



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco**

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

MANUFACTURA DE UN BRAZO ROBÓTICO SCARA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANUFACTURA

P R E S E N T A

ING. VÍCTOR HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

DIRECTORES:

DR. JOSÉ DE JESÚS RUBIO AVILA

DR. JUAN MANUEL SANDOVAL PINEDA



MÉXICO, D. F. 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 1600 horas del día 31 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME UA para examinar la tesis titulada:

MANUFACTURA DE UN BRAZO ROBÓTICO SCARA

Presentada por el alumno:

Hernández Hernández
Apellido paterno Apellido materno
Nombre(s)

Víctor

Con registro:

B	0	9	1	5	8	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: Maestría en Ingeniería de Manufactura

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Rubio Avila José de Jesús
Dr. José de Jesús Rubio Avila

Juan Manuel Sandoval Pineda
Dr. Juan Manuel Sandoval Pineda

Jaime Pacheco Martínez
Dr. Jaime Pacheco Martínez

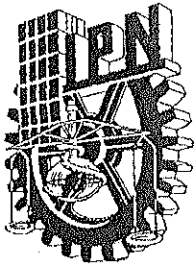
Ricardo Gustavo Rodríguez Cañizo
Dr. Ricardo Gustavo Rodríguez Cañizo

Luis Armando Flores Herrera
Dr. Luis Armando Flores Herrera

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Jaime Pacheco Martínez
Dr. Jaime Pacheco Martínez





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F. el día 01 del mes de Junio del año 2011, el que suscribe Víctor Hernández Hernández alumno del Programa Maestría en Ingeniería de Manufactura con número de registro B091581, adscrito a SEPI-ESIME-UA, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. José de Jesús Rubio Ávila y el Dr. Juan Manuel Sandoval Pineda y cede los derechos del trabajo intitulado "Manufactura de un brazo robótico SCARA", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección jrubioa@ipn.mx o vhernandezh07@hotmail.com; Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Víctor Hernández Hernández

RESUMEN

Esta tesis presenta una investigación en el diseño mecánico, modelado y control de un brazo robótico tipo SCARA de tres grados de libertad para ser empleado en la aplicación de soldadura TIG sobre componentes metálicos, y algunas consideraciones sobre su proceso de fabricación. En una primera etapa, se realizó la revisión de la bibliografía sobre la historia de robots tipo SCARA. Esta revisión se realizó con el objetivo de identificar y comprender los principios de funcionamiento y aplicación de manipuladores robóticos en diferentes procesos de ensamble y manufactura.

Los conceptos teóricos y la solución analítica de la cinemática directa e inversa fueron determinados a partir del método Newton Euler con la implantación de un procedimiento novedoso que facilita los cálculos de esta parte del desarrollo.

El sistema de CAD, SolidWorks fue la plataforma empleada para el diseño mecánico del prototipo. Mediante este software se calcularon los parámetros estáticos, dinámicos y de masa empleados en el diseño mecánico, con la finalidad de facilitar los cálculos de motores.

A partir del diseño de detalle, se llevó a cabo la materialización del prototipo propuesto a fin de evaluar llevar a cabo las pruebas de funcionamiento correspondientes tanto en la parte mecánica como en la de circuito electrónico.

Por último, los resultados obtenidos mediante el modelado y la simulación son expuestos y discutidos a fin de validar el análisis.

ABSTRACT

This thesis presents an investigation into the mechanical design, modeling and control of a SCARA robotic arm with three degrees of freedom to be used in the TIG welding application on metal components, and some considerations about its manufacturing process. In a first stage, we performed a review of the literature on the history of SCARA robots. This review was undertaken in order to identify and understand the operating principles and application of robotic manipulators in various assembly processes and manufacturing.

The CAD system, SolidWorks was the platform used for the mechanical design of the prototype. With this software parameters were calculated static, dynamic and ground employees in mechanical design.

The theoretical concepts and analytical solution of the direct and inverse kinematics were determined from Newton Euler method with the introduction of a new procedure that facilitates the calculation of this part of development.

Finally, the results obtained by modeling and simulation are presented and discussed to validate the analysis

OBJETIVOS**Objetivo General**

- Diseñar un sistema robótico que permita realizar operaciones de soldadura con altos estándares de calidad en tiempos reducidos a los actuales agilizando el proceso de manufactura de componentes.

Para lograr el objetivo general se proponen los siguientes objetivos particulares:

Objetivos Particulares.

- Obtener el modelo matemático del sistema.
- Simular el modelo matemático obtenido.
- Desarrollar el sistema de control.
- Diseñar el sistema mecánico.
- Construcción de un prototipo.
- Pruebas de funcionamiento.
- Publicación de resultados.

JUSTIFICACIÓN

La fabricación de armas exige mejorar e innovar de manera constante sus procesos de fabricación con la finalidad de satisfacer las necesidades de sus clientes ofreciéndoles cada vez productos innovadores y de mejor calidad. Para lograr lo anterior, es necesario la optimización de procesos, adquisición de maquinaria y equipo moderno así como la capacitación constante de su capital humano.

Uno de los procesos de ensamble más importantes que se opera en la Fábrica de Armas es el proceso de Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) o soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) y que también es conocida como soldadura Heliarc. En este proceso se usa un electrodo no consumible de tungsteno sólido, el electrodo, el arco y el área al rededor de la soldadura fundida son protegidas de la atmósfera por un escudo de gas inerte, si algún metal de aporte es necesario es agregado a la soldadura desde el frente del borde de la soldadura que se va formando.

Una de las principales ventajas del proceso TIG es la alta calidad de soldadura que se puede conseguir en una amplia gama de metales o aleaciones. Otra gran ventaja, es que el metal de aporte es añadido independientemente de la corriente del arco eléctrico. Otra ventaja, es que es un proceso de soldadura altamente limpio, sin escoria, sin salpicaduras y de fácil limpieza.

La principal desventaja del TIG, es que el soldador necesita coordinar de forma precisa los movimientos de la antorcha TIG en una mano, con la otra mano añadir el material de aporte (varilla) y con el pie, controlar la corriente de soldadura con un pedal de pie. El soldador TIG,

también, necesita tener conocimientos de los diversos aspectos involucrados de la fuente de soldar TIG. Además, tener conocimientos de la preparación del electrodo de tungsteno, la intensidad de corriente seleccionada, la curva de ascenso del arco, la curva de descenso del arco, la rata de pulsos, la intensidad del pulso, la corriente base, el uso de la alta frecuencia y el apropiado sistema de aterramiento del sistema eléctrico.

Y es precisamente esta desventaja la que se pretende subsanar con el empleo de un dispositivo que permita automatizar y estandarizar dicho proceso de soldadura.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
OBJETIVOS	iii
JUSTIFICACIÓN	iv
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
SIMBOLOGÍA	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO 1.- Estado del arte	1
1.1.- Generalidades	2
1.2.- Definición de robot	2
1.3.- