muy extenso y se encuentra evolucionando continuamente, el presente trabajo se enfoca particularmente en el área de la robótica industrial, principalmente en el estudio del robot SCARA el cual es uno de los manipuladores más utilizados en sistemas productivos automatizados y este momento es objeto de investigación de muchas disciplinas de la ingeniería en diferentes universidades del mundo.

El robot SCARA es usado en sistemas de manufactura flexible, labores de ensamblaje de componentes electrónicos, envasado y empaclado de productos especialmente en células de trabajo, donde interactúa con sistemas de transporte, cumpliendo la función de llevar objetos de una zona a otra.

Con la finalidad de llevar a la práctica conocimientos relacionados con la ingeniería de control, la automatización y la robótica, se ha diseñado y construido un prototipo experimental de un robot SCARA de 3 grados de libertad, controlados por PC como herramienta didáctica para realizar pruebas relacionadas con la

cinemática directa e inversa de este tipo de manipuladores y control de posición en su primera fase de desarrollo, dejando abierta la posibilidad de implementar otros tópicos como la generación de trayectorias, técnicas de control robusto y la programación de tareas sencillas,

1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la Universidad Industrial de Santander pocos estudiantes de ingeniería desarrollan competencias suficientes en diseño, construcción, programación y mantenimiento de dispositivos robóticos, lo que reduce su capacidad para afrontar la llegada de nuevos equipos con estas tecnologías a las industrias de nuestro país. Esta problemática se debe a las falencias que existen en la universidad en la Preparación de los estudiantes en temáticas de actualidad como la robótica y Afines. Una de las razones por las cuales ocurre esto, es la ausencia de Cursos formales en robótica. De igual manera se carece de herramientas que permitan realizar un aprendizaje teórico y práctico acerca de los diferentes componentes y sistemas que conforman o intervienen en la implementación de la robótica. Es necesario contar con dispositivos que permitan llevar a la práctica la fundamentación teórica de la robótica mediante la experimentación. Actualmente existen en la universidad dos grupos de investigación en Robótica, DICBOT (Dinámica Control y Robótica) de la Escuela de Ingeniería Mecánica y ERA (Electrónica y Robótica avanzada) de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones que requieren de mejores herramientas que faciliten su labor en la investigación.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARAR LA SOLUCIÓN

Con la finalidad de contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander, de generar conocimiento y aportar soluciones útiles a la comunidad mediante la investigación, concretamente en el aérea de la robótica se busca

diseñar y construir un prototipo de brazo robótico SCARA de 3 GD para propósitos académicos. A nivel académico, la práctica sobre plataformas robóticas de carácter didáctico utilizadas como material de apoyo en la enseñanza, despierta el interés y estimula el desarrollo de habilidades en los estudiantes de diversas disciplinas como Ingeniería Mecánica, Electrónica, eléctrica, Sistemas y Diseño Industrial, en temas como la programación, el control, el diseño, entre otros. Muchas veces el aprendizaje en la robótica se basa en la tendencia del constructivismo y el estudio de estos temas se convierte en un reto para que el estudiante aplique los conocimientos adquiridos a lo largo de su carrera y materialice sus ideas para plantear alternativas de solución a diversos problemas de la industria.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivos Generales

Contribuir con la misión de la Universidad de generar y adecuar conocimiento aplicable a la industria mediante el diseño y construcción de un prototipo de manipulador robótico como apoyo académico, de esta manera dar continuidad a las líneas de investigación relacionadas con el área de Robótica, mediante el desarrollo de proyectos que integren áreas de conocimiento de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, ingeniería de Sistemas y abrir nuevos campos de aplicación de esta tecnología.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un prototipo experimental de manipulador Tipo SCARA eléctrico de 3 grados de libertad para realizar pruebas relacionadas con la cinemática Directa e inversa del mismo, con las siguientes características.

- Dimensiones Generales Máximas: 50x50x50 cm.
 - Alcance Horizontal entre 18 y 24 cm.
 - Desplazamiento Vertical entre 6 y 10 cm.
 - Accionamiento Eléctrico y/o neumático.
 - Potencia Inferior a 300 W
- Implementar un sistema de adquisición de datos en Matlab Simulink o Labview para la medición, análisis y control de variables de posicionamiento del efector final y variables articulares para logra un error inferior a 5%.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Varias compañías producen y comercializan productos dirigidos al aprendizaje y desarrollo de la robótica. En algunos casos, las universidades hacen uso de estos dispositivos disponibles en el mercado, pero lo ideal es que la práctica e investigación comience desde la concepción del sistema o la plataforma como tal y se extienda a la investigación y el desarrollo de los algoritmos de control. Es importante y de mucho valor la experiencia que se adquiere durante el desarrollo de la parte física del robot. Adicionalmente, al construir una plataforma propia se buscaba también limitar la dependencia tecnológica que se tiene con los países desarrollados y demostrar que se cuenta con los conocimientos y el talento humano necesarios para la realización de dispositivos de este tipo.

En cuanto a los modelo de robots SCARA que se ofrecen en el mercado son típicamente para aplicación industrial, en la mayoría de los caso para coger y colocar, son robustos teniendo en cuenta que el diseño de su estructura y las características de sus actuadores le permiten manejar cargas pesadas a alta velocidad y precisión, además de contar con su propia interfaz y rutina de instrucciones, restringiendo uso netamente a la operación de dispositivo en el

entorno típico de su operación, sin embargo para labores de uso académicas e investigativas, no tiene suficiente flexibilidad en cuanto experimentación con diferentes técnicas de control, medición de variables, programación, montaje de componentes y desarrollar otras actividades enriquecedoras en la formación del ingeniero.

Desde el punto de vista económico los robots no se consiguen en el mercado nacional, por lo que es necesario importarlos; el precio de un robot SCARA para aplicación coger y colocar, varía entre los 1500 y 7000 dólares dependiendo de sus características, adicionalmente se deben tener en cuenta los costos de envío, impuesto de importación y los inconvenientes de costos relacionados con el mantenimiento, entre los cuales los cuales están : servicio técnico especializado, disponibilidad de repuestos, entre otros etc.

- **Alternativa A.** Adquirir un robot KR 5 Scara R350 de la compañía europea KUKA-ROBOTICS cuyo costo es aproximadamente 2600 euros, sus características de desempeño (precisión, repetitividad, velocidad, etc.) lo hacen ideal para el desarrollo de tareas industriales específicas donde el proceso productivo demande la implementación de sistemas integrados automatizados de ensamblaje, transporte y empaque dentro de una línea de producción, sin embargo este equipo trae consigo su propio software para programar tareas relacionadas con su operación y control exclusivas y no brinda la posibilidad de realizar pruebas experimentales.

Figura 1. Especificaciones del robot KR 5 SCARA R350 KUKA ROBOTICS,



KR 5 SCARA R350

El KR 5 scara R350 tiene un alcance de 350 mm con una capacidad de carga de 5 kg y una alta exactitud de posicionamiento de menos de 0,02 mm. El robot mismo necesita solamente una superficie de emplazamiento de aprox. 150 x 150 mm. Los robots SCARA de KUKA combinan las mecánicas SCARA más rápidas y más vendidas en el mundo con la unidad de control del robot basada en la técnica del PC más probada y vendida en el mundo. Por supuesto, la gran diversidad de distintos robots KUKA de 4 y 6 ejes puede combinarse de cualquier forma, siempre con la ventaja de la misma plataforma de control.

Cargas	
Carga	5 kg
z-movimiento	200 mm / 320 mm
Zona de trabajo	
Máx. alcance	350 mm
Otros datos y modelos	
Número de ejes	4
Repetibilidad	<±0,015 mm
Peso	20 kg
Posiciones de montaje	Suelo
Unidades de control	KR C2sr
Velocidad	max. 7,2 m/s

Fuente www.kuka-robotics.com

- **Alternativa B.** Comprar un modelo robótico Epson E3C251 cuesta US\$ 2000, en cuanto a sus características técnicas resulta una opción sobredimensionada para esta aplicación, este modelo además presenta una estructura robusta y compacta especialmente diseñado para operar a altas velocidades en un ambiente industrial en labores de paletización y manipulación, al igual que la opción anterior también trae su propio software, con su sistema de control implementado y listo para ser utilizado en aplicaciones industrial, también es importado, lo cual crea dependencia del fabricante para cuestiones del mantenimiento, convirtiéndose en una caja negra en la que el estudiante se limita a la operación del dispositivo y las posibilidades de experimentar no son enriquecedoras desde el punto académico.

Figura 2. Especificaciones del robot SCARA R350 E2C251 EPSON.



Robot Model		E2C251(E2C251C)
Configuration		SCARA 4 Axis AC Servo
Maximum Payload		3 KG
Axis Range	T1+T2	250mm
	Z	120mm (100mm clean)
	U	+/- 360
Speed	T1+T2 (combined)	2900 mm/s
	Z	1100 mm/s
	U	2600 deg/s
Repeatability	T1+T2	+/-0.008mm (0.000315 inches)
	Z	+/-0.010mm (0.0004 inches)
	U	+/-0.020 deg
Cycle Time(1" x 12" x 1" and back)		0.395 seconds
Moment of Inertia (U Axis 5Kg Payload)		0.05 Kg*m2
Weight		14Kg
User Lines		15 Electric, 3 Pneumatic, Hollow Quill
Clean Rating		Class 10 (E2C251C) 0.13um particle size

Tomado de www.epson.com

- **Alternativa C.** Corresponde al diseño y construcción de una plataforma experimental del robot SCARA que se ajuste a las especificaciones requeridas.

1.5 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

A continuación se plantean los requerimientos que van a ser tenidos en cuenta en el momento de desarrollar esta propuesta:

- Tamaño: se va a considerar tentativamente un volumen del modelo 50x50x50 cm, es decir el espacio ocupado por el brazo extendido y un peso máximo de 10 kg.
- Bajo consumo de potencia (inferior a 300 W).
- Que se pueda utilizar con fines de investigación medir parámetros cinemáticos de posición y orientación (coordenadas **x**, **y** **z**), variables articulares (desplazamientos y ángulos) y se sea flexible pueda implementar algoritmos de control utilizando PC para lo cual se hace necesario implementar motores con sensores de posición, micro controladores incluidos. un sistema de adquisición

de datos con su respectivo software para visualizar en una interfaz gráfica las variables analizadas, que para este caso se propone desarrollarlo mediante la plataforma de instrumentación virtual de Labview.

- Debe ser fácil de instalar y operar, de manera que el estudiante pueda realizar pruebas utilizando diferentes algoritmos de control y sirva de base para investigaciones relacionadas con el estudio dinámico, generación de trayectorias y programación de secuencias de movimientos, para lo cual se debe desarrollar una guía de instrucciones para el montaje y el uso de la aplicación.
- Debe ser construido en su mayoría de materiales que se consigan en el mercado local y/o nacional con el fin de reducir su costo de fabricación, montaje y mantenimiento.
- Que funcione correctamente, lo cual implica un ajuste correcto de sus componentes estructurales para obtener movimientos bien definidos y evitar deflexiones y holguras que afecten la precisión de posicionamiento.
- Debe tener una buena Presentación, es decir evitar piezas demasiado esbeltas, con bordes agudos, superficies ásperas, cables descubiertos, entre otras.

En esta propuesta de diseño se plantea que el robot Scara sea accionado mediante motores DC y esté dotado de sensores de posición, controladores y un sistema de adquisición de datos para realizar control, medición y análisis utilizando PC con su respectivo software para visualizar en una interfaz gráfica las variables de posición, que para este caso se propone realizarlo mediante la plataforma de instrumentación virtual de Labview, que permite realizar experimentos relacionados con la investigación en modelos cinemática directa, cinemática inversa, planeación de trayectorias, control y otras aplicaciones del robot SCARA con el fin de optimizar sus características de operación mediante la realización de proyectos futuros proyectos de investigación.

1.6 VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS MEDIANTE LA MATRIZ QFD.

Cada una de las alternativas de solución es evaluada cuantitativamente en una escala de de 0 a 100 teniendo en cuenta los requerimientos de diseño en orden de importancia.

Tabla 1. Matriz QFD.

#	REQUERIMIENTOS	% IR	ALT. A	POND. A	ALT. B	POND. B	ALT. C	POND. C
1	Funcionamiento adecuado	33	40	1320	40	1320	20	660
2	Tamaño limitado	20	20	140	20	140	60	420
3	Monitoreo parámetros cinemáticos en PC	27	30	810	30	810	40	1.080
4	Versátil y permita ser utilizado para labores de experimentación en robótica	7	35	245	35	245	30	210
5	Bajo consumo de energía eléctrica	13	30	390	30	390	40	520
	Total	100	190	3.260	190	3.260	220	3670

Fuente. El Autor

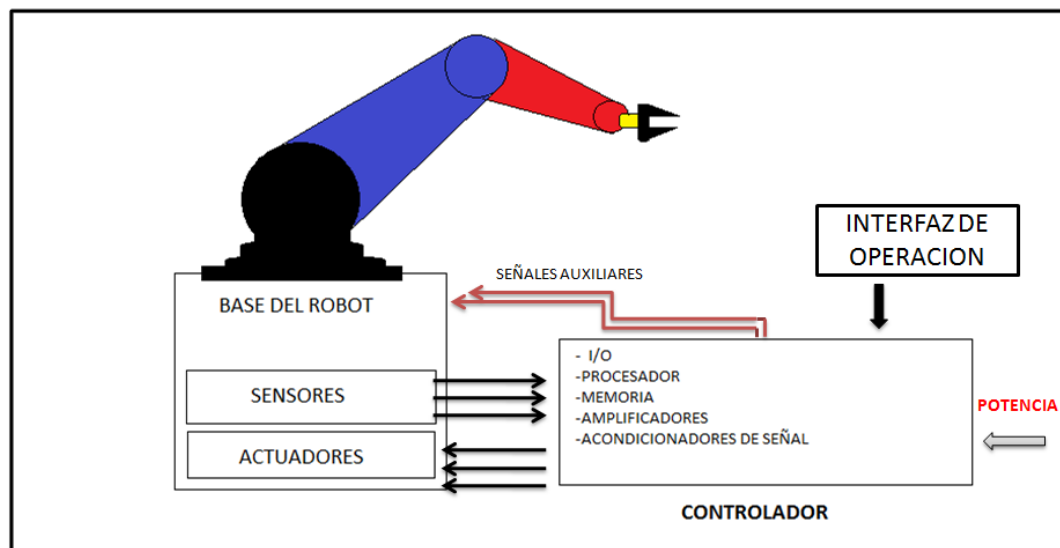
De acuerdo con la matriz de relación de requerimientos QFD, se concluye que la alternativa C es viable y tiene la ventaja frente a las demás opciones de que es la que se ajusta más al requerimiento más importantes que en este caso es diseñar y construir una plataforma física de robot SCARA que pueda ser con fines de Investigación medir parámetros cinemáticos de posición y orientación (coordenadas x, y, z), variables articulares (desplazamientos y ángulos) y se sea flexible pueda implementar algoritmos de control utilizando PC .

2. MARCO TEORICO

2.1 DEFINICIÓN DE ROBOT

Es una máquina desarrollada para el cumplimiento de diferentes tareas ya sea en la industria o para la diversión. Estas máquinas están equipadas de componentes mecánicos y electrónicos que funcionan coordinadamente bajo la dirección de un sistema de control que le permite realizar movimientos y actividades similares a las del ser humano.

Figura 3. Arquitectura de un robot Industrial.



Tomado de [1]

2.2 CLASIFICACIÓN GENERAL

Existen varios tipos de clases de robots manipuladores; sin embargo, lo concerniente a control de manipulador se centra principalmente en la definición

del **Robot Institute of America**, sobre robots inteligentes. La tabla 2.1 muestra las diversas clasificaciones. [11].

Tabla 2. Clasificación general de los robots según los institutos y asociaciones mundiales [11].

Tipología y descripción según la acepción europea y la RIA(1)	Clasificación según JIRA(2)	Clasificación según AFRI(3)
<p>1) Manipulador simple</p> <p>Sistema mecánico poliarticulado y multifuncional concebido para ayudar al hombre y mandado directamente por este. Su nivel de automatización es muy pequeño o nulo.</p>	<p>A) Manipulador manual</p> <p>Manipulador operado directamente por el hombre.</p>	<p>A) Manipulador manual Dispositivo manipulador mandado por el hombre, con un mínimo de 4 grados de libertad.</p> <p>A1) Manipulador de asistencia muscular: El mando se hace por acción directa sobre la carga o en su proximidad.</p> <p>A2) Telemanipulador : El mando se hace a distancia por medio de palancas o pulsadores.</p>
<p>2) Manipulador secuencial Manipulador que realiza paso a paso, de forma autónoma, tareas repetitivas en condiciones preestablecidas.</p> <p>2a) Manipulador de secuencia fija La de pasos y las condiciones son</p>	<p>B) Robots secuenciales Manipulador cuyas etapas operan secuencialmente de acuerdo con el procedimiento preestablecido, las condiciones y las posiciones.</p> <p>B1) Robot de secuencia fija La información</p>	<p>B) Manipulador automático (MA) Dispositivo de manipulación, - Multieje - No servocontrolado - De ciclo automático</p> <p>B1) MA de secuencia fija Regulado mecánicamente mediante topes, levas..</p>

Tipología y descripción según la acepción europea y la RIA(1)	Clasificación según JIRA(2)	Clasificación según AFRI(3)
<p>difícilmente variables.</p> <p>2b) Manipulador de secuencia variable (Pick and Place Robot) Tanto la secuencia como las condiciones pueden cambiarse con facilidad poseyendo cierta flexibilidad.</p>	<p>preestablecida no se puede cambiar fácilmente</p> <p>B2) Robot de secuencia variable La información preestablecida se puede cambiar fácilmente.</p>	<p>B2) MA de secuencia variable Programable por el usuario mediante matrices de diodos, autómatas programables o microprocesadores y en el que cada eje es ajustado mecánicamente por medio de topes o levas.</p>
<p>3) Robot de aprendizaje (Playback Robot) Manipulador que repite una secuencia que ha almacenado en su memoria y que con anterioridad ha aprendido mediante la enseñanza de un operador humano existiendo diversas formas de realizarla.</p>	<p>C) Robot de aprendizaje El operador enseña al manipulador la forma de trabajo, manejándolo directamente, para que el robot la memorice; a continuación puede repetir continuamente sus operaciones</p>	<p>C) Robot programable Manipulador de 3 o más ejes, servorregulado con trayectoria continua o punto a punto. Programable por aprendizaje y/o lenguaje simbólico. C1) MA Con menos de 5 ejes y</p>
<p>4) Robot con control numérico (NC Robot) Manipulador que recibe las órdenes relativas a la secuencias y condiciones de trabajo directamente en forma numérica</p>	<p>D) Robot con control numérico El manipulador puede ejecutar la operación encomendada de acuerdo con la información almacenada cerca de la posición, secuencia y posición.</p>	<p>servorregulado con trayectoria continua o punto a punto. C2) MA con 5 o más ejes y servorregulado con trayectoria punto a punto. C3) MA con 5 o más ejes, con trayectoria continua.</p>
<p>5) Robot inteligente (Robot propiamente</p>	<p>E) Robot inteligente Robot que puede</p>	<p>D) Robot “Llamado Inteligente”</p>

Tipología y descripción según la acepción europea y la RIA(1)	Clasificación según JIRA(2)	Clasificación según AFRI(3)
<p>dicho en sentido estricto) Manipulador dotado de un complejo sistema de control, comportando una cierta inteligencia artificial y dotado de un equipo de sensores que le permite examinar variaciones de su entorno y decidir en tiempo real, en función del contexto, las acciones a realizar y las secuencias de trabajo. Robot con el máximo nivel de automatización posible.</p>	<p>Decidir su Comportamiento a través de su capacidad sensorial y de reconocimiento.</p>	<p>MA servo regulado capaz de analizar las modificaciones de su entorno y reaccionar de forma consecuente. Se excluyen las modificaciones triviales provenientes de los captadores todo o nada.</p>

2.3 ROBOT MANIPULADOR

Un robot manipulador es un mecanismo compuesto por eslabones conectados entre sí mediante articulaciones, que parten de una base fija y terminan en una herramienta o un terminal de sujeción, en algunos casos siendo morfológicamente similar a un brazo humano, es multifuncional y puede ser gobernado directamente por el ser humano o mediante un dispositivo lógico.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE UN ROBOT MANIPULADOR

Los robots son máquinas “universalmente reprogramables”, capaces de realizar una amplia variedad de tareas, factores prácticos y económicos determinan que se deben diseñar manipuladores específicamente para cierto tipo de tareas. Por eso se establecen una serie de parámetros geométricos y mecánicos que deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar o seleccionar un manipulador para una determinada aplicación.

Las principales características de un robot manipulador industrial son:

- **Número de grados de libertad (DOF)**

Se refiere al conjunto de movimientos de translación en un espacio tridimensional, combinados con la rotación sobre tres ejes perpendiculares (alabeo, cabeceo y guiñada), el número de grados de libertad coincide con el número de actuadores, entre mayor sea el número de grados de libertad de un manipulador mayor será la flexibilidad para posicionar una herramienta y ejecutar múltiples tareas,

- **Estructura cinemática.**

Genéricamente los robots manipuladores son una cadena cinemática abierta (de 2 o más GDLs) donde el movimiento de salida es función de los movimientos de entrada y la forma como están interconectados los elementos que componen el manipulador enfocándose a los tipos de juntas o articulaciones,

- **Volumen de trabajo.**

El volumen de trabajo es el espacio total que el efector final del manipulador puede alcanzar. El volumen o espacio de trabajo está determinado por la geometría del manipulador así como también de las limitaciones de las

articulaciones y además es un criterio de selección muy importante para determinar su utilidad.

- **Máxima carga útil.**

Es una característica de desempeño especificada por los fabricantes particularmente en los robots manipuladores que se utilizan en labores de manejo de materiales. Es común para la carga útil que ha de darse por extrema velocidad y las condiciones de alcance. Los límites de carga debe ser verificada para cada aplicación, ya que muchos robots pueden levantar y mover cargas más grandes que la especificada cuando alcance y la velocidad se reduce.

- **Máxima velocidad.**

La velocidad máxima es fundamental para determinar el rendimiento a la hora de implementarlo en una célula automatizada de manufactura. Normalmente los fabricantes de robots manipuladores suministran los datos de velocidades de las articulaciones y en algunos casos se especifican en ciclos de movimiento por unidad de tiempo.

- **Precisión y repetitividad.**

La precisión está determinada por la distancia entre posición del punto deseado y la posición en donde se ubica el efector final. La imprecisión se debe a errores de calibración, a holguras indeseables en la transmisión de las articulaciones o a errores de control y la repetitividad es la capacidad de volver a un mismo punto bajo igualdad de condiciones de carga, la repetitividad está afectada por problemas mecánicos como fricción e histéresis.

- **Resolución:**

Es el mínimo incremento o variación de desplazamiento que puede realizar un robot en su elemento terminal, depende fundamentalmente de la unidad de control del robot, del tipo de actuadores y sensores.

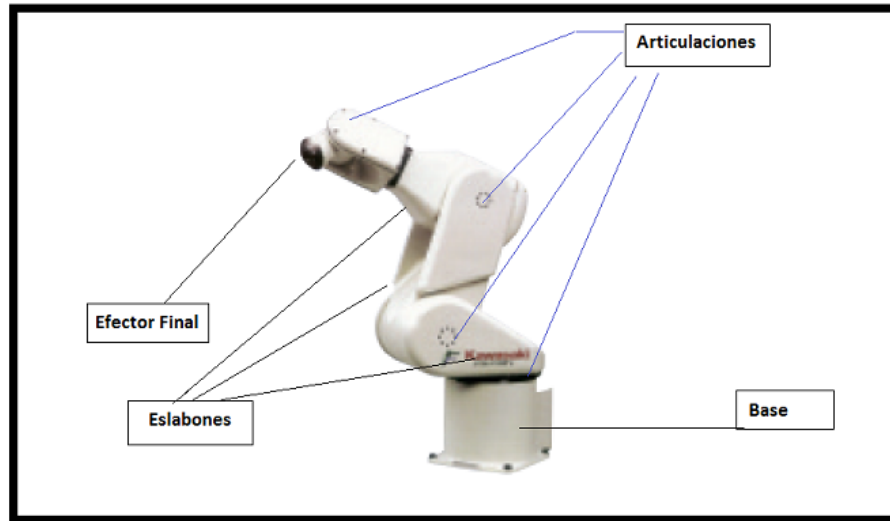
2.5 COMPONENTES DE UN ROBOT MANIPULADOR

Un robot está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales.

2.5.1 Estructura mecánica

Un robot manipulador está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre dos eslabones consecutivos formando lo que se conoce como una cadena cinemática abierta que se caracteriza por el orden en que se encuentran ensambladas las piezas, siendo las más pesadas y robustas la base y los elementos que le siguen hasta llegar al efector final. La mayor parte de los robots manipuladores guardan cierta semejanza con la anatomía del brazo humano, es por eso que en ocasiones se usan términos como cuerpo, hombro, codo y muñeca para describir los elementos que componen un robot. [3]

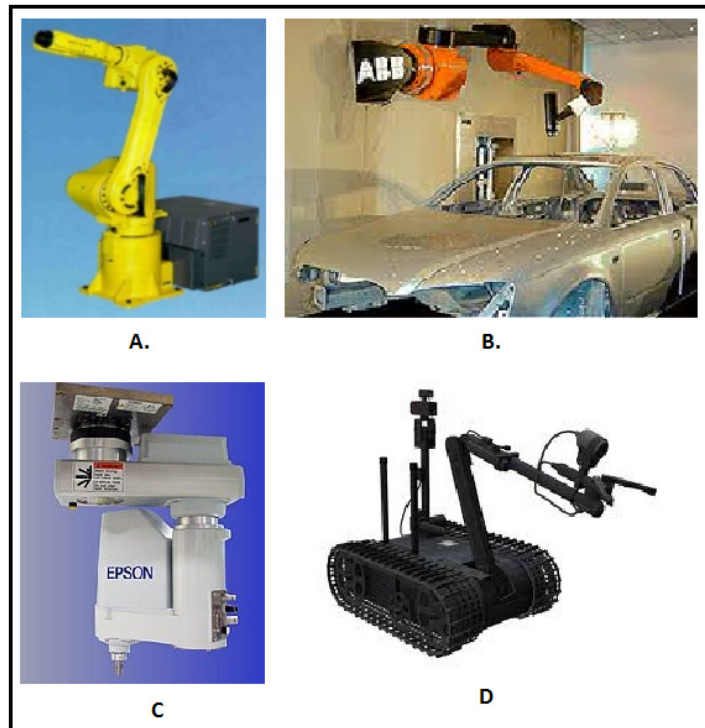
Figura 4. Estructura mecánica de un robot manipulador.



Dentro de la estructura mecánica de un robot manipulador sobresalen los siguientes componentes:

- **La Base:** es el elemento principal de la estructura mecánica, cumple la función de servir de soporte de los demás elementos y de fijar el robot en el lugar de trabajo mediante pernos, se caracteriza por ser el componente más resistente y pesado.

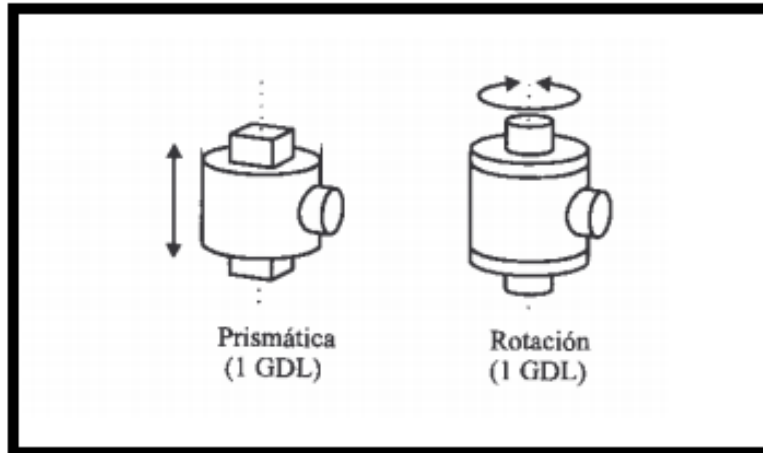
Figura 5. Tipos de bases de manipuladores robóticos según su instalación.



Fuente: el Autor

- **Las articulaciones:** o pares cinemáticos son uniones que existen entre dos elementos sólidos que les permiten a que ambos tengan un movimiento relativo, ya sea de translación en articulaciones primaticas o revolución en articulaciones de rotación, compartiendo un punto, una línea o una superficie en común, siendo los primeros los más utilizados en robots industriales, normalmente en las articulaciones es donde se instalan los actuadores, sensores de movimiento y elementos de transmisión.

Figura 6. Tipos de articulaciones más usadas en manipuladores robóticos.



Tomado de [3].

- **Los eslabones:** son los elementos rígidos que componen un manipulador robótico y en sus extremos se encuentran sus articulaciones las cuales en la mayoría de los casos tienen ejes de rotación paralelos o perpendiculares, normalmente son construidos en materiales de baja relación peso/resistencia pero son costosos y difíciles de fabricar, aunque también pueden ser construidos a partir de perfiles metálicos extruidos tubulares, durante su diseño mecánico se debe tener en cuenta su rigidez ante cargas de flexión y torsión.
- **El efector final:** es el elemento que le permite al robot interactuar con el entorno de trabajo y es diseñado exclusivamente para el cumplimiento de una tarea específica siendo, los efectores finales pueden ser herramientas o elementos de sujeción. Los efectores finales de sujeción se clasifican según la forma de agarrar y sostener los objetos, dentro de este grupo están las pinzas, ventosas, pinzas magnéticas, adhesivas, etc. En muchas aplicaciones el robot debe realizar operaciones diferentes a la manipulación de objetos, sino que usan herramientas que pueden ser utilizadas en labores de soldadura, mecanizado de precisión, corte de

materiales, pintura, acabado de superficies, ensamblaje, dosificación y envasado, etc.

2.5.2 Actuadores

Los actuadores suministran la fuerza motriz de los robots y están ampliamente disponibles en el mercado, además pueden ser modificados y adaptados de acuerdo a la aplicación del robot. Los actuadores más usados se clasifican en electromagnéticos, hidráulicos y neumáticos.

- **Actuadores Hidráulicos:** se caracterizan por ofrecer alta capacidad de fuerza y alta relación potencia/peso. La alimentación de los actuadores hidráulico es suministrada generalmente por un motor eléctrico o motor de combustión que impulsa la bomba que impulsa el fluido de trabajo a alta presión hasta llegar a los actuadores. Los actuadores hidráulicos más usados comúnmente son los cilindros lineales, actuadores rotativos de paletas y los motores hidráulicos y el control de estos se realiza mediante válvulas solenoide (on/off), válvulas proporcionales o servo válvulas las cuales son accionadas por un circuito de control de baja potencia.

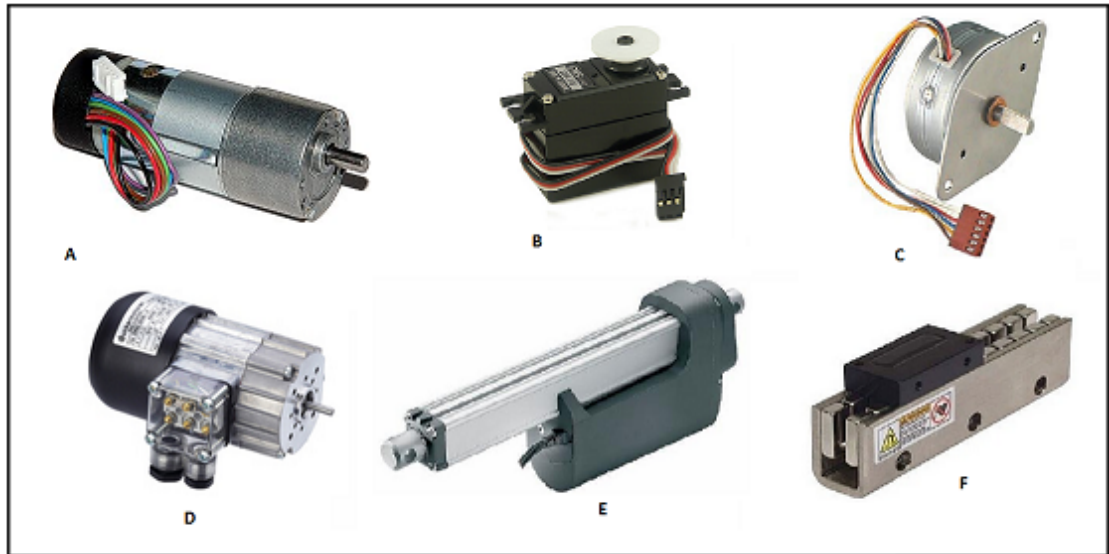
Figura 7. Actuadores Hidráulicos en un robot de limpieza del fuselaje de un Avión.



Tomado de [6].

- **Actuadores electromagnéticos:** Son los más utilizados en Robótica industrial por su sencillez, control, variedad de tamaños y precisión, dentro de esta categoría clasifican los motores eléctricos de corriente alterna (AC) síncronos y asíncronos, los motores de corriente directa (DC) controlados por inducido o por inductor, los motores paso a paso, los servomotores y motores adaptados como actuadores lineales. Los actuadores eléctricos se utilizan para robots de tamaño mediano, pues éstos no requieren de tanta velocidad ni potencia como los robots diseñados para funcionar con actuadores hidráulicos. Los robots que usan la energía eléctrica se caracterizan por una mayor exactitud y repetitividad.

Figura 8. Actuadores eléctricos utilizados en robótica: A. Motor DC de imán permanente con codificador. B servomotor Hobbico. C. Motor de pasos. D. motor AC trifásico. E. Actuador linear eléctrico. F. Actuador linear sin escobillas.

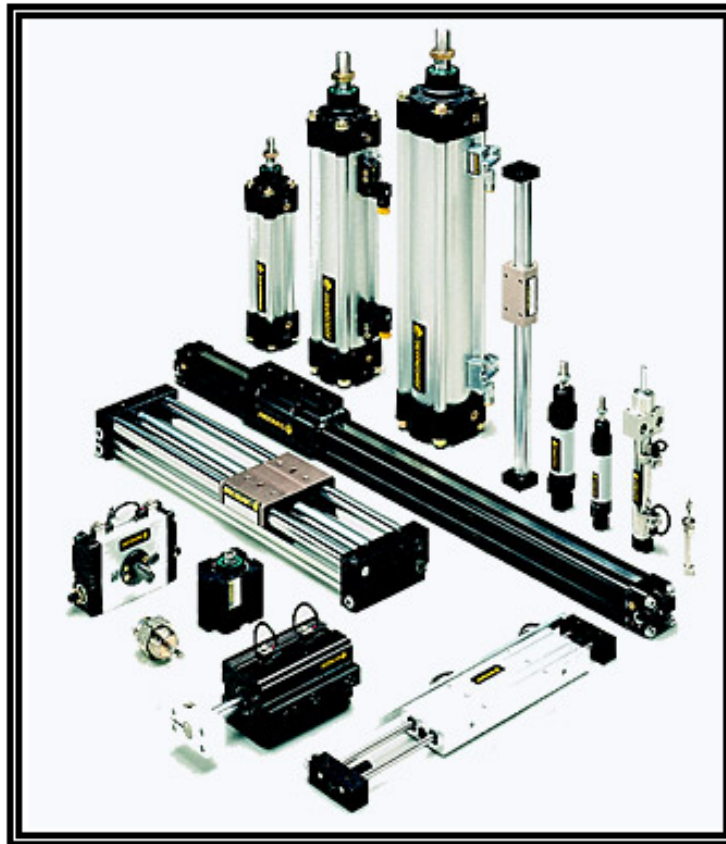


Tomado de [20]

- **Actuadores Neumáticos.** Los actuadores neumáticos son usados en robot pequeños, proporcionan movimiento rápido e incontrolado entre los topes mecánicos. Estos actuadores proporcionan un buen rendimiento en movimiento de punto a punto. Ellos son simples de controlar y son de bajo costo. Unos cuantos pequeños actuadores pueden funcionar con la fábrica típica suministro de aire, accionadas por un amplio uso de neumáticos-robots requiere la compra e instalación de una costoso fuente de aire comprimido de origen. Los actuadores neumáticos tienen baja eficiencia energética. Los actuadores eléctricos se utilizan para robots de tamaño mediano, pues éstos no requieren de tanta velocidad ni potencia como los robots diseñados para funcionar con actuadores hidráulicos. Los robots que usan la energía eléctrica se caracterizan por una mayor exactitud y repetitividad, entre los actuadores neumáticos más utilizados se encuentran los

cilindros neumáticos de doble efecto, los motores neumáticos de paletas de medio giro, en las pinzas de sujeción y manipulación de la herramienta, y además requieren de otros equipos para funcionar como el compresor, las válvulas direccionales, válvulas de alivio, mangueras, acoples, silenciadores, etc.

Figura 9. Actuadores Neumáticos de uso común en robótica.



Tomado de <http://www.ainse.net/neumatica.asp>

2.5.3 Sistema de transmisión

El propósito de un mecanismo de transmisión es transferir energía mecánica a partir de una fuente a una carga. El diseño y selección de un mecanismo de accionamiento del robot requiere la consideración de requisitos de

movimiento, carga, potencia y el montaje del actuador con respecto a la articulación. Las principales consideraciones de diseño de una transmisión son la rigidez, eficiencia y costo. La holgura de engrane (Backlash) y los picos de impacto afectan la rigidez de la de la transmisión, especialmente en aplicaciones donde el movimiento es reversible y la carga es muy variable. La transmisión de alta rigidez y el juego reducido o nulo produce un aumento de pérdidas por fricción pero proporciona un movimiento de alta precisión. La mayoría de los elementos de transmisión del robot tienen una buena eficiencia cuando están operando en o cerca de su nivel de potencia nominal, pero no necesariamente cuando está ligeramente cargado.

Tabla 3. Mecanismos de transmisión utilizados en robots: ventajas y desventajas.

Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares Altos	Holguras
	Correa Dentada	Distancia grande	-
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitado
	Cable	-	Deformabilidad
Circular-Lineal	Tornillo sin fin	Poca Holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura Media	Rozamiento
Lineal-Circular	Paralelogramo articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Tomado de [5].

Dentro de los tipos de transmisiones se destacan los reductores que tienen como función de adaptar el torque y la velocidad de salida a valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

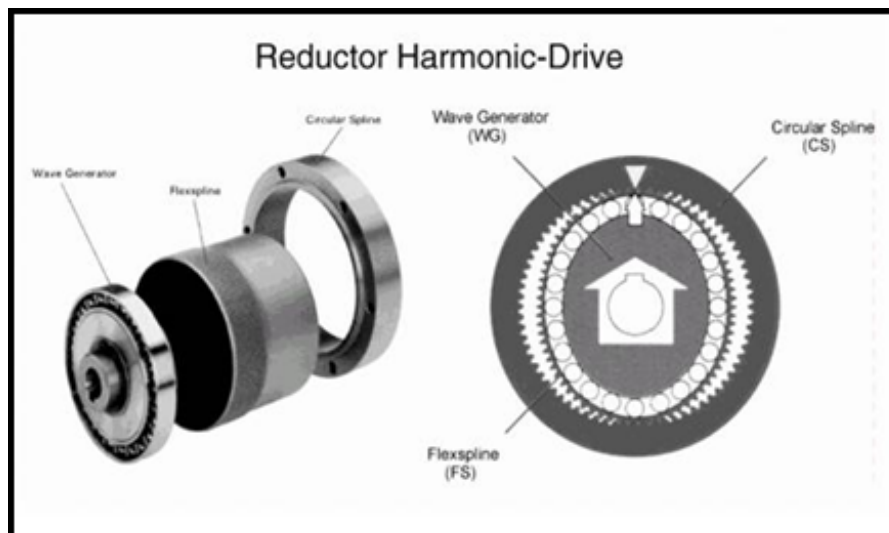
Las transmisiones de los robots deben tener las siguientes características:

- Tamaño y peso reducido.

- Alto rendimiento.
- Funcionamiento continuo a alto torque.
- Se utilizan cuando se necesita reducir el momento de inercia de los brazos, cuando se requiere un gran espacio de maniobra y es necesario que los actuadores se encuentren cerca de la base del motor.

Otro tipo de transmisión, frecuentemente utilizada en los robots es la transmisión de accionamiento directo (*Direct Drive DD.*) que consiste en instalar el eje del actuador directamente sobre la carga o el eje de la articulación, sin el uso de un reductor intermedio, este término se da exclusivamente para robots con accionamiento eléctrico; este tipo de accionamiento aparece a partir de la necesidad de utilizar robots que combinen velocidad con precisión, debido a que los reductores introducen efectos negativos como juego angular, rozamiento y disminución de la rigidez del actuador.

Figura 10. Transmisión de accionamiento directo.



Tomado de <http://www.harmonicdrive.de/> .

2.5.4 Sensores.

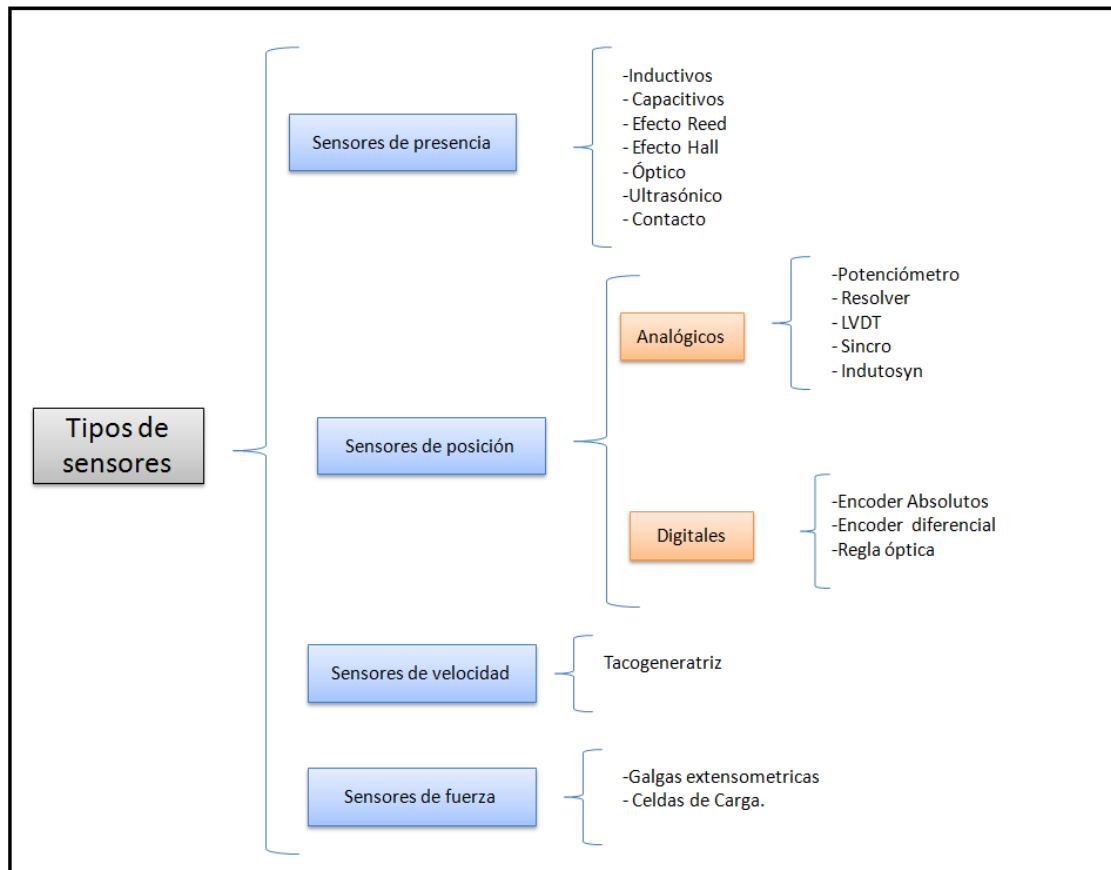
Son los elementos utilizados para la detección y recopilación de información sobre estados internos y ambientales, se encuentran instalados en las articulaciones o en los actuadores.

Entre los tipos de sensores más utilizados se encuentran los sensores de posición, velocidad, aceleración y fuerza en las articulaciones, los cuales envían las señales detectadas a un decodificador, convertidor o amplificador que las ajusta de manera que sean compatibles con los elementos de control y monitoreo.

La distinción entre analógico y digital es muy importante a la hora de tomar la decisión para determinar que sensores se usarán. Esta decisión depende en gran medida de la capacidad y características de la controladora que se usará.

Por otra parte, los sensores de estado externo o sensores auxiliares tratan con la detección de variables tales como alcance, proximidad y contacto. Los sensores externos se utilizan para guiado de robots, limitadores de movimiento de las articulaciones, así como para la identificación y manejo de objetos.

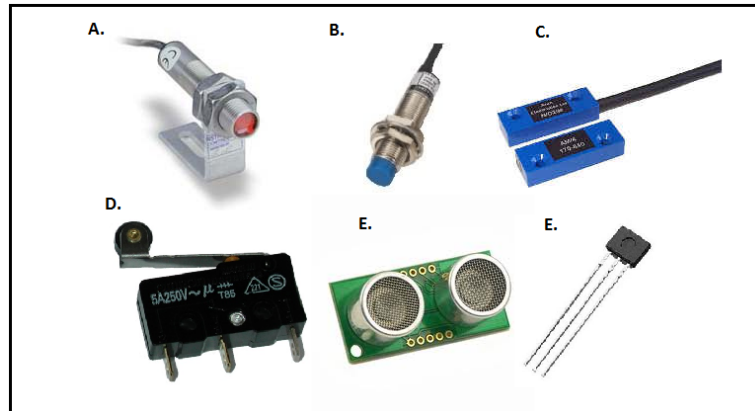
Figura 11. Clasificación general de sensores utilizados en robots Manipuladores.



Tomado de [3].

- **Sensores de presencia:** Los sensores de presencia tienen como finalidad determinar la presencia de un objeto en un intervalo de distancia especificado. Este tipo de sensores se pueden utilizar en relación con la forma de agarrar o evitar un objeto. Se suelen basar en el cambio provocado en alguna característica del sensor debido a la proximidad del objeto.

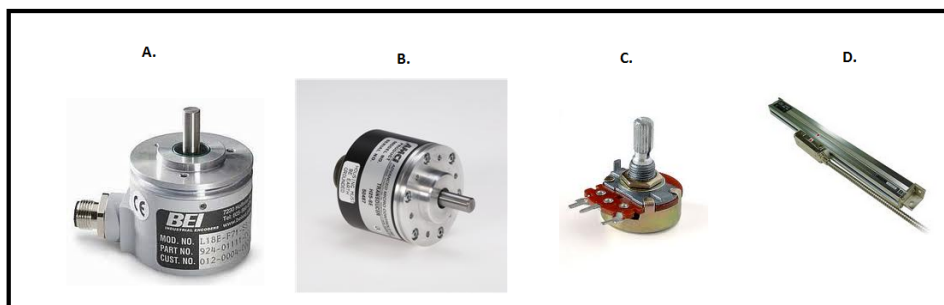
Figura 12. Sensores de presencia: A. sensor Óptico. B. sensor Inductivo. C. sensor Reed. D. Final de carrera. E. sensor ultrasónico. F. Sensor de efecto Hall.



Tomado de www.superrobotica.com/sens_pres

- **Sensores de Posición:** se utilizan para medir angulos girados y desplazamientos lineales, para controlar la posicion angular se emplean los encoders y los resolvers, los potenciómetros presentan desventajas en cuanto a resolucion y precisión de la medida.

Figura 13. Sensores de posición: A. Encoder incremental. B. Resolver. C. Potenciómetro. D. Codificador Óptico lineal.



Tomado de www.sensortec.com.eu/products/

- **Sensores de velocidad:** es un sensor adicional que se utiliza en aplicaciones donde se exige un optimo desempeño dinamico del de robot y se cuenta con

un sistema de control lo suficientemente robusto para captar la señal y generar la respuesta oportunamente, el más conocido es la tacogeneratriz.

2.6 TIPOS DE CONFIGURACIONES

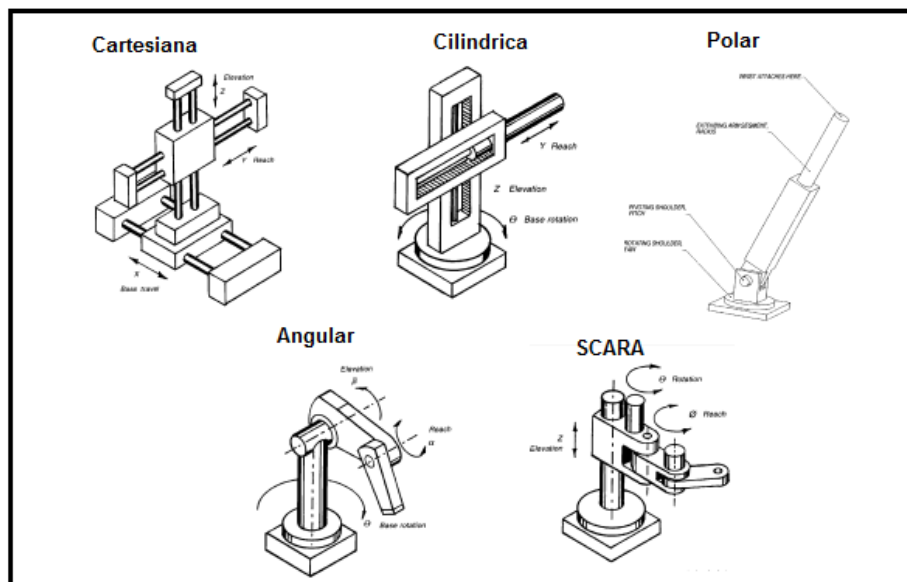
Los robots manipuladores se clasifican principalmente en:

- **Configuración Cartesiana:** Está conformado por tres articulaciones prismáticas que le dan tres grados de libertad, la ubicación se realiza mediante coordenadas cartesianas (x, y, z) y tiene un volumen de trabajo de L^3 . suponiendo que cada eslabón tenga una longitud de L . Es una de las configuraciones más usadas en la industria. [7]
- **Configuración cilíndrica:** Posee una articulación de rotación (generalmente la primera) y dos prismáticas, la ubicación se realiza normalmente en coordenadas cilíndricas y suponiendo que la articulación de rotación puede hacerlo 360° y que las prismáticas tienen una longitud L se logrará un volumen de trabajo de $3\pi L^3$. Se usa en células automatizadas de manufactura.
- **Configuración Polar o Esférica:** Se caracteriza por tener dos articulaciones de rotación y una prismática, para expresar la ubicación del tercer eslabón se utilizan las coordenadas polares; tiene un volumen de trabajo de $(28/3)\pi L^3$ considerando un ángulo de giro de 360° y un rango de desplazamiento de L .
- **Configuración Angular:** Está conformado por tres articulaciones de rotación, el volumen de trabajo es de $(32/3)\pi L^3$ siempre que el ángulo de giro sea de 360° y la longitud de los eslabones sea de L . Este tipo de manipulador requiere grados de libertad adicionales para ubicar correctamente el efector final, los cuales se dan con la adición de una muñeca. La muñeca es otra

cadena cinemática constituida por tres articulaciones de rotación que garantizan la orientación del actuador final.

- **Configuración SCARA:** Posee dos articulaciones de rotación sobre dos ejes paralelos y una de desplazamiento. Tiene un volumen de trabajo máximo de $4\pi L^3$ considerando la longitud de todos sus eslabones igual a L y que sus articulaciones de revolución giran los 360° . Su uso específico es el montaje de piezas sobre un plano.

Figura 14. Tipos de configuraciones de robots manipuladores industriales.



Tomado de [5]

2.7 ROBOT SCARA

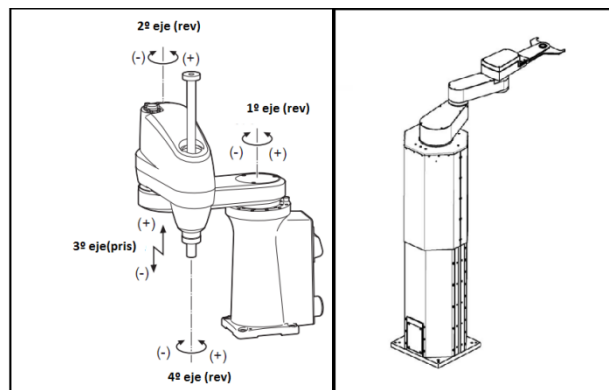
El robot SCARA fue ingeniado a finales de la década de los 70's cuando el profesor Makino, un investigador Japonés observó que el 80% de los movimientos de ensamblaje industrial eran verticales y se encuentran dentro del alcance horizontal del brazo humano. En base a esa observación planteo el diseño de un

dispositivo robótico con un número limitado de grados de libertad, económico y versátil para ser utilizado en labores de ensamble en líneas de producción automatizadas, dada la flexibilidad de este dispositivo que actualmente se utiliza en otras tareas que se desarrollan en sistemas de manufactura de productos de consumo masivo. [1]

El termino SCARA proviene del acrónimo *Selective Compliance Assemble Robot Arm* que significa "brazo de cumplimiento selectivo para robot de montaje", El término "Cumplimiento" en robótica se refiere a la elasticidad, la inversa de la rigidez, de un manipulador, mientras que "cumplimiento selectivo" se refiere a una geometría robot manipulador que proporcione movimiento con alta rigidez en un plano seleccionado.

La estructura cinemática de robots SCARA tiene cuatro ejes de movimiento y es suficiente para mover y colocar una pieza de trabajo en cualquier posición deseada dentro de su área de trabajo. Generalmente los robots SCARA utilizan dos articulaciones de revolución y una prismática con ejes paralelos verticalmente para proporcionar el cumplimiento en el plano horizontal frente a las cargas verticales, sin embargo algunos traen las 3 articulaciones de revolución.

Figura 15. Robot SCARA 4 DOF: a). para montaje en el plano. b).para Manipulación horizontal.

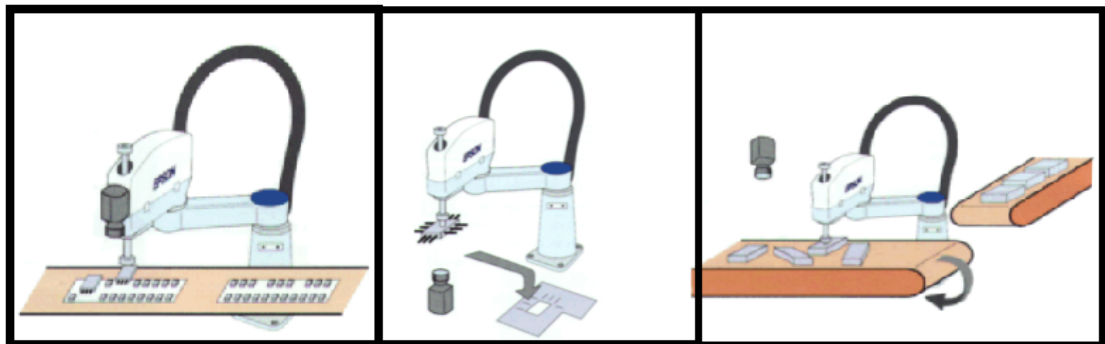


Tomado de [21] y [1].

Los robots de configuración SCARA son ideales para procesos en los que se manejan pequeños productos y al mismo tiempo se demanda velocidad, rendimiento y precisión en los movimientos, debido a su configuración sencilla y tamaño reducido, los costos de mantenimiento son mínimos en comparación a otros tipos de manipuladores, entre las principales uso del robot SCARA se encuentran:

- Paletización (Pick and Place) y posicionamiento de piezas sobre los sistemas de transporte.
- Ensamblaje de componentes electrónicos
- Realización pruebas de calidad de componentes electrónicos.
- Trabajo en salas blancas (fabricación y manipulación de medicamentos).
- Pulido, eliminación de rebabas y acabados de superficies planas de objetos pequeños.
- Aplicación de adhesivos.
- Montajes de elementos de unión (tornillos y remaches).
- Dosificación y envase de productos farmacéuticos.
- Células de trabajo en **Sistemas de Manufactura Flexible (FMS)** y **Sistemas de Ensamblaje Flexible (FAS)**.

Figura 16. Principales Aplicaciones del Robot SCARA.

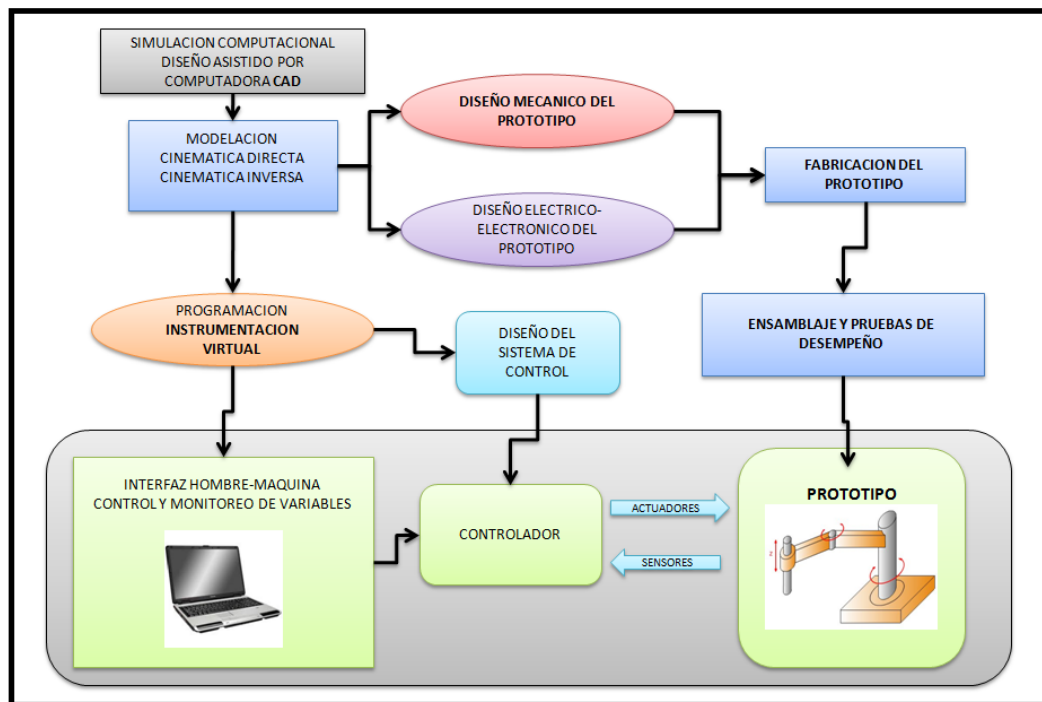


Tomado de [21].

3. DISEÑO MECATRONICO DEL ROBOT SCARA 3 DOF

Este capítulo presenta el desarrollo del proceso de diseño partiendo del planteamiento de una metodología que permita abordar el problema desde el punto de vista de la ingeniería concurrente, en la cual se tienen en cuenta especialidades de la ingeniería que intervienen en el campo de la robótica, enfocándose principalmente en el área de la ingeniería mecánica. El diseño de un robot SCARA abarca la interacción sinérgica de conocimientos en el área de la informática, la electrónica y la mecánica principalmente, por lo tanto un mecanismo de estas características debe estar sujeto a cambios permanentes en el diseño. Hoy en día existen métodos que se Implementan para optimizar la ejecución del diseño y construcción de cualquier equipo.

Figura 17. Tópicos que contempla el Diseño Mecatrónico del Robot SCARA.



Fuente el Autor.

Para el desarrollo de la etapa de diseño Mecatrónico del presente proyecto, se adoptó la metodología planteada en el artículo *“ROBOTICA APROXIMACION AL DISEÑO MECATRONICO”* [22], pag 25, en el cual se presenta una metodología de diseño mecatrónico para robots industriales en donde se pueden distinguir tres tareas fundamentales: Modelamiento, Simulación e Integración. Estas tareas interactúan durante todo el procesos de diseño mecatrónico, se ayudan mutuamente y se intercambian datos para hacer ajustes y mejoras. El desarrollo de esta metodología se considera como la aplicación de la Ingeniería Concurrente CE, la Ingeniería Inversa IA y la Ingeniería Asistida por Computador CAE.

La primera etapa de diseño comienza con el reconocimiento de una necesidad. Los robots industriales tienen su ambiente natural en los Sistemas de Manufactura Flexibles FMS y en los Sistemas de Ensamblaje Flexibles FAS, en donde se desempeñan fundamentalmente para el posicionamiento de partes a ser mecanizadas en su respectiva máquina-herramienta CNC y para el posicionamiento sobre los sistemas de transporte. También se emplean los robots en el posicionamiento de partes a ser ensambladas. Estas son las áreas de mayor aplicación de robots en ambientes de manufactura.

En menor medida los robots se emplean para efectuar funciones de manufactura como soldadura, pintura, etc. Entonces, en este paso inicial hay que definir el ambiente de manufactura del robot, considerar su estructura adecuada y calcular su volumen o espacio de trabajo. Para el desarrollo de esta tesis se planteó el diseño y la construcción de un prototipo experimental para ser utilizado para fines académicos y de investigación y sus dimensiones se asignaron de acuerdo al volumen ocupado por el equipo.

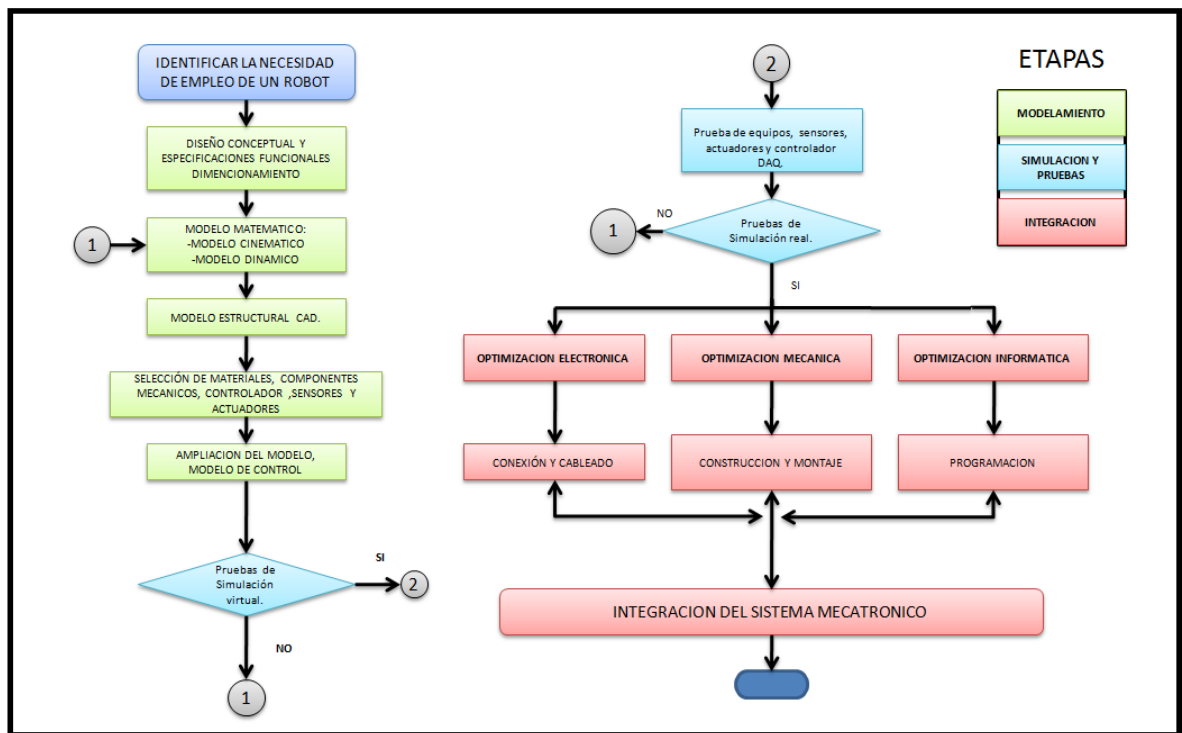
Diseño conceptual y especificaciones funcionales. Definido el ambiente de manufactura del robot y su tarea, se especifican sus condiciones de funcionamiento, se asignan dimensiones, distancias entre puntos de

posicionamiento, velocidad y aceleración en los movimientos, cargas a transferir, aproximación a la estructura definitiva, análisis de materiales para los elementos, análisis de la sección de los elementos, análisis de esfuerzos, ubicación de los actuadores y transmisiones, diseños de guías para articulaciones prismáticas, establecer rango de las variables en las articulaciones, planear tamaño del robot, y cálculo del espacio de trabajo. Con todos estos factores se llega a un bosquejo esquemático del robot requerido.

La tarea de Modelamiento toma como base el modelo matemático de la dinámica del robot, es decir, el conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que se presentan el comportamiento de la dinámica del robot. Estas . En algunos casos se emplea la ecuación de estado, sin embargo para el desarrollo de esta tesis se consideran los parámetros Denavit-Hartenberg, los modelos de cinemática directa e inversa, la visualización y determinación geométrica del volumen de trabajo, modelado computacional de los esfuerzos en piezas críticas y la estructura en general.

La tarea de simulación virtual analiza el comportamiento de las diferentes estrategias de control para seleccionar aquella de mejor comportamiento y también proporciona resultados relacionados con el movimiento del efector final dentro del espacio de trabajo localizando en lo posible los puntos singulares y las trayectorias del mismo. Finalmente, la tarea de integración del diseño significa el acoplamiento de los sistemas mecánicos, electrónicos y computarizados para configurar el diseño mecatrónico. El diagrama de flujo de la Figura 19 muestra la metodología propuesta para el desarrollo de las 3 etapas con sus respectivas tareas.

Figura 18. Metodología de aproximación al diseño de robots como sistemas mecatrónicos.



Fuente [22].

3.1 DIMENSIONAMIENTO DEL ROBOT SCARA

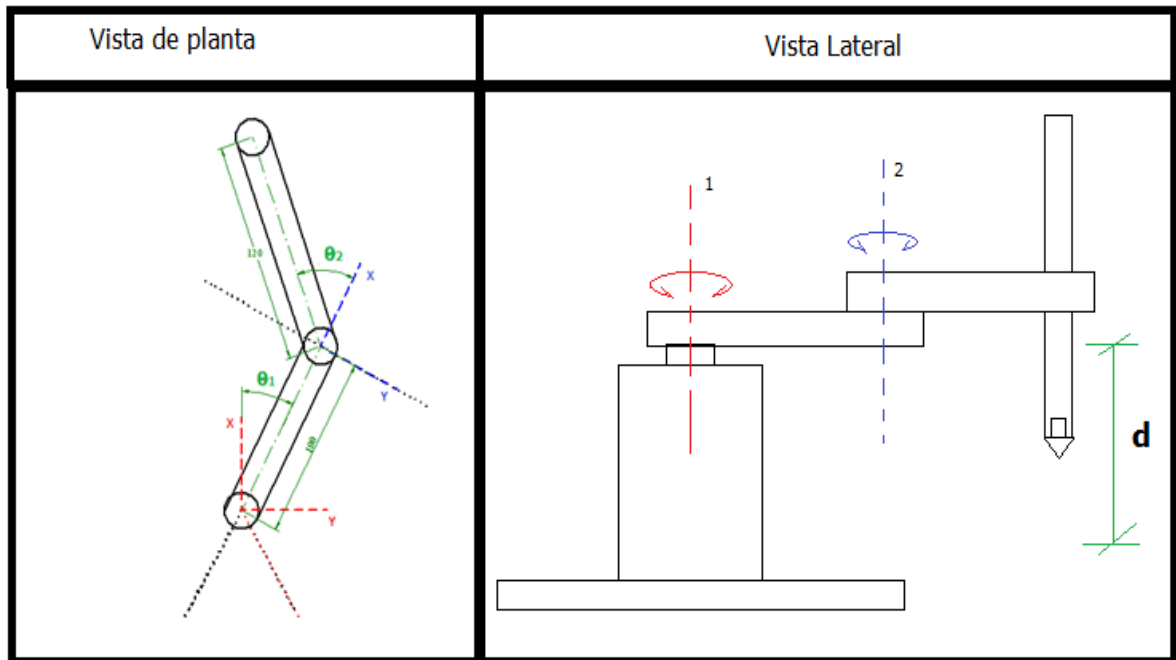
El robot SCARA es un mecanismo considerado como cadena cinemática abierta, de 3 grados de libertad que con esta de 2 eslabones unidos mediante 2 articulaciones tipo revolución de ejes verticales y una junta prismática que realiza el movimiento vertical del efector final, para este trabajo se asignaron las siguientes dimensiones de acuerdo con los objetivos planteados, y se establecieron los siguientes rangos de velocidades de los actuadores para lograr un mejor control del movimiento.

Tabla 4. Dimensiones y parámetros del Robot SCARA 3 DOF.

Parámetros y Dimensiones del Robot SCARA 3 DOF					
Articulación	Tipo de Articulación	Variab le	Rango de Giro/ desplazamiento	Longitud de los eslabone s	Rango de velocidad es
1	Revolución	Θ_1	Entre -120° y $+120^\circ$	100mm	5 ~25 rpm
2	Revolución	Θ_2	Entre -90° y $+90^\circ$	120 mm	5 ~25 rpm
3	Prismática	d_3	Entre 70 mm y 100 mm	76 mm	5-10 cm/s

Fuente: El Autor.

Figura 19. Parámetros y dimensiones del robot SCARA.

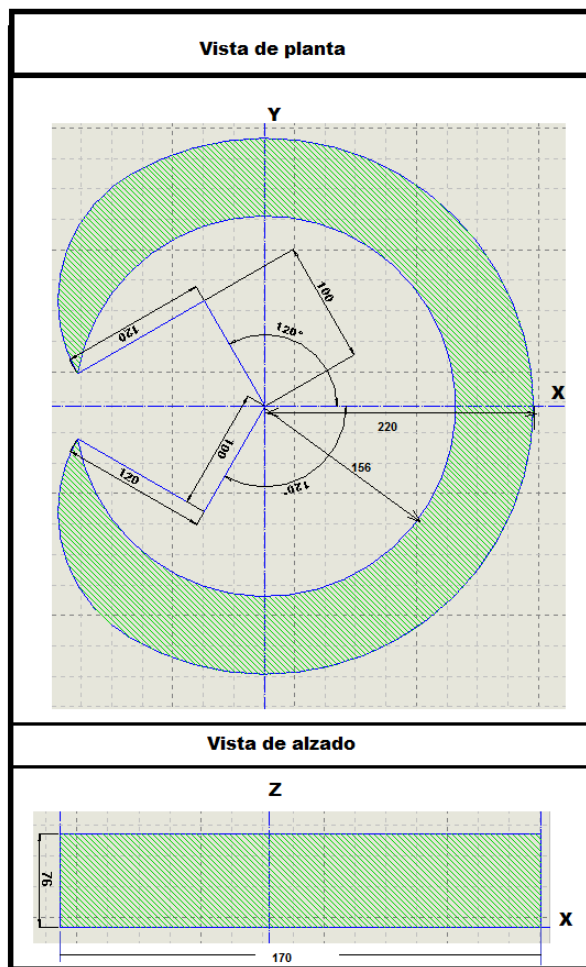


Dada la semejanza anatómica del manipulador SCARA con el brazo humano se utilizan términos como: hombro, codo, brazo y antebrazo para señalar las articulaciones y los eslabones, respectivamente; También se establecieron

3.2 DETERMINACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO

El espacio de trabajo del robot SCARA depende principalmente de las dimensiones asignadas, es decir de la longitud del brazo y el antebrazo, los ángulos de rotación del codo, el hombro y del desplazamiento del efector final, se determinó geoméricamente haciendo el trazado en la vista de planta, descrito por la articulación 3, cuando se giran el antebrazo y el brazo alineados en torno a la articulación 1, entre las posiciones extremas.

Figura 20. Espacio de trabajo Máximo del ROBOT SCARA 3 DOF, unidades en mm.



Fuente: el Autor

3.3 MODELO CINEMÁTICO

Para caracterizar el movimiento de un robot manipulador existen 2 modelos que relacionan las variables de las articulaciones con las coordenadas de posición del efector final, en este modelo no se consideran las fuerzas que actúan en las articulaciones.

3.3.1 Modelo cinemático directo

El modelo cinemático directo permite determinar las coordenadas espaciales de posición en función de las variables articulares del robot manipulador, para llevar a cabo éste análisis se considera el manipulador SCARA 3 DOF como un conjunto de 3 articulaciones y 3 eslabones, donde a cada par articulación-eslabón se la asigna un grado de libertad y en cada articulación se establece un sistema de referencia; que junto con las matrices de transformación homogénea, representan de una manera sencilla, las rotaciones y translaciones entre eslabones para ubicar el elemento con la posición y orientación deseada.

Las matrices de transformación homogénea contienen las coordenadas de rotación y translación de 2 sistemas asociados a 2 eslabones consecutivos, este análisis empieza en la base del manipulador y termina en el efector final. Para describir la estructura mecánica del robot SCARA en términos geométricos y realizar el análisis matemático de manera sistematizada se hace uso de la notación Denavit-Hartenberg,

Articulación i : Es el numero de Articulación partiendo desde la base hasta el efector final.

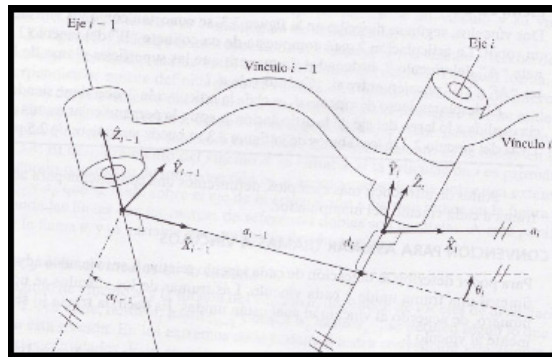
α_{i-1} : Es el angulo formado por el eje de la articulación i y el eje de la articulación anterior

a_{i-1} : es la longitud del eslabón o vínculo que une la articulación i con la articulación anterior.

Θ_i : Corresponde al Angulo de giro de la articulación de revolución i (**Variable articular**)

d_i : indica el desplazamiento en una articulación prismática.

Figura 21. Parámetros D-H de un manipulador robótico.



Tomado de [2]

Tabla 5. Representación Denavit-Hartenberg del Robot SCARA 3 DOF.

Articulación	α_{i-1}	a_{i-1}	Θ_i	d_i	Tipo de Articulación.
1	0	0	Θ_1	0	R
2	0	a_1	Θ_2	0	R
3	0	a_2	0	d_3	P

Reemplazando los datos de la tabla anterior se obtienen las matrices de transformación homogénea que describen la posición y orientación de cada articulación y eslabón respectivamente:

- 1- Matriz de transformación Homogénea de la articulación del hombro respecto a la base.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Matriz de transformación Homogénea de la articulación del codo con respecto al Hombro.

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Matriz de transformación Homogénea de la articulación del efector final con respecto al codo.

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. Las matrices de transformación Homogénea que relaciona el efector final con respecto a la base se obtiene multiplicando:

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & a_3 C_{12} + a_2 C_1 \\ S_{12} & C_{12} & 0 & a_3 S_{12} + a_2 S_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$S_1 = \sin \theta_1; C_1 = \cos \theta_1; S_{12} = \sin (\theta_1 + \theta_2); C_{12} = \cos (\theta_1 + \theta_2)$$

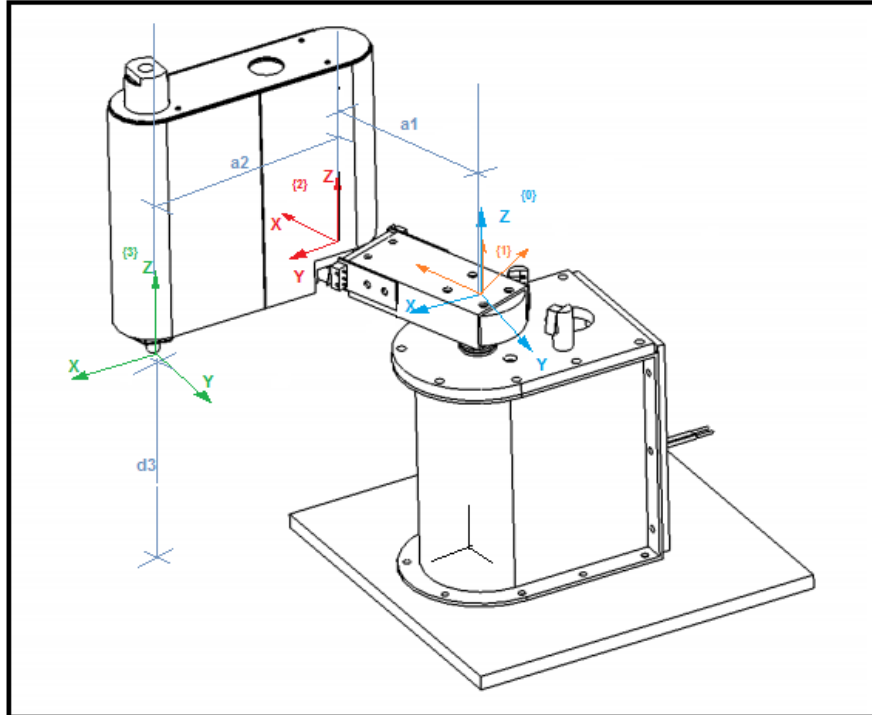
Donde las coordenadas de posición del efector final con respecto a la base son:

$$X = a_1 * C_{12} + a_2 * C_1$$

$$Y = a_1 * S_{12} + a_2 * S_1$$

$$Z = -d_3$$

Figura 22. Parámetros de la cinemática Directa del Robot Scara 3 DOF.

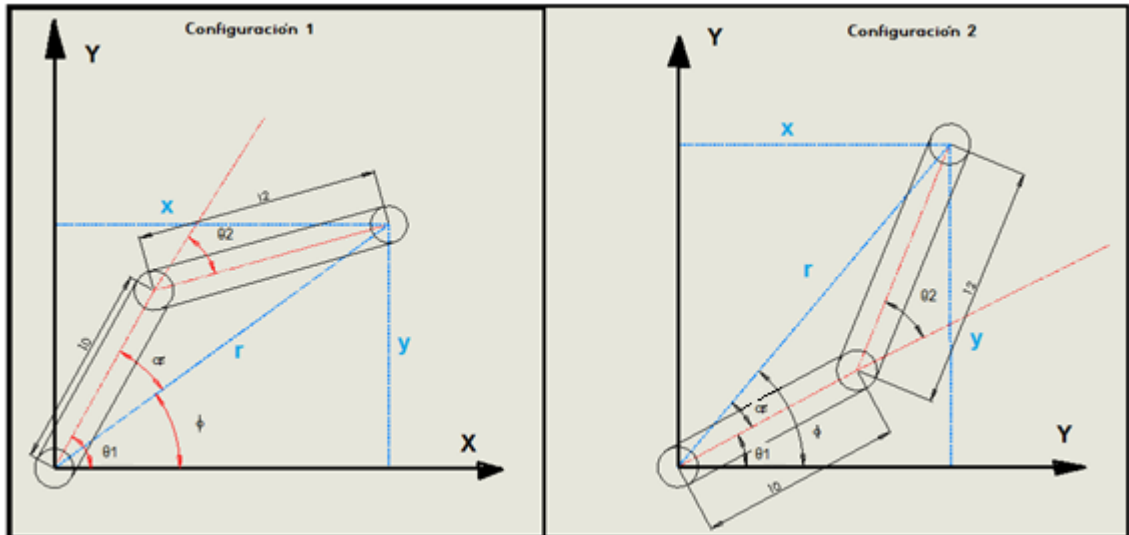


Fuente: el Autor

3.3.2 Modelo cinemático inverso

El modelo cinemático inverso se encarga de calcular las variables articulares cuando las coordenadas de posición son conocidas, para el caso del robot SCARA 3 DOF se consideró el análisis del movimiento en el plano y este problema se desarrolló utilizando el método geométrico, debido a la configuración mecánica el robot SCARA presenta 2 soluciones:

Figura 23. Configuraciones para determinar las soluciones del modelo cinemático inverso del robot SCARA 3 DOF



Donde conocidas las coordenadas cartesianas de posición x y y del efector final en el plano que deben estar dentro del espacio de trabajo del robot y las longitudes de los eslabones a_1 y a_2 , se determinan los ángulos de giro de las articulaciones, θ_1 y θ_2 , mediante la aplicación del teorema de coseno a cada uno de los triángulos formados por los eslabones del mecanismo:

$$a_1 = 100 \text{ cm}$$

$$a_2 = 12 \text{ cm}$$

Se plantean las siguientes ecuaciones:

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$x^2 + y^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2 * a_1 * a_2 * \cos(180 - \theta_2)$$

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{x}{r}\right)$$

$$a_2^2 = a_1^2 + r^2 - 2 * a_1 * r * \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{a_1^2 + r^2 - a_2^2}{2 * a_1 * r}\right)$$

Dependiendo de la ubicación de las coordenadas de posición y de configuración analizada, los valores de α y φ pueden ser negativos, afectando de esta manera el cálculo del ángulo θ_1 .

Se hallan:

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - r^2}{2 * a_1 * a_2} \right)$$

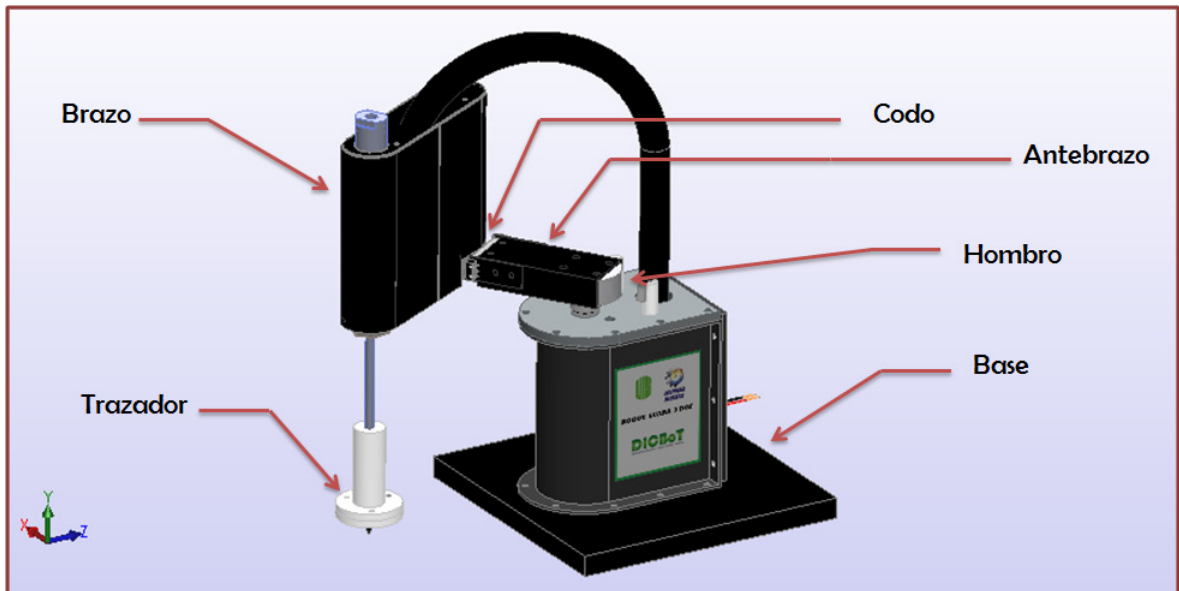
$$\theta_1 = \varphi + \alpha$$

3.4 DISEÑO MECÁNICO

El Diseño mecánico corresponde a la selección de la forma de los elementos que componen la estructura mecánica, materiales, el cálculo de las propiedades dinámicas (masas, Centros de masas, inercias, etc.) estimación de cargas y evaluación de esfuerzos en elementos críticos y la selección de los actuadores. La estructura mecánica del robot SCARA 3 DOF está conformada básicamente por los siguientes elementos:

- Base.
- Hombro (1° Articulación).
- Antebrazo.
- Codo (2° Articulación).
- Brazo.
- Efecto Final o trazador.

Figura 24. Componentes principales de la Estructura Mecánica del Robot SCARA 3 DOF.



Fuente: El Autor.

El diseño de la estructura mecánica del Robot SCARA 3 DOF está basada en estimación de las cargas y esfuerzos bajo condiciones estáticas, es decir aquellas que corresponden al peso de los componentes móviles, debido a que los movimientos de rotación de las articulaciones son relativamente lentos, por el orden de las 15 rpm y al mismo tiempo son los esfuerzos más críticos y están localizados en los elementos más susceptibles a la falla. Las propiedades Físicas de los elementos tales como: masa, centros de gravedad e inercias de los conjuntos brazo antebrazo y base fueron determinados mediante el uso de la herramienta computacional de cálculo de propiedades físicas de SolidWorks el cual se basa principalmente en las dimensiones y materiales de los componentes analizados.

En algunos componentes considerados como elementos críticos se realizó un análisis básico de elementos finitos FEM, para evaluar su comportamiento ante la aplicación de las cargas calculadas y hacer la validación del diseño. El análisis de

elementos finitos FEM realizado es de Denominados también estudios de tensión. Los estudios estáticos calculan desplazamientos, fuerzas de reacción, deformaciones unitarias, tensiones y la distribución del factor de seguridad. El material falla en ubicaciones donde las tensiones exceden cierto nivel. Los cálculos del factor de seguridad se basan en uno de cuatro criterios de fallos, entre ellos, von Mises.

También se hace una descripción de los procesos de manufactura y montaje de los diferentes elementos que conforman el Robot SCARA 3 DOF según las recomendaciones de los catálogos de selección de actuadores y las normas de diseño de uniones atornilladas.

Tabla 6. Cálculo de las cargas que actúan en los elementos mecánicos.

Análisis de cargas estáticas		
➤ DCL		
➤ Fórmulas		
$W_1 = m_1 * g$ $W_2 = m_2 * g$	$+ \uparrow F_R = \Sigma F_y$ $F_{34} = W_2 = m_2 * g$ $F_{12} = W_1 + F_{34}$	$\left(\begin{array}{l} + \Sigma M_i = 0: \\ M_2 = W_2 * Cm_2 \\ M_1 = M_2 + W_1 * Cm_1 \end{array} \right.$

Datos de entrada			
Variable	Símbolo	Magnitud	Unidades
Masa del antebrazo	m1	512	gr
Masa del Brazo	m2	1135	gr
Distancia del centro de masa del Antebrazo	Cm1	47.9	mm
Distancia del centro de masa del brazo	Cm2	43.9	mm
Longitud del Antebrazo	L1	108	mm
Torque máximo aplicado por el motor 1 (según catálogo)	T1	3.35 (36)	N.m (kgf*cm)
Torque máximo aplicado por el motor 2 (según catalogo)	T2	1.18 (12)	N.m (kgf*cm)
Resultados			
Peso del Brazo	W1	5,02	N
Peso del antebrazo	W2	11,13	N
Fuerza Axial en el Codo	F34	11,13	N
Fuerza Axial en el hombro	F12	16.15	N
Momento flector en el codo	M2	0.492	N.m
Momento flector en el hombro	M1	0.726	N.m

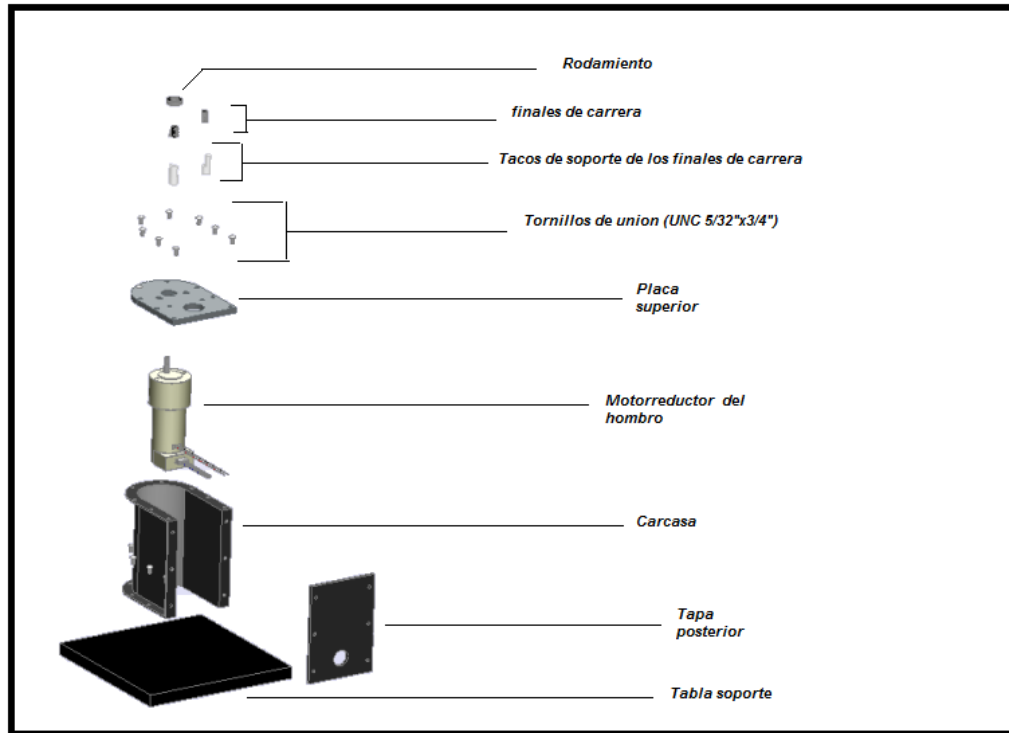
Fuente: El Autor.

3.4.1 Diseño de la base

La base del Robot SCARA 3 DOF es un elemento que se caracteriza por ser robusto y pesado, que sirve de soporte de todos los elementos de la estructura, además de servir de alojamiento del motor y los cables, está compuesta por una tabla de madera compuesta(MDF) de 20x20 cm en la parte inferior, una carcasa en forma de U, fabricada en acero Cold Rolled calibre 16 y una placa de acero inoxidable AISI 304, en la parte superior con 8 agujeros de 5/32" para el montaje de los tornillos que forman la unión con la carcasa, 2 agujeros avellanados de

3/16" para la instalación del servomotor reductor, uno para el asiento del rodamiento y otro de 3/4" para colocar el cableado proveniente del brazo.

Figura 25. Componentes de la Base del Robot SCARA 3 DOF.



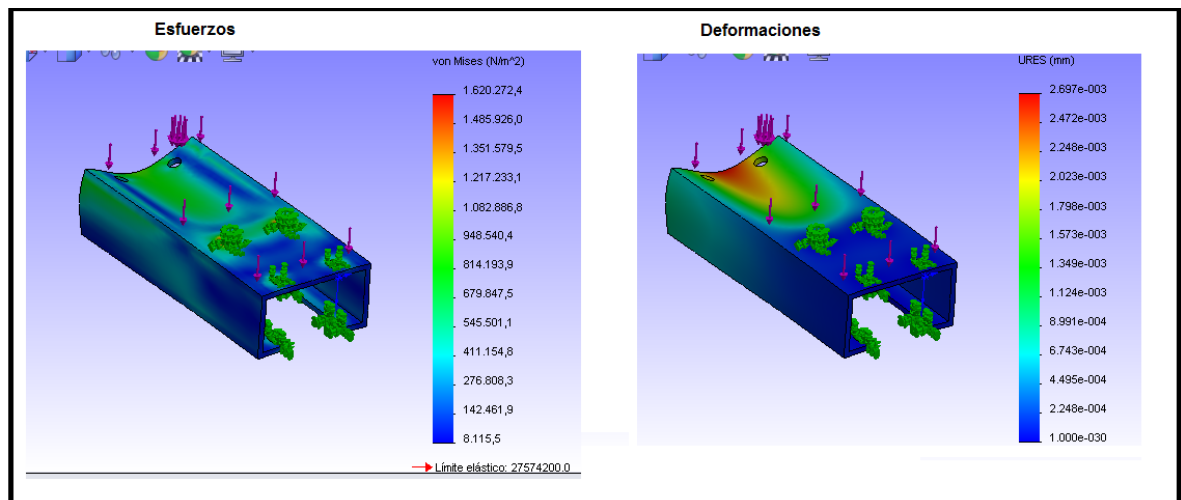
Fuente: El Autor.

3.4.2 Diseño del brazo y del Antebrazo

Según el *Springer Handbook of Robotics* [6], los elementos que conforman los vínculos o eslabones de un manipulador robótico se caracterizan por ser livianos y resistentes debido a que durante su operación van a estar sometidos a esfuerzos de flexión, torsión y esfuerzos aplicados en las uniones en las uniones que son generados por el peso de la carga de trabajo y de otros elementos estructurales así como también aquellos que son generados por cargas inerciales, es por esto que para el diseño del brazo y el antebrazo se escogió un perfil tubular de aluminio anodizado, de sección rectangular de 2 1/2" x 3/4" , el cual está unido a las

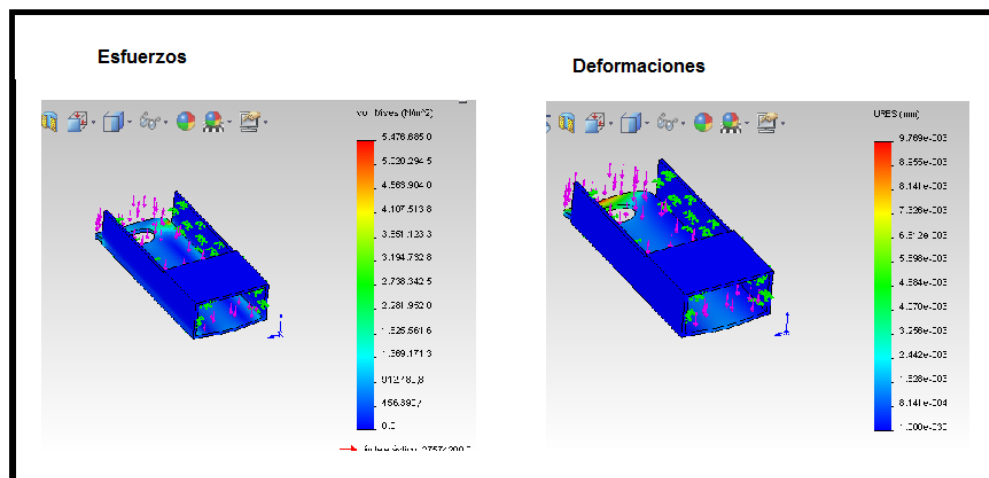
articulaciones mediante tornillos 5/32" UNC; El brazo y el antebrazo por ser elementos críticos, fue necesario realizar las respectivas simulaciones mediante el análisis computacional de elementos finitos para verificar y visualizar la distribución de esfuerzos y deformaciones en cada una de las piezas y de esta manera hacer la validación de cálculos.

Figura 26. Simulación de esfuerzos y Deformaciones en el antebrazo.



Fuente: El Autor.

Figura 27. Simulación de esfuerzos y Deformaciones en el brazo.



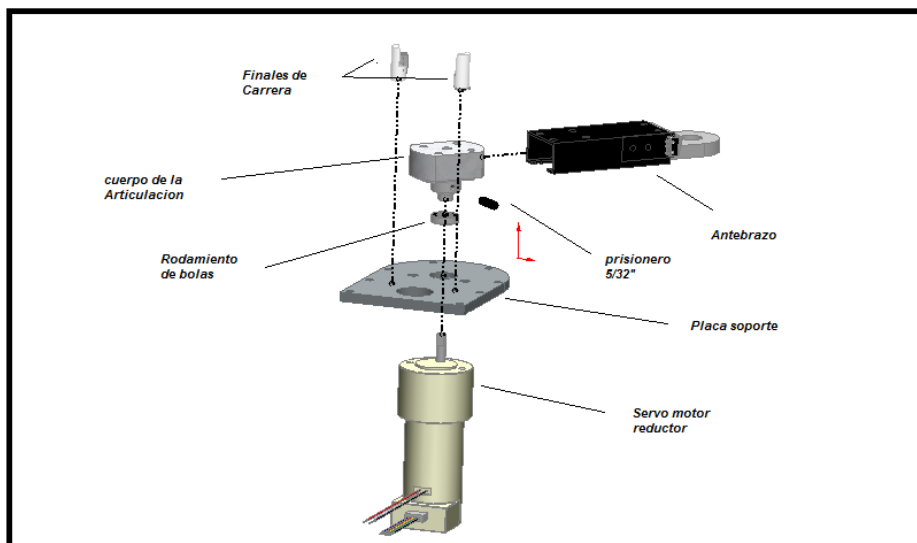
Fuente: El Autor.

3.4.3 Diseño de las Articulaciones

Para el presente proyecto se diseñaron y fabricaron las articulaciones del hombro y el codo del Robot SCARA 3 DOF, las cuales fueron fabricadas en acero inoxidable AISI 403 mediante procesos de manufactura convencionales (torneado, fresado, taladrado, roscado y pulido). Se seleccionó este tipo de material considerando sus características de Alta rigidez, resistencia a la corrosión, maquinabilidad relativamente alta (en comparación con la de otros aceros inoxidables) y apariencia superficial.

- La articulación del hombro se diseñó como una sola pieza maciza que se adapta a la sección interna del tubo que forma el antebrazo, y se refuerza con tornillos $5/32'' \times 3/4''$ UNF y en el otro se le practica un taladrado axial de forma que sirva de acople con el eje del motor y en la parte externa se coloca el rodamiento. Para limitar el ángulo de giro de esta articulación se instalaron 2 finales de carrera en la placa de soporte.

Figura 28. Montaje de los elementos de la articulación del Hombro del Robot SCARA 3 DOF.



Fuente: El Autor.

Figura 29. Cuerpo de la articulación del Hombro del Robot SCARA 3 DOF.



Fuente: El Autor.

Figura 30. Detalles de mecanizado de la placa superior del Robot SCARA 3 DOF.



Fuente: El Autor.

- La articulación del codo está formada por 2 piezas unidas mediante un buje de bronce latón, ajustado a presión en una de estas, y en la otra pieza se encuentra la cavidad para insertar el rodamiento que permite el giro de las 2 piezas; De igual forma que la anterior también se refuerza con tornillos 5/32" x3/4" UNF y en el otro se le practica Para limitar el ángulo de giro de esta articulación se instalaron 2 finales de carrera en el antebrazo como se puede apreciar en la siguiente figura:

**Figura 31. Piezas que componen la articulación del Codo del Robot SCARA
3 DOF.**



Fuente: El Autor.

✓ Selección de los rodamientos

Los rodamientos utilizados cumplen la función de dar apoyo a los ejes verticales de las articulaciones de tal forma que estas giren libremente y se eliminen holguras o juegos, ya que estos elementos son críticos en el sentido de que debe estar alineados siempre, pues va acoplado a los ejes de los motorreductores .

El rodamiento del lado fijo es capaz de soportar cargas radiales y axiales. Por lo tanto, debe seleccionarse un rodamiento capaz de contener el movimiento axial en ambas direcciones.

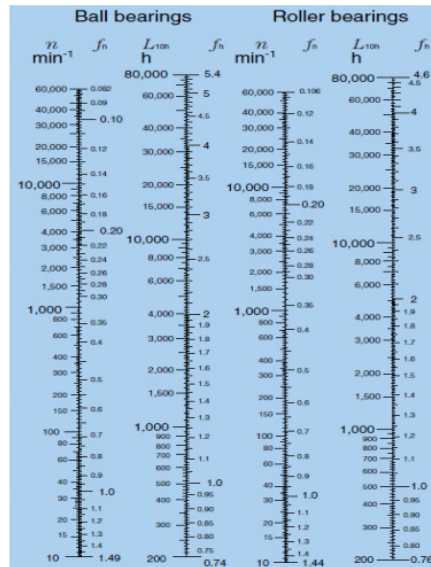
Primero se determina la carga que soportan los rodamientos. El eje recibe una carga vertical axial equivalente al peso del brazo, los componentes internos de la carcasa (refuerzos, motor reductor, cilindro neumático, etc) y la carga radial se desprecia.

$$P1 = 15.61 N = 0.01561 N$$

Se selecciona un rodamiento de bolas por ser de uso general, se consigue fácilmente en el comercio y por que resiste cargas axiales y radiales.

Se determinan los factores de vida y de velocidad mediante la escala proporcionada por el catálogo de NTN que se muestra en la siguiente figura.

Figura 32. Nomograma de Cálculo de los factores de Carga dinámica de un rodamiento.



Fuente: Catálogo de selección de rodamientos NTN.

Para 15 RPM (se asume la velocidad más baja dada su aplicación) se tiene un factor $f_n=1.49$. Para 80000 horas de trabajo se obtiene un $f_h=5.4$. La carga dinámica se calcula mediante la ecuación 6.2.

$$C = P_1 * \frac{5.4}{1.49} = 0.01561 \text{ kN} * \frac{5.4}{1.49} = 0.0566 \text{ kN}$$

Figura 33. Tabla de Selección de los rodamientos de bolas

d 10 ~ 20mm

d	Boundary dimensions				Basic load ratings				Factor f_0	Limiting speeds				Bearing numbers				
	mm				dynamic		static			min ⁻¹				open type	shielded type	non- contact sealed type	low torque sealed type	contact sealed type
	D	B	$r_{s, min}^{(1)}$	r_{NS} min	C_r	C_{or}	C_r	C_{or}		grease open type ZZ LLB	oil open type Z LB	LLH	LLU					
	15	3	0.1	—	0.855	0.435	87	44	15.7	10 000	12 000	—	—	6700	—	—	—	—
	19	5	0.3	—	1.83	0.925	187	94	14.8	32 000	38 000	—	24 000	6800	ZZ	LLB	—	LLU
10	22	6	0.3	0.3	2.7	1.27	275	129	14.0	30 000	36 000	—	21 000	6900	ZZ	LLB	—	LLU
	26	8	0.3	—	4.55	1.96	465	200	12.4	29 000	34 000	25 000	21 000	6000	ZZ	LLB	LLH	LLU
	30	9	0.6	0.5	5.10	2.39	520	244	13.2	25 000	30 000	21 000	18 000	6200	ZZ	LLB	LLH	LLU
	35	11	0.6	0.5	8.20	3.50	835	355	11.4	23 000	27 000	20 000	16 000	6300	ZZ	LLB	LLH	LLU

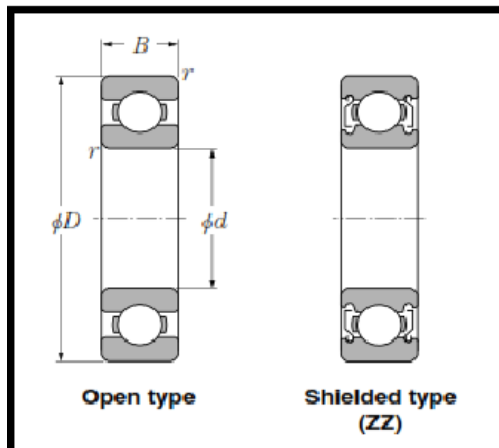
Fuente: Catalogo de selección de rodamientos NTN.

Verificación de las cargas estática y dinámica de operación:

$$C_{admissible} = 1.83 > 0.0566 \text{ kN}$$

$$P1_{admissible} = 0.925 > 0.01561 \text{ kN}$$

Figura 34. Dimensiones estándar de un rodamiento de bolas.



Fuente: Catalogo de selección de rodamientos NTN.

De acuerdo con las figuras 37 y 38, las medidas de los rodamientos seleccionados para las articulaciones son:

$d=10\text{mm}$; $D=19\text{mm}$; $B=5\text{ mm}$; $r=0.3\text{ mm}$

De las dimensiones internas y externas depende el dimensionamiento detallado, con tolerancias de mecanizado del eje y de la cavidad de alojamiento de cada rodamiento para lograr un montaje adecuado y prevenir fallas prematuras del mismo.

En los rodamientos, los anillos interior y exterior están fijos a los ejes o al alojamiento, por lo que no hay un movimiento relativo entre las superficies de asentamiento, al operar o ser sometidas a cargas. Este movimiento relativo entre las superficies de asentamiento del rodamiento y el eje, o del rodamiento y el alojamiento, puede ocurrir en la dirección radial, en la dirección axial o en la dirección de rotación. Los tipos de ajuste incluyen ajuste en aprieto, en transición y en holgura, los cuales pueden ser seleccionados dependiendo de si hay o no interferencia.

✓ **Diseño del resorte de torsión**

Debido a que el efecto de *Backlash*, es decir la holgura existente entre los dientes de los engranajes que componen la transmisión de los motores, la precisión del movimiento de giro de las articulaciones disminuye generando oscilaciones y errores en la medición de los ángulos, razón por la cual se hizo conveniente la instalación de un resorte de torsión pre tensionado en la articulación del hombro, con la finalidad de mantener los dientes de los engranajes siempre en contacto y disminuir el *backlash*.

Se hizo diseño geométrico y comprobación del resorte se teniendo presente condiciones iniciales como: espacio de instalación, constante elástica (material), el diámetro del hilo (calibre del alambre), las cuales se definieron de acuerdo a los materiales existentes en el mercado; de igual forma definimos la máxima deformación del resorte. Se hizo el cálculo de momentos flectores, esfuerzos y

deformaciones utilizando la herramienta de diseño mecánico *Designer Tool*, que acompaña al texto de diseño de elementos de maquinas de Mott. A continuación se presentan los cálculos realizados para el diseño del resorte y comprobación.

Tabla 7. Cálculos del Diseño del resorte de torsión de la articulación del Hombro.

Comprobación del resorte de torsión				
<p>ESQUEMA DE MONTAJE</p>			<p>Fórmulas</p> $k_{\theta} = \frac{M}{\theta} = \frac{ED_w^4}{10.2D_m N_a}$ $D_m = D_m t N_a / (N_a + \theta)$ $\theta = \frac{ML_w}{EI} = \frac{M(\pi D_m N_a)}{E(\pi D_w^4/64)} \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} = \frac{10.2MD_m N_a}{ED_w^4}$ $\sigma = \frac{McK_b}{I} = \frac{MK_b}{S} = \frac{MK_b}{\pi D_w^3/32} = \frac{32MK_b}{\pi D_w^3}$	
Datos de entrada				
Variable	símbolo	magnitud	Unidades	Observaciones
Diámetro del resorte	D	28	mm	Espacio físico de trabajo
Longitud del resorte	L	12	mm	Espacio físico de trabajo
Longitud de soporte 1	R1	32	mm	Espacio físico de trabajo
Longitud de soporte 2	R2	25	mm	Espacio físico de trabajo
Índice del resorte	C	6		
Diámetro del Alambre	Dw	1.2	mm	Valor seleccionado
Angulo de Carrera	φ_s	240	°	Angulo de giro del hombro
Deflexión angular mínima	φ_m	10	°	
Número de espiras activas	Na	8		
Material				Acero Inoxidable AISI 5160 Tratado térmicamente

Datos de entrada				
Variable	símbolo	magnitud	Unidades	Observaciones
Esfuerzo de flexión Admisible	σ_{adm}	708	MPa	
Modulo de elasticidad	E	175000	MPa	
Resultados				
Constante del Resorte	K	0.63	N.m/ °	
Momento de flexión mínimo	M1	6.79	N.m	
Momento de flexión Máximo	M2	153.45	N.m	Es menor que torque del motor
Esfuerzo de flexión Máximo aplicado	σ_{max}	479.45	MPa	$\sigma_{max} < \sigma_{adm}$
Resultado de la prueba del resorte	Verdadero			

Fuente: el Autor.

3.4.4 Selección de actuadores

La selección de los actuadores de las articulaciones del robot SCARA se realiza principalmente teniendo en cuenta principalmente los requisitos de velocidad para lograr un mejor control de posición y precisión de los movimientos. Las articulaciones de revolución correspondientes al hombro y el codo son de accionamiento directo y están dotadas de motores DC de imán permanente con cajas reductoras que disminuyen su velocidad e incrementan el torque y los encoders están acoplados a los ejes de los motores.

Tabla 8. Características del Motor de la articulación del Hombro.

MOTOR ARTICULACION 1			
MARCA: PITMAN		MODELO: GM9234S031	
Característica	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje	E	12	V
Corriente Máxima	I	9.15	A
Corriente sin Carga	Inl	200	mA
Peso	W	577	Gr
Velocidad Nominal	S	21	Rpm
Torque	T	36	kgf.cm
REDUCTOR			
Relación de Reducción	M	218.4 : 1	
Torque Máximo	T	36	kgf.cm
Eficiencia	N	73	%
ENCODER			
Resolución	Res.	500	Ppr
No. De Canales		3	
DIMENCIONES			
Diámetro	D	5.5	Cm
Longitud	L	13	Cm
Diámetro del Eje	Ds	6	Mm

Fuente: Catalogo Pitman, ver Anexo 1

Tabla 9. Características del Motor de la articulación del codo.

MOTOR ARTICULACION 2			
MARCA: Pololu		MODELO: 25Dx76L	
Característica	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje	E	6	V
Corriente Máxima	I	2.2	A
Corriente sin Carga	Inl	80	mA
Peso	W	75	Gr
Velocidad Nominal	S	33	Rpm
Torque	T	12.2	kgf.cm
REDUCTOR			
Relación de Reducción	M	172:1	
Torque Máximo	T	12.2	kgf.cm
Eficiencia	N	80	%
ENCODER			
Resolución	Res.	48	Ppr
No. De Canales		2	
DIMENCIONES			
Diámetro	D	2.5	Cm
Longitud	L	5.5	Cm
Diámetro de eje	Ds	4	Mm

Fuente: catalogo Pololu

Debido a la dificultad que implica el desarrollo del modelo dinámico para hacer un cálculo más refinado de los torque necesarios para lograr el movimiento de las articulaciones. Se verificó experimentalmente que el torque suministrado por cada motor superaba el requerido para realizar los giros.

Para el desplazamiento del efector final se seleccionó un cilindro neumático de las siguientes características el cual es activado mediante una electroválvula neumática 5/2 que permiten el posicionamiento en 2 posiciones extremas durante el avance y retroceso del vástago, el circuito neumático es alimentado a una presión de 30psi (2 bar) y la regulación de velocidad se hace mediante silenciadores con regulación del escape.

Figura 35. Circuito neumático del Efector Final.

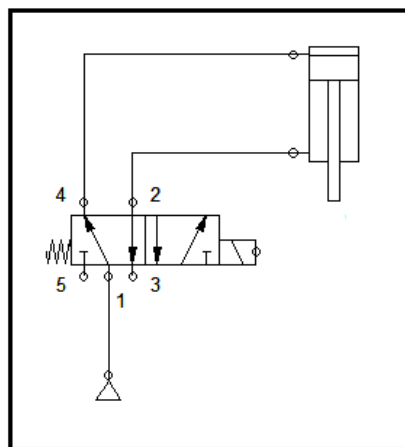


Tabla 10. Características del cilindro neumático.

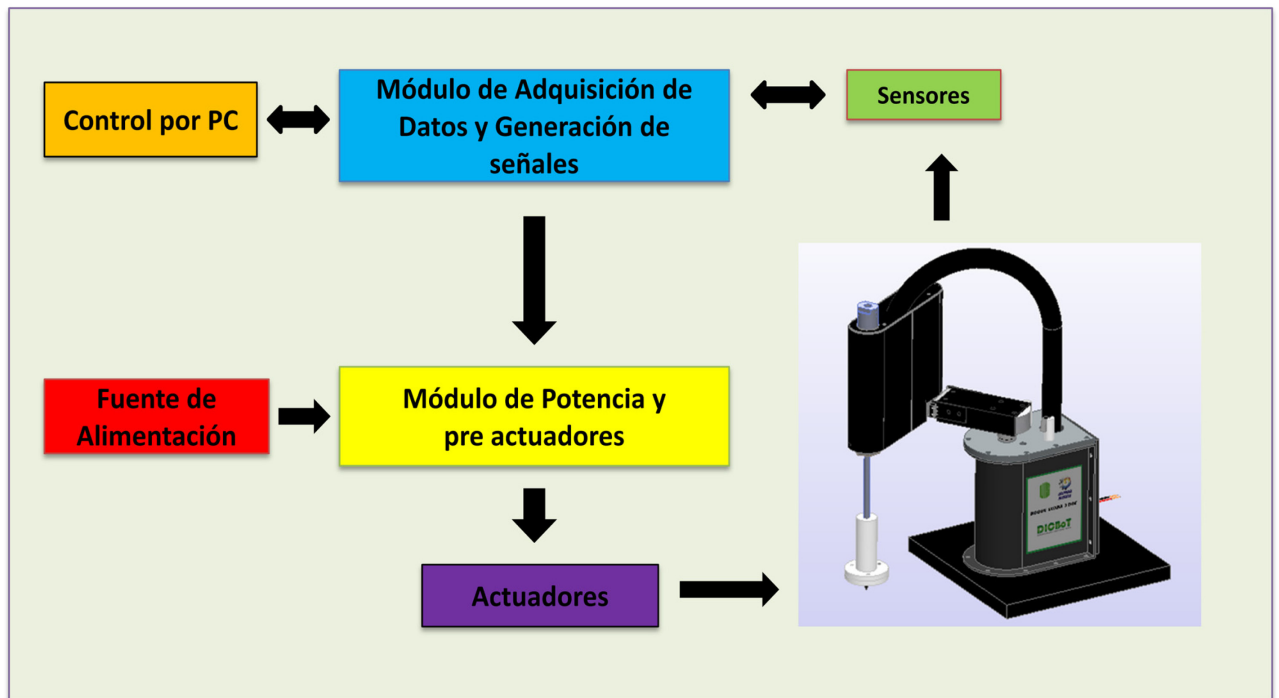
CILINDRO NEUMATICO			
MARCA: Aro Pneumatics Premiar			MODELO: CDD07SBN030
Característica	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro de Pistón	D	¾ (19)	Pulg (mm)
Carrera	L	3 (7.84)	Pulg (mm)
Diámetro de Vástago	d	¼ (6.2)	Pulg (mm)
Presión Máxima de operación	P	200	Psi
Conexión racor	1/8 NPT		
Rosca del extremo del Vástago	UNF ¼ -28		
Rosca del soporte del cilindro	UNF 5/8 – 18		

Fuente: el Autor.

3.5 DESCRIPCIÓN Y SELECCIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

La disposición de los sistemas eléctricos y electrónicos se desarrolló siguiendo las normas y criterios de diseño de acuerdo con los requerimientos del Robot SCARA. A continuación se muestra el diagrama de bloques de los elementos que conforman el sistema eléctrico y electrónico con los cuales se alimentan los actuadores y pre actuadores y el sistema de control.

Figura 36. Módulos eléctricos y electrónicos del Robot SCARA 3 DOF.



Fuente: El Autor.

3.5.1 Descripción de la fuente de Alimentación.

Una fuente de alimentación es un dispositivo que convierte las tensiones alternas de la red de suministro, en una o varias tensiones, prácticamente continuas. Para este proyecto se utilizó una Fuente Variable Regulada, disponible en las instalaciones del laboratorio de DICBOT, para la alimentación de los

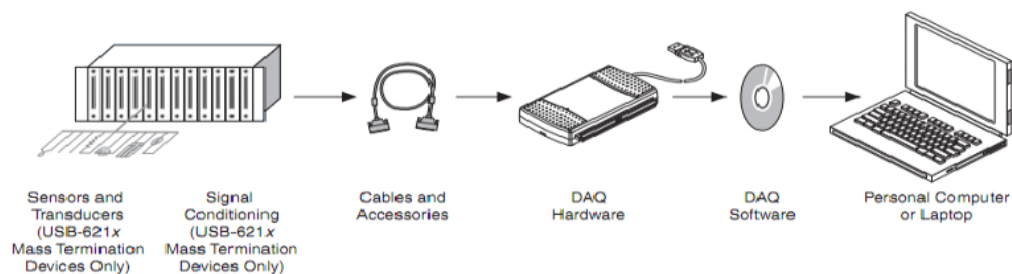
motorreductores DC de imán permanente y de la bobina de la electroválvula neumática, específicamente la salida de 12 V , la salida de voltaje variable regulada a 15V y GND , para más información ver Anexo D y Anexo G .

3.5.2 Descripción de la Tarjeta de control.

El proyecto implementa el uso de sensores para el monitoreo y medición de las variables articulares y los sensores de presencia o finales de carrera así como también la generación de las señales digitales de control, funciones que son realizadas por una tarjeta de Adquisición de Datos.

Los sensores se conectan al computador mediante una tarjeta National Instruments de la serie NI USB-621x como muestra la figura 9.1. Para el desarrollo de este programa se conto con una licencia de labVIEW® para el uso educativo, propiedad de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Figura 37. Elementos que conforman un sistema de adquisición de Datos de National Instruments .



Fuente. (<http://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf>)

La tarjeta de control trae consigo un controlador que activa las funciones de comunicación entre el software y el Hardware, el DAQmx. El software controlador NI-DAQmx y el software interactivo de registro de datos LabVIEW® SignalExpress

de National Instruments son usados en este proyecto para realizar la adquisición de datos y es parte de las librerías de LabVIEW® .

El software de NI-DAQmx es un controlador básico de adquisición de datos que brinda una mayor productividad y rendimiento en el desarrollo de aplicaciones de adquisición de datos y control. NI-DAQmx controla cada aspecto de su sistema DAQ (incluyendo dispositivos de acondicionamiento de señales de NI), desde la configuración a la programación en LabVIEW®, hasta el control a nivel del sistema operativo y del dispositivo.

Mediante esta herramienta se Obtiene rápidamente datos del mundo real con canales virtuales listos para medir.

El dispositivo NI USB-6216 es una tarjeta de adquisición de datos alimentada directamente del computador por medio de conexión USB, que cuenta con entradas y salidas digitales y analógicas, contadores, y además tiene una alta velocidad de muestreo. Tiene un aislamiento especial para mejorar el rendimiento en cuanto a seguridad y precisión. La configuración de la tarjeta es sencilla, se instala el software y basta con conectar el dispositivo para hacer uso de él.

A continuación se presenta la tabla con las especificaciones del módulo y en la figura se observa el Dispositivo.

Tabla 11. Especificaciones de la Tarjeta de Adquisición de Datos NI USB 6216.

Longitud	16,9 cm
Ancho	9,4 cm
Altura	3,1 cm
Conexión en puertos	Tornillo

	Serie M
Familia de Productos DAQ	Voltaje , Codificadores
Tipos de Medida	cuadratura
Canales de un solo terminal	16
Canales Diferenciales	8
Velocidad de Muestreo	400 kS/s
Resolución	16 bits
Rango de Voltaje Máximo (AI)	-10 V , 10 V
Sensibilidad Máxima del Rango de Voltaje	91.6 μV
Rango de Voltaje Mínimo (AI)	-200 mV , 200 mV
Mínima Sensibilidad del Rango de Voltaje	4.8 μV
Memoria Interna	2
Canales de salida analógica	32
Canales bidireccionales E/S Digital	50 mA
Corriente máxima	2

Tomado de <http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/6258>.

Figura 38. Tarjeta de Adquisición de Datos NI USB 6216.

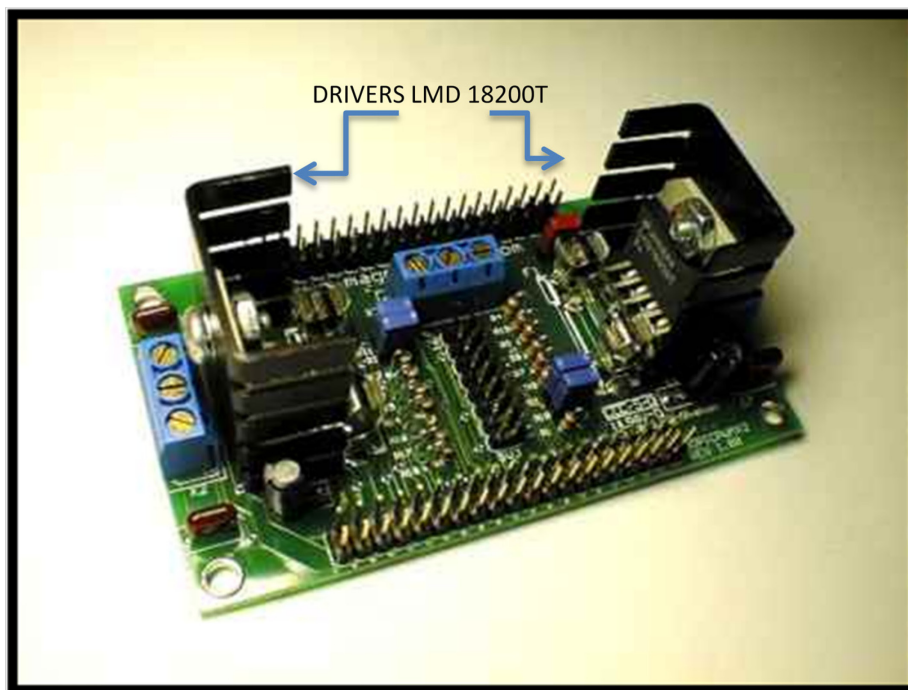


Tomado de <http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/6258>.

3.5.3 Selección de la Tarjeta de potencia.

Para realizar el control de los motores de DC de imán permanente se utilizaron *Drivers* o controladores de potencia tipo puente H, específicamente de la referencia LMD18200T los cuales vienen insertados una placa de circuito impreso (PCB) MAGNEVATION con todos los elementos de protección incluidos (condensadores, resistencias, disipadores de calor, terminales de conexión,). Los drivers son comandados mediante 2 señales digitales *on/off* de 5 V, compatibles con dispositivos TTL, para el freno y una señal PWM (Pulse Width Modulation) en el mismo nivel voltaje. A continuación se puede apreciar la Tarjeta MAGNEVATION con sus respectivos Drivers.

Figura 39. Tarjeta de Potencia MAGNEVATION con los Drivers LMD18200t.



Tomado de <http://www.magnevation.com/detailspwm2.htm>

A partir del driver **LMD18200** de **National Semiconductors** que incluye internamente un puente en H de transistores DMOS, junto con la lógica de

excitación necesaria, y con entradas compatibles con niveles TTL, se van a proponer diferentes configuraciones para excitar al motor de CC bajo estudio.

Para entender el funcionamiento del montaje conviene previamente estudiar la estructura interna del driver. Las hojas de características del mencionado circuito se adjuntan en el Anexo C,

Cuando se realiza el control de un motor de cc con un driver no lineal, como en este caso un puente en H, lo que se persigue es reducir el consumo del driver que va a atacar al motor. Para ello, los dispositivos que van a excitar al motor (transistores unipolares, bipolares, IGBTs, etc) deben de trabajar en conmutación, es decir en corte y en saturación.

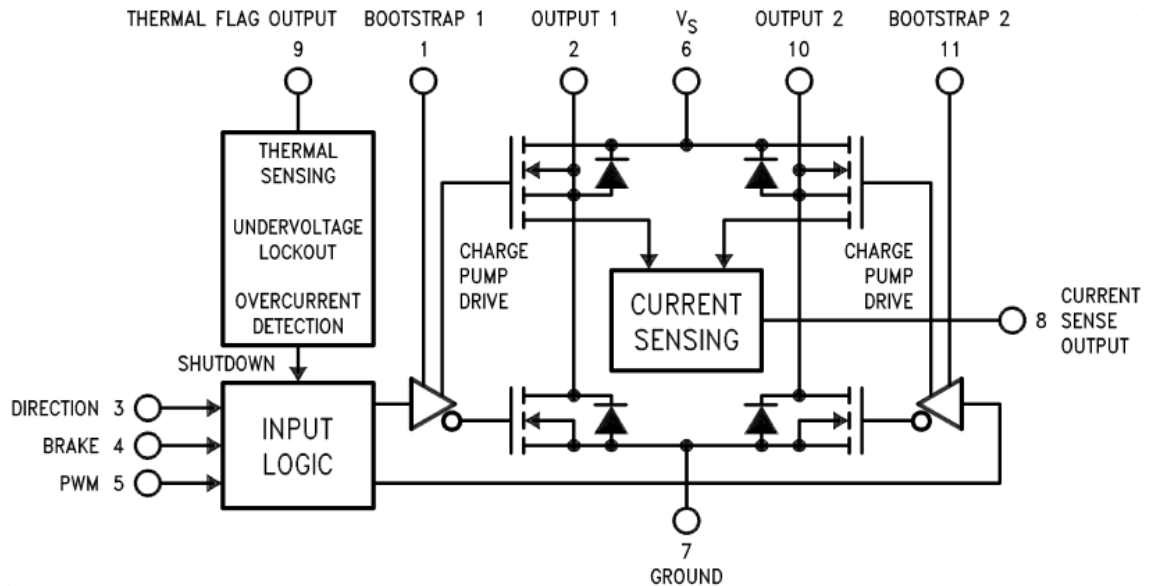
En esta técnica de excitación de motores de cc, como sólo son posibles dos estados de los interruptores de potencia, se podrá realizar el control del driver mediante señales digitales. Partiendo de estas condiciones, el control de tensión o de corriente en los motores se realizará variando el tiempo en que la señal digital esté activa o inactiva.

Este control se puede realizar fundamentalmente de dos formas:

- Manteniendo el tiempo en alta fijo y variando la frecuencia de la señal. De esta forma se consigue variar el valor medio de la señal (tensión o corriente) y con ello la velocidad del motor. Debido a los problemas que provoca el cambio de frecuencia de conmutación de los dispositivos, este método no suele emplearse. Este tipo de señal se representa en la figura adjunta.
- Manteniendo fija la frecuencia de la señal y modificando el tiempo en alta de ésta (es decir, su ciclo de trabajo). La consecuencia de variar el ciclo de trabajo es, al igual que antes, variar el valor medio de la señal a controlar (tensión o

corriente). Este es el método habitual de control. Recibe el nombre de control PWM (Pulse Width Modulation).

Figura 40. Diagrama electrónico del circuito integrado LMD18200t.



Tomado de <http://www.nationalsemiconductor.com/detailspwm2.htm>.

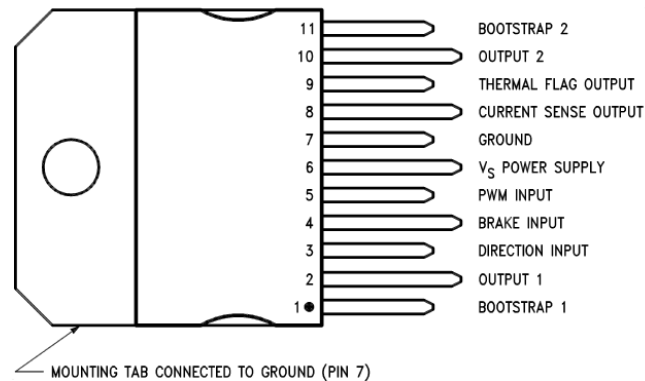
Las características más importantes de este circuito son las siguientes:

- Corriente máxima en continua a través de sus terminales de salida *OUTPUT1* (pin 2) y *OUTPUT2* (pin 10) de 3 A, con tensiones máximas de hasta 55V. Potencia máxima de 25W.
- Corriente de pico de 6 A durante 200mseg.
- La alimentación de la parte de potencia del puente en el rango (pin 6: V_S): **+12V** hasta +55V.
- Compatibilidad TTL con todas las señales externas de control.
- Protección térmica interna, con flag de temperatura a 145°C (pin 9: *THERMAL FLAG OUTPUT*, que es una salida en colector abierto, activa a nivel bajo) y con bloqueo del puente a 175°C.
- Protección contra cortocircuito en la carga y sobrecorriente (internamente, cuando se ha producido una situación de sobrecarga, se bloquean todos los

transistores del puente y automáticamente se testea de nuevo esta condición cada $8 \mu\text{seg}$, de forma que el puente se resetea automáticamente).

El encapsulado del LMD18200 utilizado tiene 11 pines TO-220, tal y como se indica en la figura adjunta.

Figura 41. Características del circuito integrado LMD18200t.



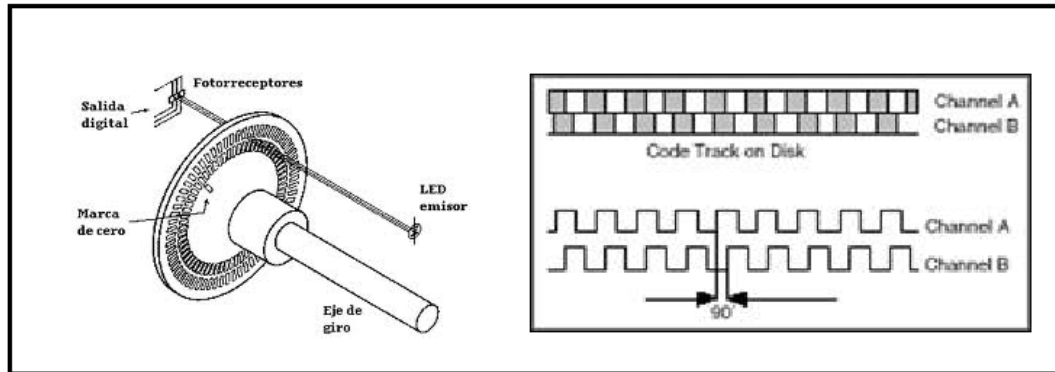
Tomado de <http://www.nationalsemiconductor.com/detailspwm2.htm>

3.5.4 Selección de sensores

Entre los sensores seleccionados están:

- ✓ **Sensores Principales:** se usaron 2 encoders incrementales para medir los ángulos de giro de las articulaciones, los encoders vienen incluidos en los motorreductores seleccionados y sus ejes están acoplados solidariamente con los ejes de los motores (Ver Anexo A). Un encoder rotativo o codificador giratorio, que consiste en un diodo emisor de luz (LED), un disco y un detector de luz en el lado opuesto del disco. El disco, que está montado en el eje de la rotación, tiene patrones de sectores opacos y transparentes codificados en él. Al girar el disco, los segmentos opacos bloquean a la luz y los transparentes la dejan pasar. Esto genera los pulsos de una forma de onda cuadrada, la cual puede luego ser interpretada como posición o movimiento.

Figura 42. Componentes de un encoder y las señales generadas.



Tomado de <http://www.nationalsemiconductor.com/detailspwm2.htm>

- ✓ **Sensores Auxiliares:** se utilizaron 4 Finales de carrera para indicar las posiciones extremas de las articulaciones, los cuales funcionan como interruptores normalmente abiertos en un circuito eléctrico energizado a 5V y cuando se cierran generan la señal digital de presencia.

4. CONTROL DEL ROBOT SCARA 3 DOF

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.

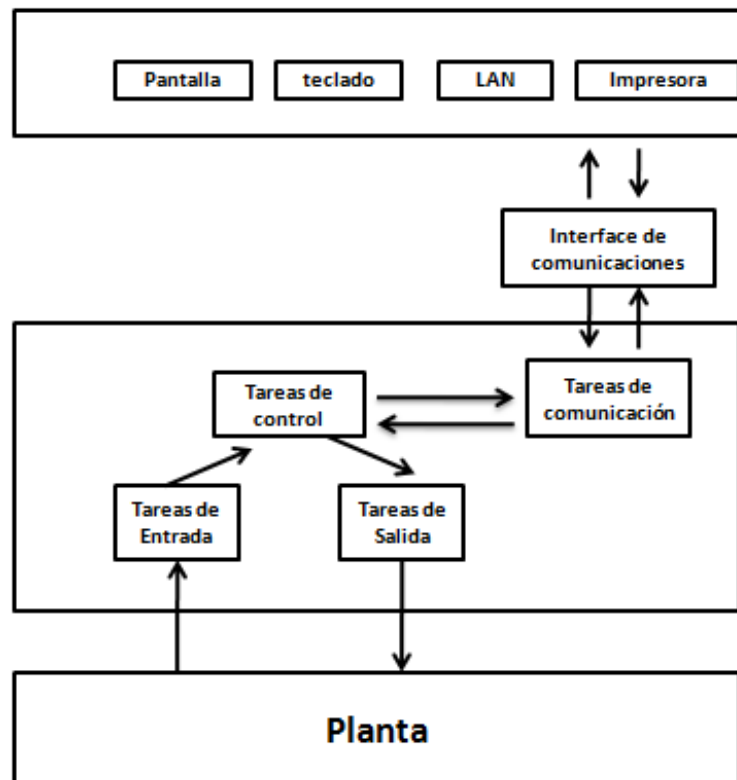
Dentro de los propósitos de este proyecto se contempló la implementación de un sistema de control por PC mediante el uso de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6216 y la versión de Software NI LabView 2009 para uso educativo, con licencia de propiedad de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER; Esta combinación de hardware-software constituye una valiosa herramienta para el Diseño Mecatrónico de prototipos robóticos que permite la captura de las señales de los sensores, el procesamiento, monitoreo, simulación y la generación de señales de control digitales o analógicas en tiempo real.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL POR PC.

Los computadores se han convertido en una herramienta muy versátil tanto en el campo educativo como industrial especialmente en el desarrollo y pruebas de productos mecatronicos experimentales. Los sistemas de control por PC se basan en una combinación de tareas que son ejecutadas conjuntamente por el Hardware (Procesador, Memorias, Dispositivos de Entrada y Salida, etc.) y el software (Los Lenguajes de programación en tiempo real, Aplicaciones que están listas para ser usadas por el usuario, etc.). Cada una de estas partes tiene características propias, el software para control Basado en PC está específicamente diseñado para su uso en computadoras personales estándar, comunicadas con multitud de equipos industriales. Se caracteriza por un alto grado de adaptabilidad a los condicionamientos de las demás partes. Así, respeta los requerimientos de hardware y software de la PC, utilizando al máximo los estándares. Del mismo

modo, tratará de adaptarse a la mayor cantidad posible de equipos digitales de control industrial; otras denominaciones utilizadas para referirse al software para control basado en PC son: software de supervisión, software para adquisición de datos, software para control de procesos. En este curso desarrollaremos un software de adquisición de datos y un software de control de procesos.

Figura 43. Esquema básico de un sistema de control por PC



Fuente: Robótica: Control, detección, visión e inteligencia.

4.3 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE.

LabVIEW® es un entorno de programación gráfica con el cual se pueden desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que tienen una gran similitud a un diagrama de flujo;

Esta herramienta informática ofrece una sencilla integración con miles de dispositivos de hardware y ofrece una amplia cantidad de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual.

Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW® se resumen en las siguientes:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición,
- Análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

LabVIEW® es un software de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, además tiene una gran similitud con los programas que usan el lenguaje C o BASIC. Pero presentan una diferencia, la cual pone en gran ventaja el uso de LabVIEW®: los lenguajes de programación mencionados (C o BASIC) se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabVIEW® emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques.

Para el empleo de LabVIEW® no se requiere gran experiencia en programación, ya que se emplean iconos, de fácil entendimiento, y se apoya sobre símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para construir las aplicaciones. Por ello

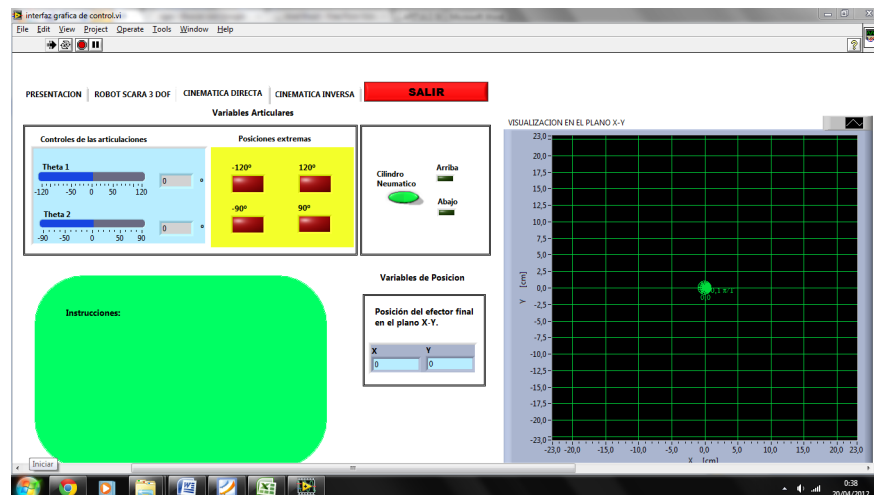
resulta mucho más intuitivo que el resto de lenguajes de programación convencionales.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW® se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento simulan los de un instrumento real. Los VIs están conformados por una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs.

- **Panel Frontal.** Se trata de la interfaz gráfica del VI con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un panel frontal está formado por una serie de botones, pulsadores, perillas, sliders, leds, gráficos, etc. Tal y como se muestra en la siguiente figura.

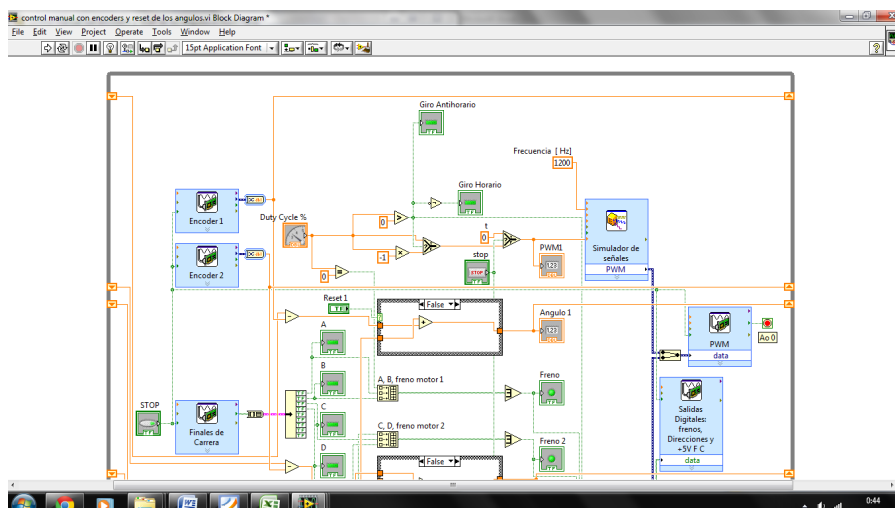
Figura 44. Panel Frontal de Labview.



Fuente: El Autor.

- **Diagrama de bloques.** El diagrama de bloques constituye el código fuente del VI. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier proceso de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal. El diagrama de bloques incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora LabVIEW®. Como se muestra en la figura.

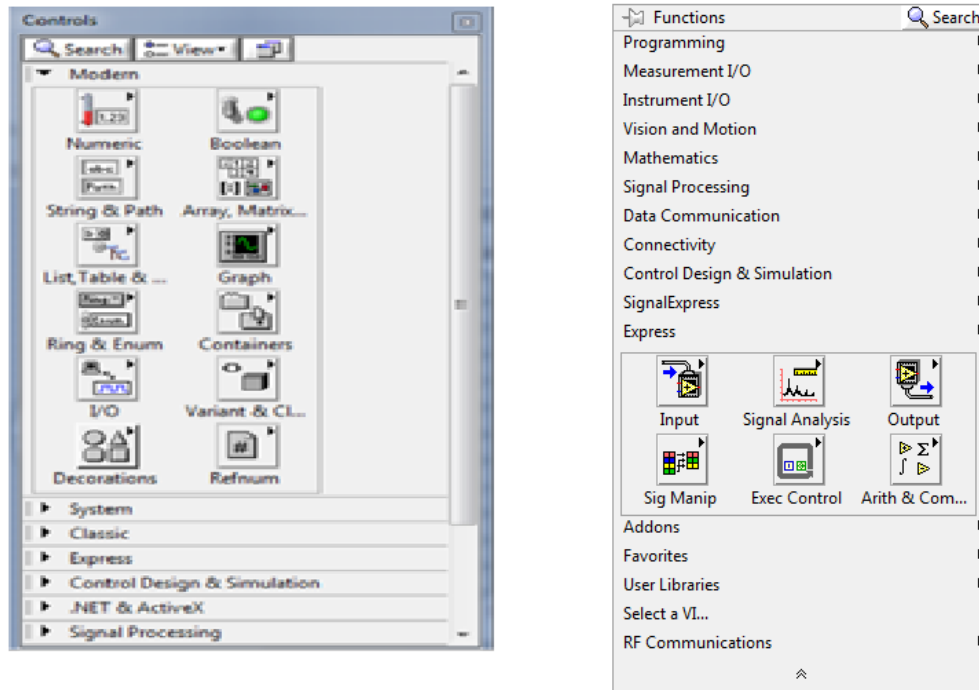
Figura 45. Diagrama de bloques.



Fuente El Autor

- **Paletas.** Las paletas de LabVIEW® proporcionan las herramientas que se requieren para crear y modificar tanto el panel frontal como el diagrama de bloques.

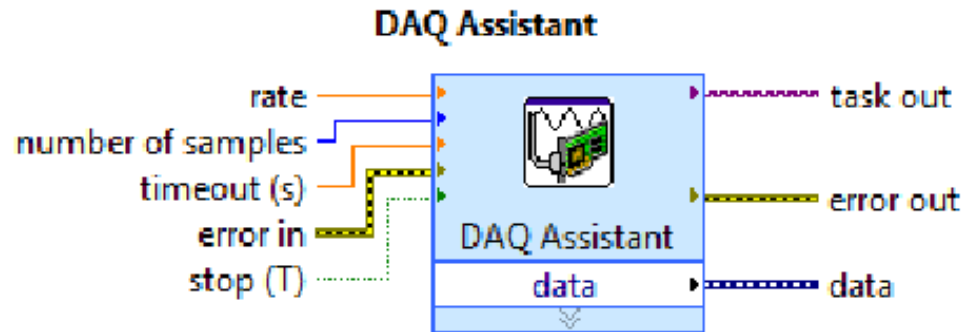
Figura 46. Paleta de panel Frontal y Diagrama de bloques.



Fuente El Autor

- **La herramienta de NI-DAQmx.** Es usada en este proyecto es el DAQ Assistant Express, cuyo bloque se muestra en la figura, se encarga de desarrollar el VI, de acuerdo al tipo de señal de adquisición, todo esto en un mismo bloque. Los datos requeridos para el uso de esta herramienta, son: tipo de señal, declarar si es una entrada o una salida, y especificar el puerto encargado de la captación de esa señal.

Figura 47. Función de Labview utilizada para la adquisición y generación de señales Instruments



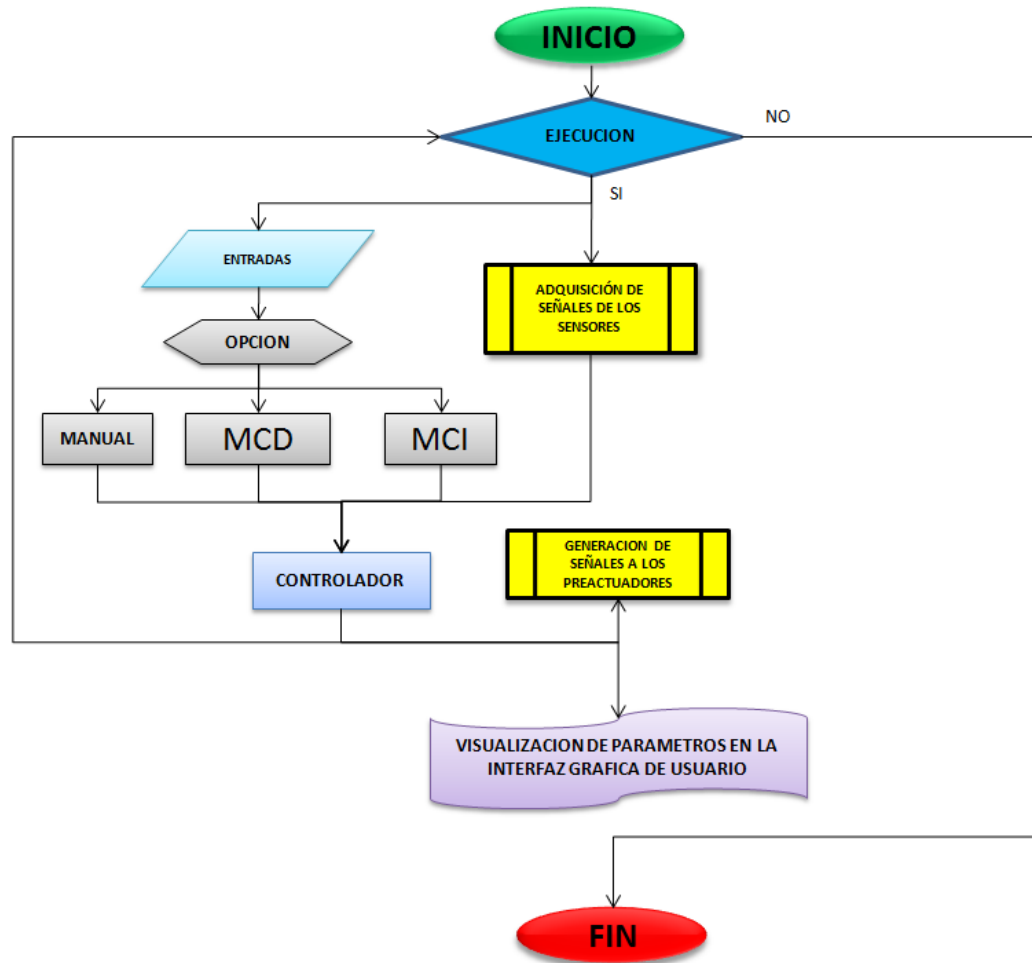
<http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/6258>.

4.4 PROGRAMACIÓN

La programación es el proceso mediante el cual se logra la interacción del usuario con el prototipo a través de la creación de una un panel operador virtual. Para esta aplicación se utiliza la programación en tiempo real donde se relacionan las funciones del sistema con eventos externos, es decir mediante esta se establece la comunicación con la tarjeta de Adquisición de Datos ya sea para muestrear señales de los sensores o para generar señales de control, se establecen los parámetros del controlador, se elaboran los algoritmos de cálculo de los modelos cinemáticos directo e inverso y se crea una interfaz grafica de usuario para monitorear los coordenadas de posición y las variables articulares, reproducir el modelo del mecanismo .

El programa de control se divide en las siguientes subrutinas o bloques que se ejecutan de acuerdo con el siguiente algoritmo:

Figura 48. Diagrama de Flujo del Programa de control.

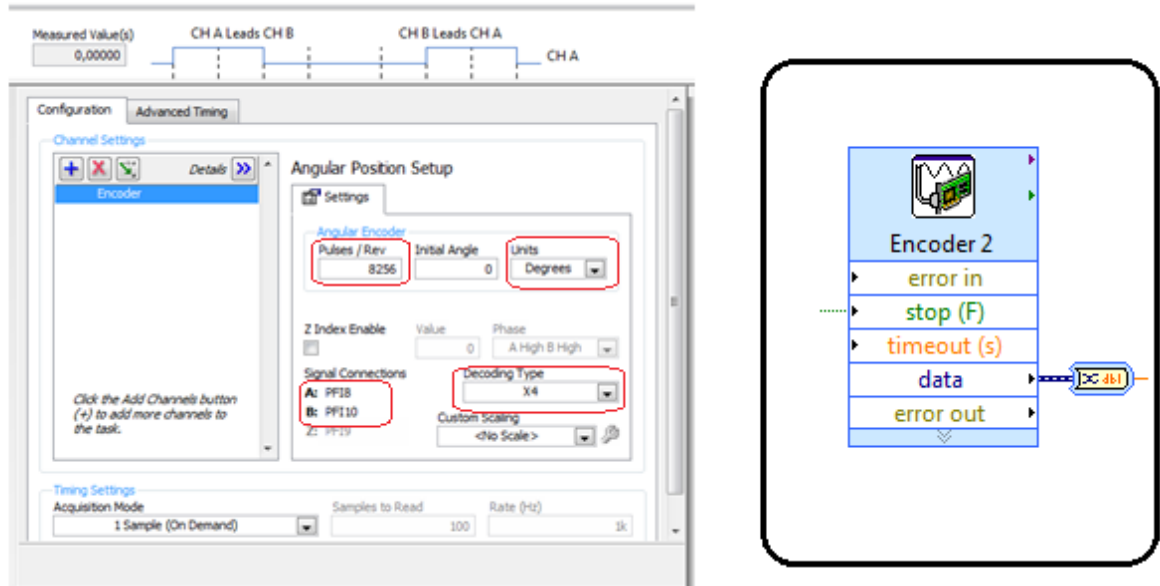


Fuente El Autor.

- **Entradas.** Corresponde a los elementos de comando para definir los ángulos de giro de cada articulación o las coordenadas de posicionamiento del efector en el plano y se representan en la interfaz gráfica como botones deslizadores, perillas o controladores numéricos.
- **Adquisición de las señales de los sensores.** En este proyecto se utilizaron sensores digitales específicamente los encoders incrementales y los finales de carrera, los cuales se utilizan para medir los ángulos de giro e indicar las posiciones extremas respectivamente. Mediante la función DAQ Assistant

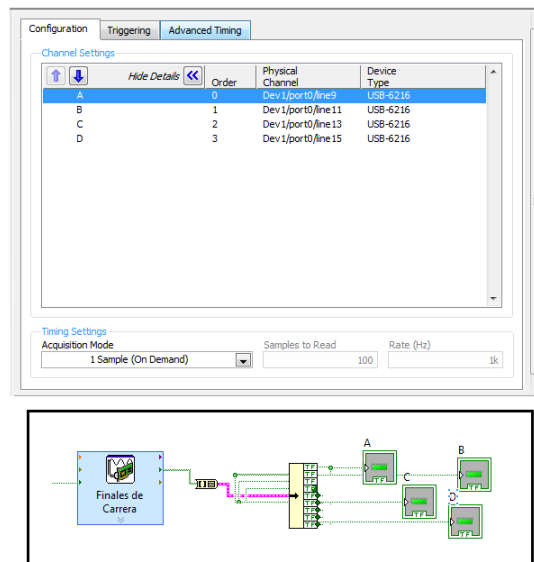
Express se configuran las funciones de contador de pulsos que realizan las respectivas mediciones de los ángulos de giro a partir de las características de los encoders (relación de velocidad del reductor, pulsos por revolución, tipo de cuadratura y unidades de medición) y la comunicación con los pines de conexión de la tarjeta. Y para censar las señales de los 4 finales de carrera se usa la misma función pero configurada como entrada digital (Digital Input) para un arreglo de datos y 4 salidas digitales que corresponden a los voltajes de energización de los finales de carrera.

Figura 49. Configuración de la función bloque de lectura de encoders .



Fuente El Autor.

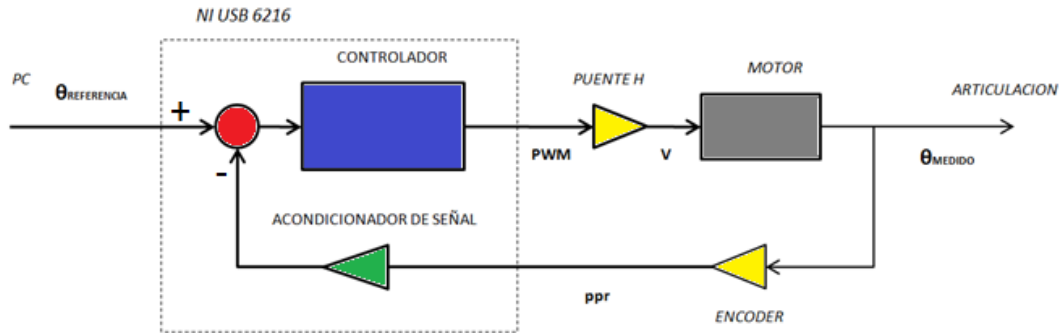
Figura 50. Configuración de la función bloque de lectura de señales digitales de finales de carrera.



Fuente El Autor.

- **Controlador.** El movimiento de las articulaciones es controlado de la siguiente forma: Las articulaciones de revolución correspondientes al hombro y el codo de SCARA están dotadas de un control de posición de lazo cerrado monoarticular y la articulación prismática mediante una control ON/OFF de lazo abierto.
 - a. En los motores eléctricos de corriente continua, la velocidad se controla directamente variando el voltaje, es decir es un control de lazo Abierto, pero cuando se adiciona un sensor de posición angular retroalimentando la señal censada, se compara con un valor deseado y se implementa una estrategia de control que permite una variación automática de la velocidad del motor a medida que se aproxima a su posición de giro deseada y esto se logra mediante un control de lazo cerrado o control retroalimentado.

Figura 51. Diagrama de bloques de control retroalimentado de una articulación.



Fuente El Autor.

Para una acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador, $u(t)$ y la señal de error, $e(t)$ es:

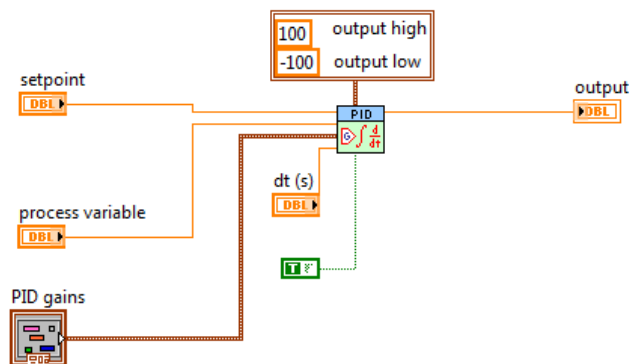
$$u(t) = K_p e(t)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es en esencia un amplificador de ganancia ajustable. Mientras más grande sea la señal de error mayor será la señal correctiva. Una enorme ganancia crea una respuesta rápida pero puede conducir a exceso y oscilación, especialmente si el sistema tiene poco amortiguamiento. La elección de la estrategia de control depende de las características dinámicas del sistema en especial de la respuesta de los actuadores. En este caso los motorreductores con transmisiones de alta relación de velocidad presentan una elevada capacidad de disipación de energía es decir elevado amortiguamiento, además las bajas velocidades de operación y los eslabones aligerados evitan la generación de fuerzas inerciales considerables, por esta razón el control proporcional resulta ser la opción más adecuada para esta

aplicación, desde luego no se descarta la implementación de del PID para optimizar el desempeño del sistema y la variación en las condiciones de operación. Debido a la dificultad para modelar analíticamente el sistema, se optó por realizar pruebas empíricas en las cuales las ganancias del controlador se ajustan de forma iterativa y simultáneamente se monitorean las respuestas del sistema.

La codificación del controlador en la programación se realizó mediante la el uso de la función *PID & FUZZY LOGIC TOOLKIT* de labview que se describe a continuación los parámetros del controlador.

Figura 52. Diagrama de bloques de control retroalimentado de una articulación.



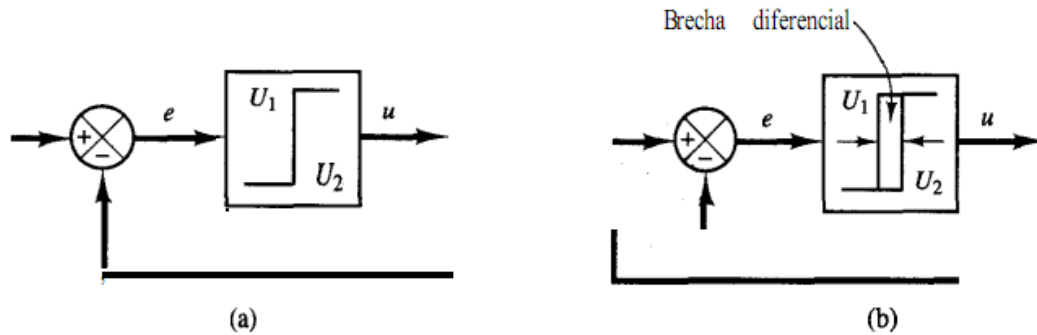
Fuente: Ayuda de Labview 2009.

- *Output Range*: permite especificar los valores máximo y mínimo de la salida del controlador PID, dichos valores son por defecto 100 y -100 respectivamente. Esta salida corresponde al porcentaje de Ciclo de trabajo (*Dutty Cycle*) de la señal PWM que se le envía a los controladores puente H para realizar una variación de velocidad proporcional. Para esta aplicación se establecieron valores de este en +/- 30% para evitar altas velocidades y errores muy altos que generen el efecto *windup*.

- *Set Point*: Establece el valor deseado de la variable del proceso que está siendo controlado. En este caso corresponde a los valores de los ángulos de giro de las articulaciones ya sean ingresados manualmente o calculados mediante el modelo cinemático inverso.
- *Process Variable*: especifica el valor medido de la variable de proceso que está siendo controlado. Este valor es igual al valor de realimentación del control en lazo cerrado. En esta aplicación corresponde a los datos que son enviados desde los contadores de pulsos de los encoders de las articulaciones.
- *PID Gains*: permite colocar los valores de los parámetros de ganancia proporcional K_p , Tiempo Integral T_i y Tiempo Derivativo T_d . Estos parámetros se determinaron mediante prueba y error con el fin de obtener una respuesta más rápida posible y evitar los sobreimpulsos.
- *Output*: entrega el valor de salida del algoritmo del controlador PID, el cual es enviado al generador de señal, siendo usado su valor absoluto para definir el % ciclo de trabajo y el signo indica el sentido de giro del motor, para esto se complementa con condicionales que dependiendo del valor que tenga la salida del controlador PID, si es menor o igual de cero se activan señales digitales hacia el controlador puente H de cambio de dirección y freno respectivamente.
- *dt(s)*: especifica el intervalo, en segundos, en el cual se llama este VI. Si $dt(s)$ es menor o igual a cero, este VI calcula el tiempo desde que fue llamado última vez mediante un temporizador externo. Su valor predeterminado es -1.
- *Reinicialize?*: es función se utiliza para reiniciar el controlador se deja la configuración predeterminada.
 - b.** En control del cilindro neumático se llevó a cabo mediante un controlador on/off, mediante el cual con una señal digital generada se da la orden de conmutación de la electroválvula neumática de 2 posiciones que permite la extensión o retracción del actuador. El rango en que debe moverse la señal

de error antes de que ocurra la conmutación de la electroválvula se llama brecha diferencial.

Figura 53. Diagrama de bloques de controlador on/off.

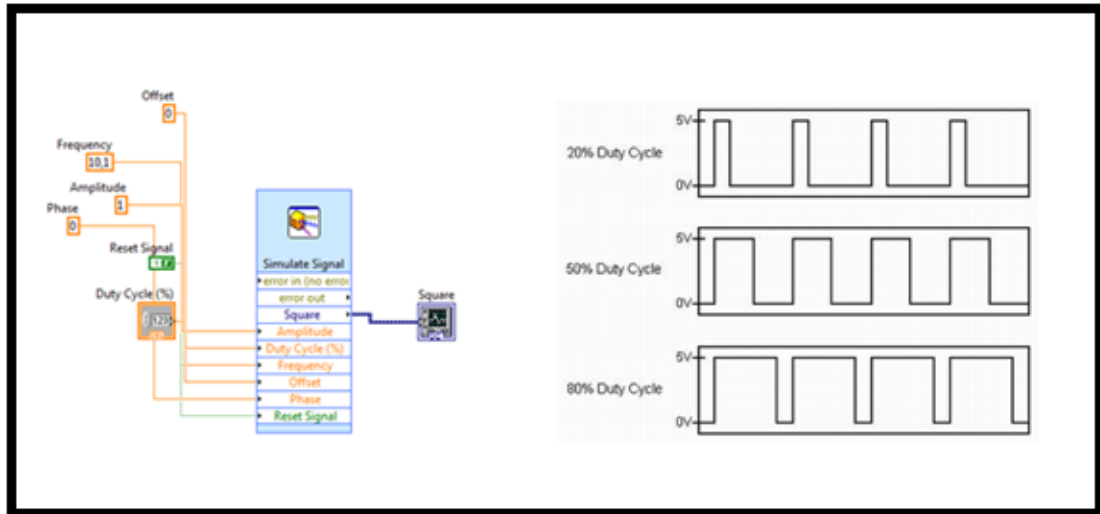


Fuente: OGATA Katsuiko; Ingeniería de control moderna, 3 Ed.

- **Generación de las señales de control.** La generación de señales se realiza mediante la combinación de las funciones de simulación de señal y DAQ Assistant Express configurada como señal de salida analógica, se le asignan valores constantes unos parámetros de caracterización del tren de pulsos de la señal de modulación de ancho de pulso(PWM) como la frecuencia, amplitud, desfase, desplazamiento, niveles de voltaje pico a pico (5V), tipo de muestreo, tasa de muestreo y muestras almacenadas. El valor del porcentaje de ciclo de trabajo es la variable de salida del controlador PID.

A continuación se muestra las características de bloque de función utilizado para simular la señal PWM.

Figura 54.. Bloque del simulador y forma de la onda de la señal PWM .

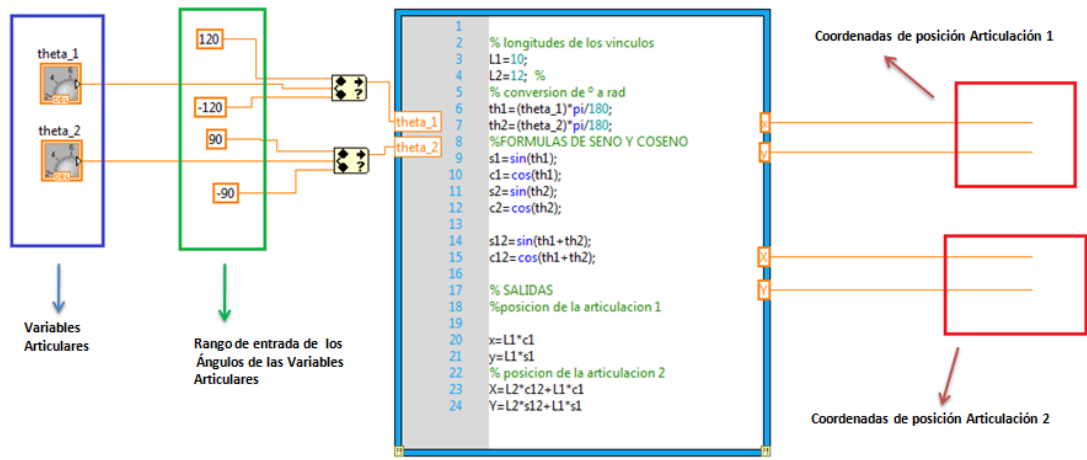


Fuente: Ayuda de Labview 2009.

- *Amplitude*: este valor corresponde a la amplitud de la onda cuadrada, debido a que se necesita que la señal PWM trabaje entre 0 y 5v, el voltaje pico a pico equivale al doble de la amplitud entonces se asignó 2.5.
- *Offset*: Establece un desplazamiento vertical del eje de simetría de la señal cuadrada con respecto a cero, se le asigna un valor de 2.5.
- *Frecuency*: es la frecuencia del PWM, si el valor es muy bajo (<600 Hz) cuando el controlador trabaja a ciclos de trabajo muy bajos los motores presentan movimientos intermitentes y si es muy alto (>3000 Hz) se pierde resolución en el control de la velocidad, este valor se ajustó a 1200 hz
- *Phase*: permite establecer el desfase en grados de la onda cuadrada, se deje el valor predeterminado, es decir cero grados.
- *Dutty Cycle*: es el ciclo de trabajo de la señal , es decir el porcentaje del periodo en el cual la onda permanece activada, su valor es variable y corresponde la salida del controlador.
- *Square*: representa la salida de datos del PWM al generador.

- Bloque de Modelo Cinemático Directo.** Dentro de los propósitos planteado en este proyecto se contempló la validación del modelo cinemático directo. Esta validación se hace mediante la implementación de un algoritmo de cálculo dentro de la estructura del programa de control, en este programa se introducen como entradas los ángulos leídos por los sensores de las articulaciones y se calculan las coordenadas de posición (x,y) utilizando las formulas del capítulo anterior. Esta sección se desarrolla utilizando el bloque de función *Math Scrip* que utiliza la misma sintaxis de escritura de Matlab.

Figura 55. Código fuente del Cálculo del Modelo Cinemático Directo.



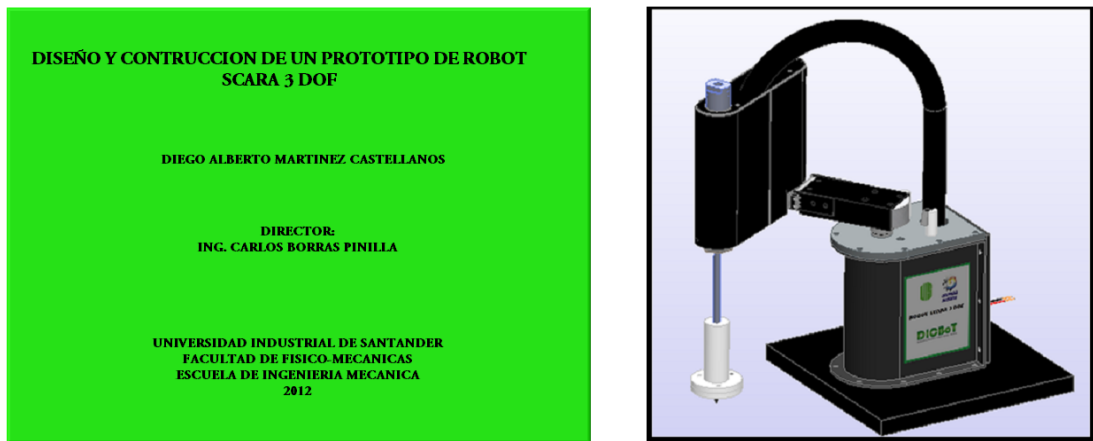
Fuente: el Autor.

- Bloque de Modelo Cinemático Inverso.** En el modelo cinemático inverso se tienen como datos de entrada las coordenadas de posición (x,y) dentro del volumen de trabajo del efector final, este programa basado en las formulas de la sección del capítulo 3.3.2, calcula el valor de los ángulos de las articulaciones y lo envía al Set Point del controlador para realizar el movimiento programado.
- Interfaz Grafica de Usuario.** La interfaz grafica de usuario está compuesta de varias pestañas que permiten la visualización de los paneles de control, las

variables controladas y el monitoreo virtual de los movimiento del robot SCARA. Las pestañas están organizadas de la siguiente manera:

- a. **Presentación.** Muestra la información básica del proyecto, el Autor, El director y una imagen que representa el modelo real del prototipo de robot SCARA.

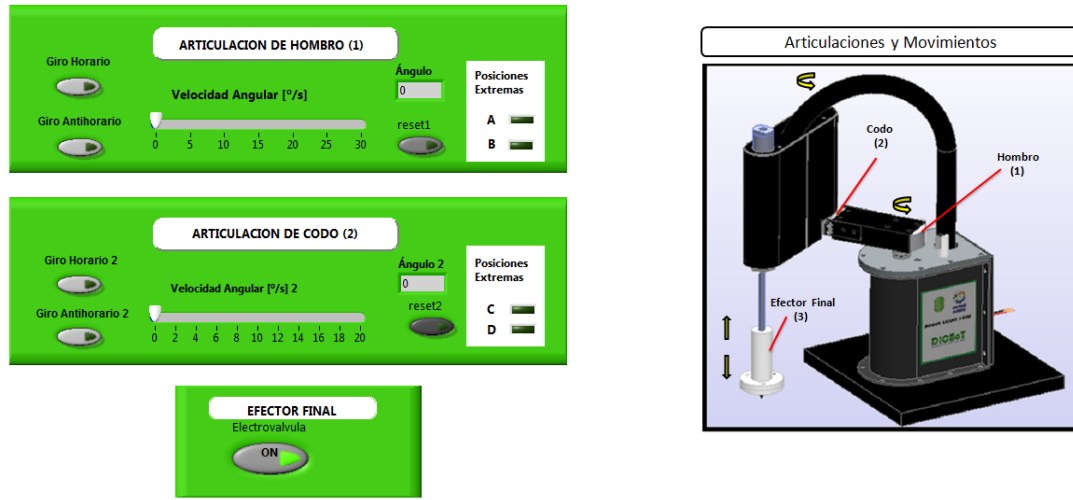
Figura 56. Presentación de Interfaz grafica de usuario.



Fuente: el Autor.

- b. **Control On/Off.** En esta sección se puede apreciar un panel de operador virtual en la que el movimiento de cada articulación se realiza haciendo clic en los pulsadores o correspondientes a la dirección giro deseada, la velocidad del es ajustada mediante unos deslizadores y el ángulo de giro puede ser medido, además cuenta con paneles de alarma que indican cuando los finales de carrera son activados.

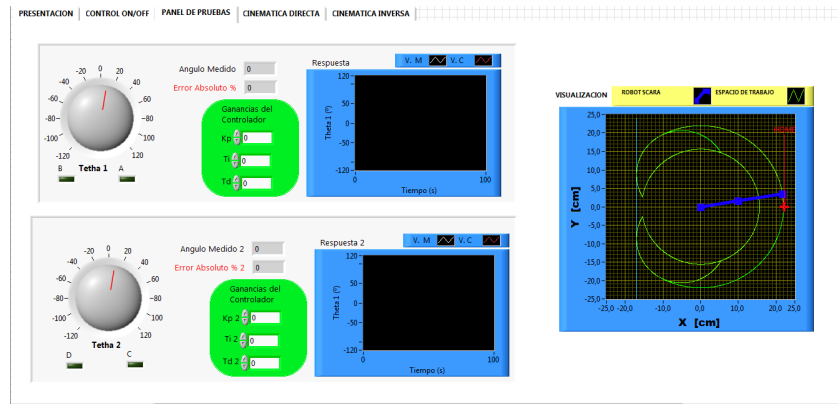
Figura 57. Sección de Control On/Off.



Fuente: el Autor.

- c. **Panel de pruebas.** Consiste de 2 secciones en donde cada una consta de una perilla que permite especificar el ángulo de giro la articulación, un indicador numéricos que muestran el ángulo medido por el sensor, otro indicador que muestra el error absoluto de posicionamiento, 3 casillas numéricas para asignar los valores de las ganancias del controlador PID y realizar su respectiva sintonización y un indicador gráfico que muestra el comportamiento de la variable manipulada (setpoint) y la variable controlada en el tiempo.

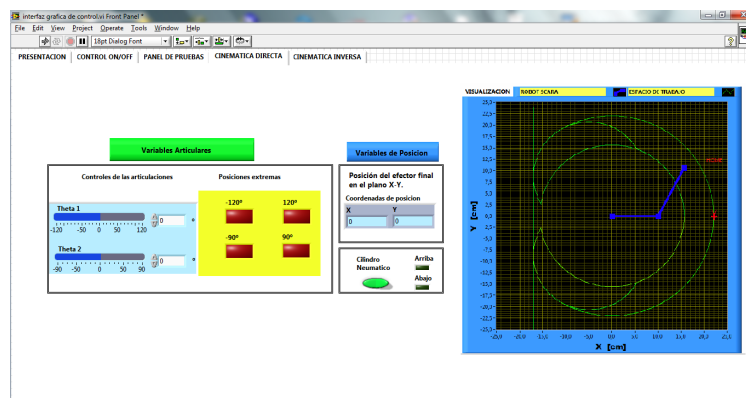
Figura 58. Sección del panel de pruebas.



Fuente: el Autor.

- d. **Cinemática Directa.** Al igual que la sección anterior aquí también se realiza un control de posición angular de las articulaciones de rotación y un indicador grafico que permite visualizar una representación virtual del manipulador con sus dimensiones reales en el plano, la posición del efector final y el cálculo de sus respectivas coordenadas, y también permite mostrar el volumen de trabajo con sus respectivas fronteras de singularidad.

Figura 59. Sección de Cinemática Directa.



Fuente: el Autor.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Existen normas internacionales que establecen los criterios fundamentales para evaluar el desempeño de los robots manipuladores industriales en general, en este caso la *ISO 9283: 1998 Manipulating robots - Performance criteria and related test methods* define las principales características de funcionamiento, describe como deben especificarse y recomienda como se deben realizar las pruebas.

Sin embargo, llevar a cabo la realización de las pruebas resulta inconveniente debido a que son pruebas exhaustivas que requieren el uso de equipos de medición especializados y el seguimiento de rigurosos protocolos de análisis de datos, en esta caso se optó por el desarrollo de pruebas básicas acordes con los objetivos planteados. A continuación se describen los resultados de las pruebas de funcionamiento realizadas al prototipo de robot SCARA 3 DOF.

- Prueba de precisión de giro de las Articulaciones.
- Prueba de Histéresis de Articulación.
- Prueba precisión de posicionamiento en el plano.
- Prueba de Repetitividad.
- Prueba de consumo energético.

5.1 Prueba de precisión de giro de las Articulaciones.

Esta prueba consiste en medir la desviación entre los ángulos de giro programados y los ángulos de giro medidos por los encoders con respecto a una posición de referencia (posición de inicio), teniendo en cuenta la resolución de estos sensores es de 0.003° y 0.04° para las articulaciones del hombro y el codo respectivamente, después se calculan los errores relativos y los errores absolutos y finalmente se promedian estos resultados obteniendo el error de precisión.

Tabla 12. Datos y resultados de la prueba de precisión de giro para la articulación del hombro.

Articulación 1			
Angulo Programado	Angulo Medido	Desviación	% Error absoluto
-120	-119,79	-0,21	0,17
-110	-110,35	0,35	0,32
-100	-102,35	2,35	2,35
-90	-90,8	0,80	0,89
-80	-80,15	0,15	0,18
-70	-71,60	1,60	2,28
-60	-60,23	0,23	0,39
-50	-51,85	1,85	3,71
-40	-40,23	0,23	0,58
-30	-30,91	0,91	3,05
-20	-20,40	0,40	2,00
-10	-10,15	0,15	1,53
0	0,21	-0,01	3,11
10	10,31	-0,31	3,07
20	20,54	-0,54	2,68
30	30,93	-0,93	3,09
40	41,35	-1,35	3,37
50	50,12	-0,12	0,23
60	60,17	-0,17	0,29
70	70,24	-0,24	0,34
80	82,19	-2,19	2,73
90	91,63	-1,63	1,81
100	101,60	-1,60	1,60
110	113,15	-3,15	2,87
120	120,00	0,00	0,00
% Error Promedio			1.71

Tabla 13. Datos y resultados de las pruebas precisión de giro para la articulación del codo.

Articulación 2			
Angulo Programado	Angulo Medido	Desviación	Error absoluto
-90	- 86,41	-3,59	3,99
-80	- 81,39	1,39	1,74
-70	- 67,77	-2,23	3,19
-60	- 61,51	1,51	2,51
-50	- 48,36	-1,64	3,28
-40	- 40,84	0,84	2,10
-30	- 29,01	-0,99	3,29
-20	- 20,60	0,60	3,01
-10	- 9,79	-0,21	2,11
0	0,41	-0,01	2,30
10	9,88	0,12	1,24
20	20,10	-0,10	0,50
30	28,93	1,07	3,57
40	40,87	-0,87	2,18
50	49,52	0,48	0,97
60	58,66	1,34	2,24
70	68,20	1,80	2,56
80	81,82	-1,82	2,27
90	88,38	1,62	1,80
Error Promedio			2,36

5.2 Prueba de Histéresis mecánica de las articulaciones.

Como todo dispositivo electromecánico, en las articulaciones también se presentan errores asociados a los efectos magnéticos, fricción y otras fuerzas externas que dependen de la dirección de movimiento y son conocidos como histéresis, para detectar estos errores se realiza una prueba que consiste en asignar valores de ángulo de giro a cada articulación secuencialmente en escala

ascendente y descendente y se determina la diferencia máxima entre estos valores mediante una gráfica (ángulo medido vs ángulo programado).

Tabla 14. Datos y gráfica de la prueba de histéresis mecánica para la articulación del codo.

PRUEBA DE HISTERESIS			
ARTICULACION 1			
SECUENCIA ASCENDENTE		SECUENCIA DESCENDENTE	
ANGULO PROGRAMADO	ANGULO MEDIDO	ANGULO PROGRAMADO	ANGULO MEDIDO
-120	-118,2	120	122
-100	-95	100	103,45
-80	-78	80	80
-60	-55	60	61
-40	-36	40	39
-20	-19,2	20	20,4
0	4	0	0,6
20	23	-20	-18
40	46	-40	-35
60	62	-60	-54
80	83	-80	-80
100	101	-100	-97
120	120	-120	-116

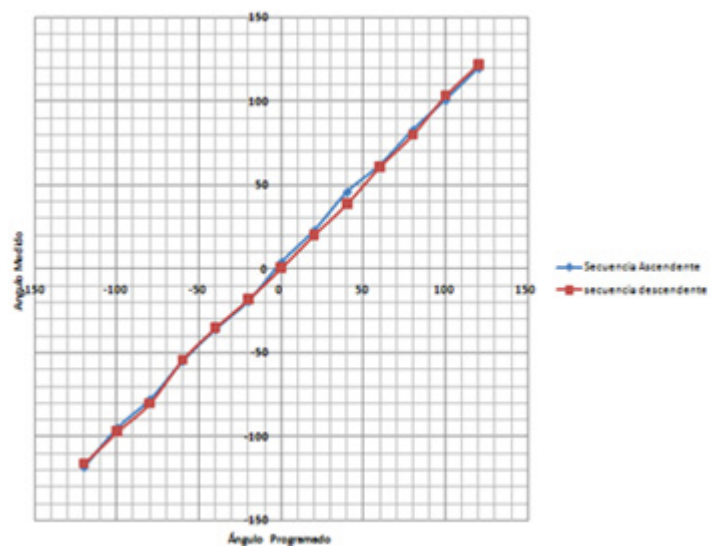
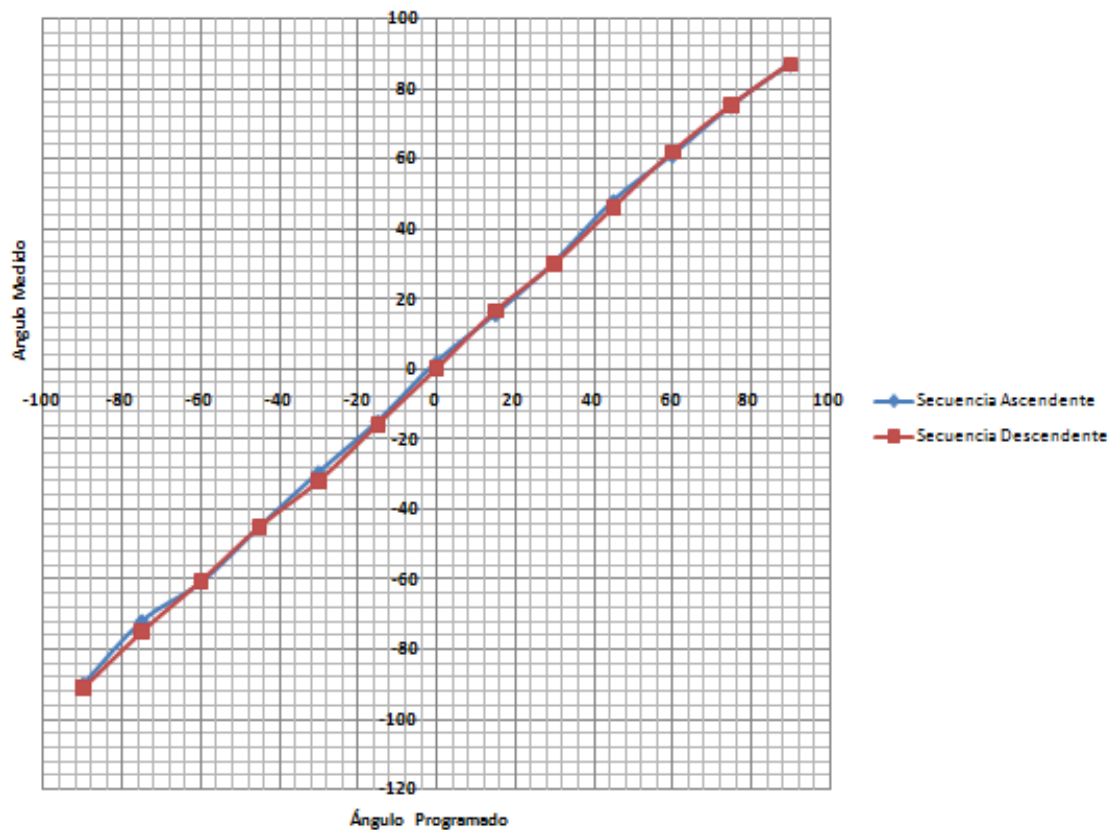


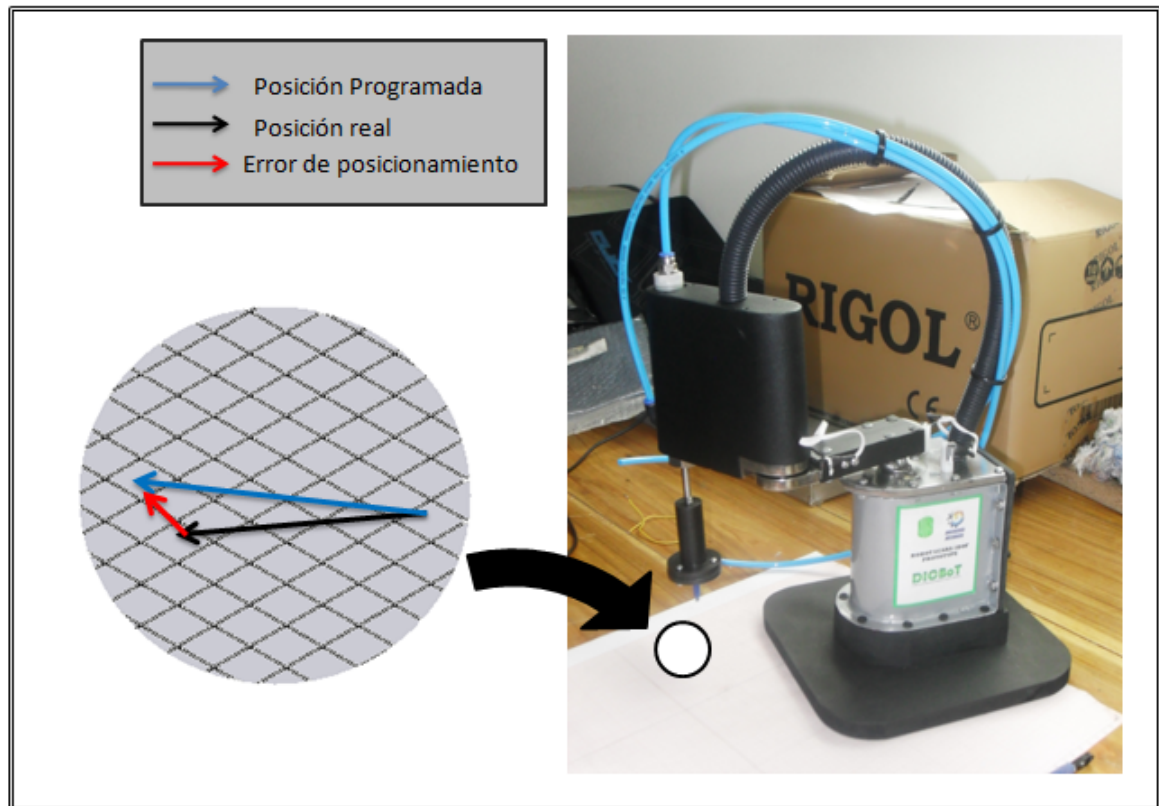
Tabla 15. Datos y gráfica de la prueba de histéresis mecánica para la articulación del codo.

PRUEBA DE HISTERESIS			
ARTICULACION 2			
SECUENCIA ASCENDENTE		SECUENCIA DESCENDENTE	
ANGULO PROGRAMADO	ANGULO MEDIDO	ANGULO PROGRAMADO	ANGULO MEDIDO
-90	-90	90	87
-75	-72	75	75,2
-60	-61	60	61,8
-45	-45	45	46
-30	-29,5	30	30
-15	-15	15	16,5
0	2	0	0
15	15,6	-15	-15,9
30	30,44	-30	-32
45	48	-45	-45
60	61	-60	-60,5
75	75	-75	-74,97
90	87	-90	-91,1



5.3 Prueba de precisión de posicionamiento en el plano.

En esta prueba se hizo la comparación entre las coordenadas de posicionamiento programadas y las coordenadas reales tomando como referencia una cuadrícula milimetrada que representa el plano xy en la cual se fija firmemente el robot procurando que el origen de coordenadas coincida con el eje de la primera articulación, y se establecieron 10 puntos dentro del espacio de trabajo y de esta manera se determina el error de posicionamiento relativo, y el error absoluto se calcula a teniendo la relación entre las magnitudes vector de error y el vector de posición programada.



PRUEBA DE PRECISION

i	Coordenadas Programadas		Coordenadas Alcanzadas		Precisión de Posicionamiento (App)
	Xci	Yci	Xai	Yai	
1	10	15	10,5	15,8	0,94
2	15	12	14,7	11,5	0,58
3	20	5	19,4	5,2	0,63
4	22	0	21,6	0,4	0,57
5	21	-2	19,9	-1,9	1,10
6	7	-17	7,4	-16,4	0,72
7	5	-18	4,3	-17,4	0,92
8	8	-16	8,4	-15,6	0,57
9	19	-4	18,8	-4	0,20
10	18	-6	16	-6,2	2,01

Precision de posicionamiento Promedio [cm] (DPA) 0,82

Fórmulas

$$AP_p = \sqrt{(\bar{X}-X_0)^2 + (\bar{Y}-Y_0)^2} \quad \bar{d}_{PA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(X_{ai}-X_0)^2 + (Y_{ai}-Y_0)^2}$$

Tabla 15. Calculo del error precisión absoluto.

i	Vector posición programada (cm)	vector error (cm)	Error Absoluto
1	18,03	0,94	5,23
2	19,21	0,58	3,04
3	20,62	0,63	3,07
4	22,00	0,57	2,57
5	21,10	1,10	5,24
6	18,38	0,72	3,92
7	18,68	0,92	4,94
8	17,89	0,57	3,16
9	19,42	0,20	1,03
10	18,97	2,01	10,59
Error Absoluto (%)			4,28

5.4 Prueba de Repetitividad.

Para determinar la repetitividad del robot, se programaron 2 puntos diferentes dentro del espacio de trabajo, tomando como referencia uno estos y se ubicó varias veces el extremo del efector final en ese punto., anotando las coordenadas alcanzadas en la siguiente tabla; Se halló la desviación estándar entre las coordenadas de posición programadas y las coordenadas alcanzadas por el efector final, La imprecisión se debe a errores de calibración, a holguras indeseables en la transmisión de las articulaciones o a errores de control y la repetitividad es la capacidad de volver a un mismo punto bajo igualdad de condiciones de carga, la repetitividad está afectada por problemas mecánicos como fricción e histéresis.

PRUEBA DE REPETIBILIDAD			
	Punto 1		1) - Error de Posicionamiento
	X	Y	
Coordenadas Programadas	16	10	
Coordenadas Ubicadas			
1	15,4	11,3	1,48
2	15,6	9,4	0,46
3	16,3	9,7	0,63
4	15,4	9,8	0,30
5	17,9	10,2	0,35
6	16,3	9,7	0,63
7	15,6	10,2	0,36
8	15,7	10,3	0,45
9	15,8	9,6	0,27
10	16,2	10,1	0,56
11	15,2	10	0,51
12	14,2	8,8	1,24
13	17,1	9,3	1,46
14	14,2	9,8	1,55
15	16,7	9,6	0,73
Posicion Promedio	15,84	9,85	
2)- Error de Posicionamiento Promedio. (l)			0,73
3)- Desviacion Estandar			0,46
4) -Repetitividad de posicionamiento			2,11
Fórmulas			
1)- $l_i = \sqrt{(X_i - \bar{X})^2 + (Y_i - \bar{Y})^2}$			
2)- $\bar{l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i$			
3)- $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N l_i^2}{N} - \bar{l}^2}$			
4)- $RP_1 = \bar{l} + 3S_1$			

5.5 Prueba de consumo energético.

El consumo energético se determina realizando la medición de la corriente y el voltaje que consumen los motores de las articulaciones del hombro y el codo, y se calcula la potencia eléctrica consumida y la potencia neumática del actuador se determina a partir de la presión aplicada y la velocidad del actuador.

Tabla 16. Datos y Resultados de consumo energético.

Prueba de consumo Energético			
Articulación	I [mA]	V [v]	P [w]
Hombro	50	3	0,15
	45	4,8	0,22
	63	1,5	0,09
	53	1,7	0,09
	39	2,25	0,09
	47	3,7	0,17
	Potencia Promedio		
Codo	120	6	0,72
	84	4,3	0,36
	96	2,8	0,27
	100	1,9	0,19
	22	2,7	0,06
	27	3,1	0,08
	24	4,3	0,10
	Potencia Promedio		
Efactor Final	P [psi]	Q [in ³ /s]	
	40	1,5	6,78
	40	0,49	2,21
Potencia Total Consumida			9,25

6. COSTO DEL PROYECTO

El costo del proyecto fue financiado por el autor con la cooperación de **DICBOT** y no incluye el costo del trabajo intelectual ni los costos asumidos por la **UIS**.

FUENTE DE FINANCIACION	DESCRIPCION	VALOR (\$)
A U T O R	Componentes estructurales	100000
	Manufactura	250000
	Materiales eléctricos / electrónicos	15000
	Accesorios neumáticos	135000
	Servo actuador	180000
	Papelería	120000
	Gastos imprevistos	150000
D I C B O T	Fuente	200000
	Tarjeta de potencia	150000
	Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6216	3120000
	Servo actuador	450000
TOTAL		4890000

7. CONCLUSIONES

- Mediante la realización de esta tesis se logró el cumplimiento del objetivo principal, Diseñar y construir un prototipo de robot SCARA de 3 de libertad controlado por PC, para la realizar pruebas de cinemática directa e inversa y control de posición, como una primera fase de investigación y estudio en torno a este tipo de robots.
- Se diseño un programa en LabView para realizar el control de posición (en lazo abierto y lazo cerrado) de los movimientos del Robot SCARA 3 DOF basado en el desarrollo de los modelos de Cinemática Directa e Inversa.
- La combinación entre el software LabView y La tarjeta de Adquisición de Datos constituyen una poderosa y versátil herramienta a la hora de desarrollar simulaciones y experimentos en prototipos mecatronicos.
- Se llevaron a la práctica los diferentes conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y los aprendidos durante el desarrollo de este proyecto en las áreas de: Diseño Mecánico, Automatización, Manufactura, conexiones eléctricas, mediciones y montajes, Mecatrónica, control, programación y robótica industrial dentro del contexto de las tendencias de la ingeniería Moderna.
- Se adquirió experiencia en la fase del Diseño-Construcción, resaltando la importancia de los detalles prácticos de la manufactura y ensamblaje que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar un componente mecánico.
- La precisión de posicionamiento promedio se encuentra de medida en cada una de las articulaciones del robot SCARA está del rango de 1 cm aproximadamente, la cual se puede mejorar mediante la implementación de técnicas de control más sofisticadas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALCIATORE David; Introducción a la Mecatrónica y los sistemas de medición.
- [2] Aro Pneumatics Cilinders, Catálogo de cilindros Neumáticos.
- [3] BARRIENTOS Antonio E; Fundamentos de Robótica; Madrid, McGraw Hill, 1997.
- [4] BOADA Acosta Yadira, MORALES Escobar Luis; Construcción, ensamblaje y control de un robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), tesis de grado, ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2010.
- [5] Carvajal Rojas Jaime, Robótica: Aproximación Al Diseño Mecatrónico, Colombia, 2003.
- [6] Clark Dennis, Owings. Building robot Drive trains. Mc. Graw Hill. 3 ed 2003.
- [7] CRAIG Jonh J.; Robótica; Pearson, 3 ed.
- [8] FU K. S., GONZALEZ C. S., LEE C. S. G; Robótica: Control, detección, visión e inteligencia.
- [9] JAZAR, N. Reza. Theory and applied Robotics: Kinematics, Dynamics and Control. Springer.
- [10] Khatib Oussama, Siciliano Bruno; Springer Handbook of Robotics; Stanford University – MIT.

- [11] MATHIA KARL; Robotics for Electronic Manufacturing: principles and application in cleanroom automation; CAMBRIDGE, 2006.
- [12] MOTT Robert; Diseño de Elementos de Máquinas; Pearson, 4 Ed.
- [13] National Instruments NI USB 621x Users Manual.
- [14] National Instruments Data Acquisition And Signal Conditioning Course Manual.
- [15] NTN 2202, Catálogo de rodamientos.
- [16] OGATA Katsuiko; Ingeniería de control moderna; Pearson, 3 Ed.
- [17] PEREZ Sarmiento Luis, GORKY Alfonso, SUAREZ Saavedra Fidel; Prototipo de un robot PUMA de 6 grados de libertad; Tesis de grado, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2005.
- [18] SANDIN Paul E; Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated, McGraw Hill, 2003.
- [21] SHIGLEY, Joseph, Minsky Robert, Diseño en ingeniería mecánica Mc. Graw Hill. 2 ed, 2004.
- [22] www.adept.com/products/robots/scara/cobra-s350/general- Información general de robots SCARA.

ANEXOS.

ANEXO A. HOJAS DE DATOS DE LOS ACTUADORES Y SENSORES UTILIZADOS

1. Motor Pittman Express GM2334S033



GM9234S033

Lo-Cog[®] DC Servo Gearmotor



Assembly Data	Symbol	Units	Value
Reference Voltage	E	V	24
No-Load Speed	S_{NL}	rpm (rad/s)	21 (2.2)
Continuous Torque (Max.) ¹	T_C	oz-in (N-m)	800 (3.5E+00)
Peak Torque (Stall) ²	T_{PK}	oz-in (N-m)	4199 (3.0E+01)
Weight	W_U	oz (g)	20.3 (577)
Motor Data			
Torque Constant	K_t	oz-in/A (N-m/A)	6.50 (4.59E-02)
Back-EMF Constant	K_b	V/krpm (V/rad/s)	4.81 (4.59E-02)
Resistance	R_R	Ω	4.82
Inductance	L	mH	3.97
No-Load Current	I_{NL}	A	0.13
Peak Current (Stall) ²	I_P	A	5.19
Motor Constant	K_M	oz-in/VW (N-m/VW)	3.01 (2.13E-02)
Friction Torque	T_f	oz-in (N-m)	0.80 (4.2E-03)
Rotor Inertia	J_M	oz-in ² (kg-m ²)	5.9E-04 (4.2E-08)
Electrical Time Constant	τ_e	ms	0.85
Mechanical Time Constant	τ_M	ms	9.3
Viscous Damping	D	oz-in/krpm (N-m/s)	0.039 (2.8E-08)
Damping Constant	K_D	oz-in/krpm (N-m/s)	6.7 (4.5E-04)
Maximum Winding Temperature	θ_{MAX}	$^{\circ}F$ ($^{\circ}C$)	311 (155)
Thermal Impedance	R_{TH}	$^{\circ}F/watt$ ($^{\circ}C/watt$)	82.8 (17.1)
Thermal Time Constant	τ_{TH}	min	12.0
Gearbox Data			
Reduction Ratio			218.4
Efficiency ³			0.73
Maximum Allowable Torque		oz-in (N-m)	800 (3.53)
Encoder Data			
Channels			3
Resolution		CPR	50.0

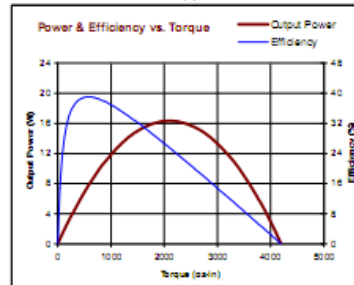
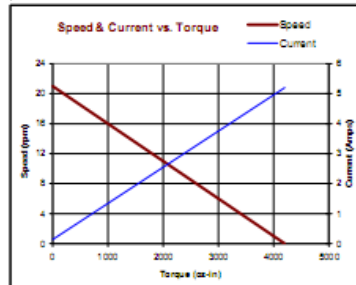
Included Features

- 2-Pole Stator
- Ceramic Magnets
- Heavy-Gauge Steel Housing
- 7-Slot Armature
- Silicon Steel Laminations
- Stainless Steel Shaft
- Copper-Graphite Brushes
- Diamond Turned Commutator
- Motor Ball Bearings
- Output Ball Bearing
- Wide Face Gears

Customization Options

- Alternate Winding
- Sleeve or Ball Bearings
- Modified Output Shaft
- Custom Cable Assembly
- Special Brushes
- EMI/RFI Suppression
- Alternate Gear Material
- Special Lubricant
- Optional Encoder
- Fail-Safe Brake

1 - Specified max. winding temperature at 25°C ambient without heat sink. 2 - Theoretical values supplied for reference only.
3 - Effective gearbox efficiency for this unit improved by use of ball bearings.



All values are nominal. Specifications subject to change without notice. Graphs are shown for reference only. © 2001 Pittman.

PITTMAN, 343 Goddard Drive, Harleyville, PA 19438, Phone: 877-PITTMAN, Fax: 215-254-1338, E-mail: info@pittman.com, Web Site: www.pittman.com

UNCONTROLLED

REVISIONS

LTR	DESCRIPTION	DATE	APPR
A	PRODUCTION RELEASE	10-24-94	JRM
B	.330 WAS .313		

OPTIONAL WIRE PACKAGES AVAILABLE SEE WORK ORDER FOR SPECIFIC PART NUMBERS, SEE DIAGRAM FOR FUNCTIONS

MODEL No.	"A" MAX	GEAR RATIO	SHAFT ROTATION
GM92X6	4.289	728/1419:1	CW
GM92X5	3.939	218.4/426:1	CCW
GM92X4	3.639	65.5/127.7:1	CW
GM92X3	3.439	19.7/38.3:1	CCW
GM92X2	3.064	5.9/11.5:1	CW

FILE	DATE
150V413	10/18/94

TITLE: OUTLINE & MOUNTING DIMENSIONS
GM9200 SERIES MOTOR WITH H.P. ENCODER MODULE 9100

DWG. NO. **150-413** REV. **B**

SCALE: NONE SHEET 1 OF 1

NOTES:

- OUTPUT SHAFT ROTATION IS PER CHART, FIGURED WHILE VIEWING MOUNTING END WITH (+) POSITIVE VOLTAGE APPLIED TO RED MOTOR WIRE.
- ENDPLAY .020 MAX. ON OUTPUT SHAFT, .015 MAX. ON MOTOR SHAFT.
- STANDARD LEADS ARE 22 AWG. (7X30), PVC INSULATION, UL STYLE 1569/1007 ONE LEAD IS RED, ONE BLACK.
- STANDARD LEAD LENGTH IS 18 ±1/2".
- ENCLOSED IS A HEDS-91X0 OPTICAL ENCODER MODULE. INDEX PULSE OPTIONAL. SEE DATA SHEET FOR LINE COUNT.
- MAX TORQUE GEARBOX IS TO 1.75 oz.in. STANDARD GEARING, 300 oz.in. HIGH-TORQUE GEARING, AND 500 oz.in. WIDE FACE GEARING.
- MOLEX CENTER CRIMP TERMINAL HOUSING 2695 SERIES, WILL ACCEPT MOLEX MATING TERMINALS 2759, PITTMAN P/N: 81-54-1.
- OPTIONAL REAR SHAFT EXTENSION AVAILABLE (.1564/.1561 DIA.).

PIN CONNECTION
1 GND
2 N.C./INDEX
3 CH. A
4 VCC
5 CH. B

2. MOTOR POLOLU 25Dx65L



this 2.71" × 1.45" × 1.45" gearmotor is a powerful 12V motor with a **172:1** metal gearbox and an integrated quadrature encoder that provides a resolution of 64 counts per revolution of the motor shaft, which corresponds to **8384 counts per revolution** of the gearbox's output shaft.

These units have a 0.61"-long, 6 mm-diameter D-shaped output shaft. Key specs at **12 V**: 30 RPM and 300 mA free-run, 170 oz-in (12 kg-cm) and 5 A stall. This motor will run at 6 V but is intended for operation at 12 V. Please note that these gearmotors have output shafts with a diameter of 6 mm.

Gearmotor Dimensions

The face plate has six mounting holes evenly spaced around the outer edge threaded for M3 screws. These mounting holes form a regular hexagon and the centers of neighboring holes are 15.5 mm apart. You can use our custom 25D mm metal gearmotor bracket (shown in the left picture below) to mount the gearmotor to your project via these mounting holes and the screws that come with the bracket.

Using the Encoder

A two-channel Hall effect encoder is used to sense the rotation of a magnetic disk on a rear protrusion of the motor shaft.

The quadrature encoder provides a resolution of 64 counts per revolution of the motor shaft. To compute the counts per revolution of the gearbox output, multiply the gear ratio by 64. The motor/encoder has six color-coded, 11" (28 cm) leads:

Color	Function
Black	motor power
Red	motor power
Blue	Hall sensor Vcc (3.5 – 20 V)

3. CILINDRO NEUMATICO PREMAIR 07 (Bore 3/4"x3")

Pneumatic Cylinders Premair™ Composite

Ordering / Most Popular Models

Ordering code structure: **C** **D** [] [] - **S** [] [] - [] [] []

Composite
Disposable

Type
 D : Double Acting (Max. stroke length, See page 28 & 29)
 S : Spring Extend (Max. stroke length, See page 32 & 33)
 R : Spring Retract (Max. stroke length, See page 30 & 31)

Bore
 04 : 7/16" 14 : 1-1/4"
 06 : 9/16" 15 : 1-1/2"
 07 : 3/4" 20 : 2"
 11 : 1-1/16"

Mount
 N : Nose
 P : Pivot
 D : Double Rod End
 H : Block (see available or all bore sizes)

Seals
 B : Buna-N
 V : Viton
 G : Buna-N + Magnetic
 H : Viton + Magnetic

Rod
 S : 303 Stainless Steel (Standard)

Stroke (Inches)

Tens	Ones	Fractions
0-9	0-9	0 = 0 in.
		1 = 1/8 in.
		2 = 1/4 in.
		3 = 3/8 in.
		4 = 1/2 in.
		5 = 5/8 in.
		6 = 3/4 in.
		7 = 7/8 in.

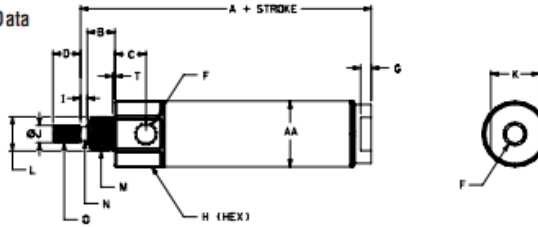
NOTE: Refer to "Type" heading to relevant pages regarding maximum stroke lengths.

Most Popular (Standard) Models

0004-SBH-004-K	0007-SBH-024-K	0011-SBH-024-K	0014-SBN-024-K	0015-SBP-040-K	0007-SBP-004-K
0004-SBH-010-K	0007-SBH-030-K	0011-SBH-030-K	0014-SBN-030-K	0015-SBP-060-K	0007-SBP-010-K
0004-SBH-014-K	0007-SBH-040-K	0011-SBH-040-K	0014-SBN-040-K	0015-SBP-080-K	0007-SBP-014-K
0004-SBH-020-K	0007-SBH-050-K	0011-SBH-050-K	0014-SBN-050-K	0020-SBN-010-K	0007-SBP-020-K
0004-SBH-024-K	0007-SBH-060-K	0011-SBH-060-K	0014-SBN-060-K	0020-SBN-014-K	0011-SBN-004-K
0004-SBH-030-K	0007-SBN-004-K	0011-SBN-004-K	0014-SBN-070-K	0020-SBN-020-K	0011-SBN-010-K
0004-SBH-040-K	0007-SBN-010-K	0011-SBN-010-K	0014-SBN-080-K	0020-SBN-024-K	0011-SBN-014-K
0004-SBN-004-K	0007-SBN-014-K	0011-SBN-014-K	0014-SBN-090-K	0020-SBN-030-K	0011-SBN-020-K
0004-SBN-010-K	0007-SBN-020-K	0011-SBN-020-K	0014-SBN-100-K	0020-SBN-040-K	0014-SBN-004-K
0004-SBN-014-K	0007-SBN-024-K	0011-SBN-024-K	0014-SBN-110-K	0020-SBN-060-K	0014-SBN-010-K
0004-SBN-020-K	0007-SBN-030-K	0011-SBN-030-K	0014-SBN-120-K	0020-SBN-080-K	0014-SBN-014-K
0004-SBN-024-K	0007-SBN-040-K	0011-SBN-040-K	0014-SBP-004-K	0020-SBP-010-K	0014-SBN-020-K

Pneumatic Cylinders
Premair™ Composite

Dimensional Data



DOUBLE ACTING / NOSE MOUNT (Maximum Stroke 12")

A	Bore						J	Bore							
	7/16"(04)	9/16"(06)	3/4"(07)	1-1/16"(11)	1-1/4"(12)	1-1/2"(15)		2"(20)	7/16"(04)	9/16"(06)	3/4"(07)	1-1/16"(11)	1-1/4"(14)	1-1/2"(15)	2"(20)
A	213	226	297	3.13	4	3.69	4.69	J	0.19	0.19	0.25	0.31	0.44	0.44	0.62
B	0.35	0.35	0.5	0.5	0.52	0.53	0.51	K	0.35	0.50	0.62	0.68	0.88	0.82	1.25
C	0.34	0.34	0.47	0.55	0.75	0.74	0.74	L	433/437	433/437	521/524	521/524	748/749	748/769	1.372/1.375
D	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.75	0.88	M	7/16-20	7/16-20	5/8-18	5/8-18	3/4-16	1-12 UNF-2A	1-1/4-12 UNF-2A
F	#10-32	#10-32	1/8 NPT	1/8 NPT	1/8 NPT	1/8 NPT	1/4 NPT	N	-	-	-	0.25	0.38	0.38	0.50
G	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.25	0.31	O	#10-32	#10-32	1/4-28	5/16-24	7/16-20	7/16-20 UNF-2A	1/2-20 UNF-2A
H	0.55	0.69	0.88	1.06	1.25	-	-	T	0.05	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.13
I	-	-	-	0.13	0.25	0.25	0.31	AA	0.55	0.69	0.88	1.19	1.38	1.69	2.23

ANEXO B. HOJA DE ESPECIFICACIONES DE LA TARJETA DE ADQUISICION.



Ventas
Colombia
01 8000 813880
orders@ni.com

NI USB-6216

DAQ MIO de la Serie M Aislado de 16 Bits, 400 kS/s, Energiza

- 16 entradas analógicas (16 bits, 400 kS/s)
- 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s), 32 E/S digitales, dos contadores de 32 bits
- Aislamiento CAT I de 60 V para seguridad y precisión mejoradas; conectividad de señal integrada
- NI signal streaming para transferencia de datos bidireccional a alta velocidad en USB; la versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW, ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET y Visual Basic 6.0
- El software de NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos



Información General

El módulo USB-6216 de National Instruments es un módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la Serie M energizado por bus USB y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de 400 kS/s, dos salidas analógicas, 32 líneas de E/S digital, cuatro rangos de entrada programable (± 0.2 V a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores temporizadores. El módulo ofrece aislamiento CAT I de 60 V para seguridad y precisión mejoradas.

El módulo NI USB-6216 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje mientras que la conectividad directa con terminal de tomillo mantiene los precios bajos y simplifica las conexiones de señal. Este producto no requiere potencia externa.

El NI USB-6216 también cuenta con la nueva tecnología NI Signal Streaming la cual permite transferencia de datos bidireccional a alta velocidad parecida a DMA a través del bus USB. Para mayor información sobre NI Signal Streaming, consulte la sección de Recursos.

Cada módulo cuenta con una versión OEM. Consulte la sección de recursos o use el menú de la izquierda para obtener información técnica y precios.

Software Controlador

El software de servicios de medida y controlador NI-DAQmx a dan interfaces de programación y configuración fáciles de usar con características como el DAQ Assistant para ayudar a reducir el tiempo de desarrollo. Busque la información en sección de Recursos para aprender más sobre software o descargar un controlador. Los dispositivos de la Serie M no son compatibles con el controlador Traditional NI-DAQ (Legado).

Software de Aplicación


Cada tarjeta de adquisición de datos de la Serie M incluye una copia del software de registro de datos NI LabVIEW SignalExpress LE así usted puede adquirir, analizar y presentar datos rápidamente en programación. Además de LabVIEW SignalExpress, los dispositivos de adquisición de datos de la Serie M son compatibles con las siguientes versiones (o posteriores) de software de aplicación - LabVIEW 7.1, LabWindows™/CVI 7.x o Measurement Studio 7.x. Los dispositivos de adquisición de datos de la Serie M también son compatibles con Visual Studio .NET, C/C++ y Visual Basic 6. La marca LabWindows se usa bajo una licencia de Microsoft Corporation.

Especificaciones

Documentos con Especificaciones

- Especificaciones
- Hoja de Especificaciones

ANEXO C. HOJA DE DATOS DEL CONTROLADOR PUENTE H Y LA TARJETA DE POTENCIA



LMD18200

February 7, 2011

3A, 55V H-Bridge

General Description

The LMD18200 is a 3A H-Bridge designed for motion control applications. The device is built using a multi-technology process which combines bipolar and CMOS control circuitry with DMOS power devices on the same monolithic structure. Ideal for driving DC and stepper motors, the LMD18200 accommodates peak output currents up to 6A. An innovative circuit which facilitates low-loss sensing of the output current has been implemented.

Features

- Delivers up to 3A continuous output
- Operates at supply voltages up to 55V
- Low $R_{DS(ON)}$ typically 0.33 Ω per switch at 3A
- TTL and CMOS compatible inputs

- No "shoot-through" current
- Thermal warning flag output at 145°C
- Thermal shutdown (outputs off) at 170°C
- Internal clamp diodes
- Shorted load protection
- Internal charge pump with external bootstrap capability

Applications

- DC and stepper motor drives
- Position and velocity servomechanisms
- Factory automation robots
- Numerically controlled machinery
- Computer printers and plotters

Functional Diagram

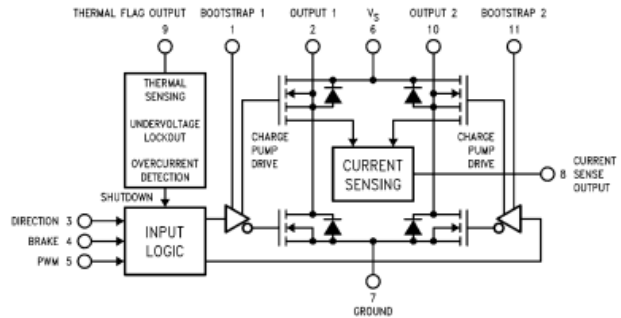
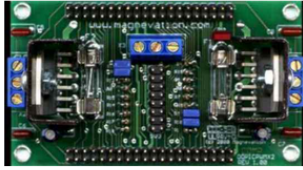


FIGURE 1. Functional Block Diagram of LMD18200

LMD18200 3A, 55V H-Bridge

Description: Assembled and tested PWM Driver board for the OOPic.



Power supply requirements - 12 to 55 volts DC 0- 3 amps per channel.

Dual independent PWM channels, each channel is independently powered and fused with speed, direction, brakes, thermal flag and analog outp
Based on Nation Semiconductors LMD18200T H-bridge Driver IC's.

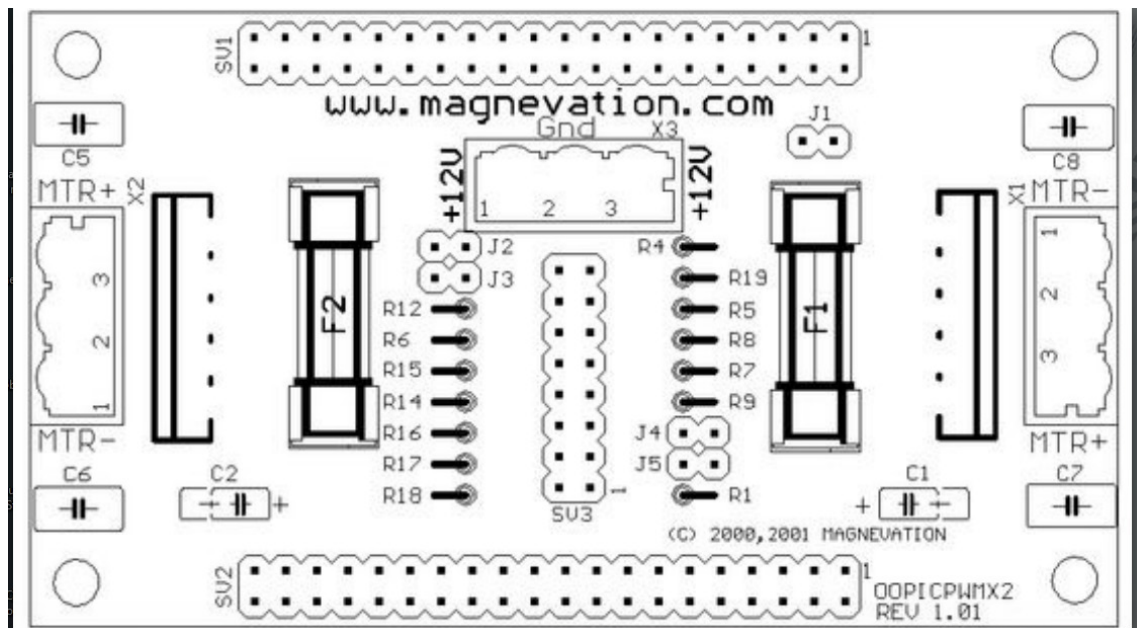
Data Pass - Thru design allow other accessories to be connected to the OOPic.

Break out port allows access to all 4 analog input channels on the OOPic as well as several important digital I/O channels.

Break Out Port also doubles as a Joystick input port utilizing standard inexpensive joysticks and back plane headers used by Personal Computer

Small size, same as the OOPic 3.5" X 2.0"

Circuit Board is manufactured and assembled in the U.S.A. and is of the highest quality. These boards are double sided, tined and plated thru 1
sides, and parts legend on the top side. The component holes are slightly larger than most other cards on the market to allow easy changes and
These Assembled boards have been electrical tested and visually inspected prior to shipping.



ANEXO D. ESPECIFICACIONES DE LA FUENTE DE POTENCIA

Model XP-581



SPECIFICATIONS

INPUT Input Voltage 120VAC 60Hz
 Current Protection 2A Fuse

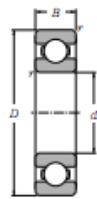
OUTPUT

Output Voltage	Fixed +5V	Fixed +12V	Fixed 12V	Variable 2.5 - 20V
Output Current	3A	1A	1A	1A @ 20V 2A @ 15V 1.5A @ 5V
Load Regulation	.1V	.1V	.1V	.1V
Line Regulation	.1V	.1V	.1V	.1V
Ripple rms	.01V	.01V	.01V	.01V
Current Protection	Foldback	Thermal	Thermal	Foldback

ANEXO E. TABLA DE SELECCIÓN DEL RODAMIENTO.

ϕ Deep Groove Ball Bearings

NTN



Open type



Shielded type (ZZ)



Non-contact sealed type (LLB, LLF)



Low torque sealed type (LLH)



Contact sealed type (LLU)

d 10a 20mm

d	Boundary dimensions				Basic load ratings				Limiting speeds				Bearing numbers				
	D	B	r	r _{min}	C _d	C _s	C _d	C _s	gross open type ZZ LLB	oil open type Z LB	LLH	LLU	open type	sealed type	non-contact type	low torque type	contact type
10	15	3	0.1	Ⓟ	0.855	0.435	87	44	10,000	12,000	Ⓟ	Ⓟ	6700	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ
	19	5	0.3	Ⓟ	1.83	0.925	187	94	32,000	38,000	Ⓟ	24,000	6800	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	22	8	0.3	0.3	2.7	1.27	275	129	30,000	38,000	Ⓟ	21,000	6900	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	26	8	0.3	Ⓟ	4.55	1.98	485	200	29,000	34,000	25,000	21,000	6000	ZZ	LLB	LLH	LLU
	30	9	0.6	0.5	5.10	2.39	520	244	25,000	30,000	21,000	18,000	6200	ZZ	LLB	LLH	LLU
	35	11	0.6	0.5	8.20	3.50	835	355	29,000	27,000	20,000	16,000	6300	ZZ	LLB	LLH	LLU
12	18	4	0.2	Ⓟ	0.930	0.530	95	54	8,300	9,500	Ⓟ	Ⓟ	6701	Ⓟ	LLF	Ⓟ	Ⓟ
	21	5	0.3	Ⓟ	1.92	1.04	195	108	29,000	35,000	Ⓟ	20,000	6801	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	24	6	0.3	0.3	2.89	1.48	295	149	27,000	32,000	Ⓟ	19,000	6901	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	28	7	0.3	Ⓟ	5.10	2.39	520	244	28,000	30,000	Ⓟ	Ⓟ	16001	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ
	28	8	0.3	Ⓟ	5.10	2.39	520	244	28,000	30,000	21,000	18,000	6001	ZZ	LLB	LLH	LLU
	32	10	0.6	0.5	8.10	2.75	820	280	22,000	28,000	20,000	16,000	6201	ZZ	LLB	LLH	LLU
15	21	4	0.2	Ⓟ	0.940	0.585	98	59	8,600	7,600	Ⓟ	Ⓟ	6702	Ⓟ	LLF	Ⓟ	Ⓟ
	24	5	0.3	Ⓟ	2.08	1.26	212	128	29,000	31,000	Ⓟ	17,000	6802	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	28	7	0.3	0.3	3.65	2.00	375	204	24,000	29,000	Ⓟ	16,000	6902	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	32	8	0.3	Ⓟ	5.60	2.83	570	289	22,000	26,000	Ⓟ	Ⓟ	16002	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ
	32	9	0.3	0.3	5.60	2.83	570	289	22,000	26,000	18,000	15,000	6002	ZZ	LLB	LLH	LLU
	35	11	0.6	0.5	7.75	3.80	790	385	19,000	23,000	18,000	15,000	6202	ZZ	LLB	LLH	LLU
17	23	4	0.2	Ⓟ	1.00	0.680	102	67	5,000	6,700	Ⓟ	Ⓟ	6703	Ⓟ	LLF	Ⓟ	Ⓟ
	26	5	0.3	Ⓟ	2.23	1.48	227	149	24,000	28,000	Ⓟ	15,000	6803	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	30	7	0.3	0.3	4.85	2.58	475	283	22,000	28,000	Ⓟ	14,000	6903	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	35	8	0.3	Ⓟ	8.80	3.35	895	345	20,000	24,000	Ⓟ	Ⓟ	16003	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ
	35	10	0.3	0.3	8.80	3.35	895	345	20,000	24,000	16,000	14,000	6003	ZZ	LLB	LLH	LLU
	40	12	0.6	0.5	9.80	4.80	980	485	18,000	21,000	15,000	12,000	6203	ZZ	LLB	LLH	LLU
20	47	14	1	0.5	13.5	6.55	1,380	685	16,000	19,000	14,000	11,000	6303	ZZ	LLB	LLH	LLU
	82	17	1.1	Ⓟ	22.7	10.8	2,320	1,100	14,000	16,000	Ⓟ	Ⓟ	6403	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ
	27	4	0.2	Ⓟ	1.04	0.730	108	74	5,000	5,700	Ⓟ	Ⓟ	6704	Ⓟ	LLF	Ⓟ	Ⓟ
	32	7	0.3	0.3	4.00	2.47	410	252	21,000	25,000	Ⓟ	13,000	6804	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	37	9	0.3	0.3	6.40	3.70	650	375	19,000	23,000	Ⓟ	12,000	6904	ZZ	LLB	Ⓟ	LLU
	42	8	0.3	Ⓟ	7.90	4.50	810	455	18,000	21,000	Ⓟ	Ⓟ	16004	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ	Ⓟ
20	42	12	0.6	0.5	9.40	5.05	955	515	18,000	21,000	13,000	11,000	6004	ZZ	LLB	LLH	LLU
	47	14	1	0.5	12.8	6.85	1,310	680	16,000	18,000	12,000	10,000	6204	ZZ	LLB	LLH	LLU
	52	15	1.1	0.5	15.9	7.90	1,620	805	14,000	17,000	12,000	10,000	6304	ZZ	LLB	LLH	LLU

Ⓟ Smallest allowable dimension for chamfer dimension r.

ANEXO F. CARACTERISTICAS DE LA ELECTROVALVULA NEUMATICA

Válvula solenoide (5/2、5/3 vías)

Serie 4V200

AIRTAC



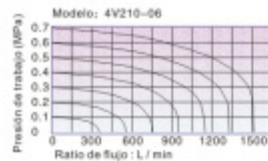
■ Símbolo



■ Característica del producto

1. Forma de piloto: piloto interno o externo es disponible;
2. La Estructura en modo de la columna deslizante: buena estanqueidad y reacción sensible;
3. Las válvulas solenoides de tres posiciones tienen tres tipos de la función central para su elección;
4. Las válvulas solenoides de doble controles tienen la función de memoria;
5. El agujero interior adopta la tecnología de procesamiento especial que tiene un poco fricción de desgaste, presión baja de arranque y larga vida útil;
6. No hace falta a agregar el petróleo de lubricación;
7. Es disponible a formar el grupo intergrado de válvula con la base para ahorrar el espacio de instalación;
8. Los dispositivos manuales afiliados están equipados para facilitar la instalación y la depuración;
9. Varios grados de voltaje estándar son opcionales.

■ Diagrama de flujo



■ Especificación

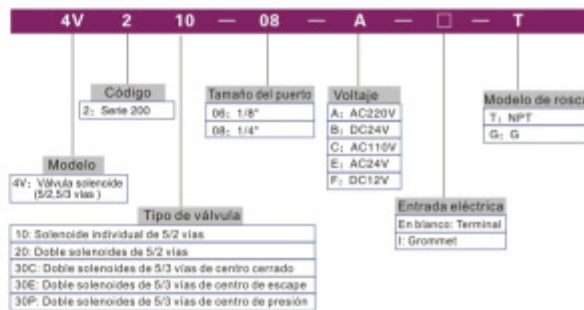
Modelo	4V210-06 4V220-06	4V230C-06 4V230E-06 4V230P-06	4V210-08 4V220-08	4V230C-08 4V230E-08 4V230P-08
Medio	Aire (que se filtra por el elemento 40µm de filtro)			
Tipo de acción	Piloto			
Tamaño del puerto (1)	Entrada=Salida=Escape=1/8"		Entrada=Salida=1/4" Escape=1/8"	
Área efectiva de la sección transversal	14.0mm ² (Cv=0.78)	12.0mm ² (Cv=0.67)	16.0mm ² (Cv=0.89)	12.0mm ² (Cv=0.67)
Tipo de válvula	5/2 vías	5/3 vías	5/2 vías	5/3 vías
Presión de trabajo	0.15-0.8MPa(21-114Psi)			
Presión de prueba	1.5MPa(215Psi)			
Temperatura (°C)	-20-70			
Material del cuerpo	Aleación de aluminio			
Lubricación (2)	No requiere lubricación			
Max. Frecuencia (3)	5 ciclos / seg	3 ciclos / seg	5 ciclos / seg	3 ciclos / seg
Peso	4V210-06 220g 4V220-06 320g	360g	4V210-08 220g 4V220-08 320g	360g

- (1) Las roscas NPT y G están disponibles.
 (2) No puede parar durante agrega aceite. Los lubricantes como ISO VG32 o equivalente son recomendados.
 (3) La frecuencia máxima de actuación está en el estado sin carga.

■ Especificación de bobina

Artículo	Especificación
Voltaje estándar	AC220V, AC110V, AC24V, DC24V, DC12V
Rango de voltaje	AC: ±15% DC: ±10%
Consumo de alimentación	AC: 3.5VA DC: 3.0W
Protección	IP65 (DIN40050)
Clase térmica	Clase B
Entrada eléctrica	Terminal, Grommet
Tiempo de activación	0.05 seg y por debajo

■ Código de ordenamiento



Por favor, consulte a PI-34 para la especificación del colector y la forma de ordenamiento.

ANEXO G. PLANO DE CONEXIONES ELECTRÓNICAS

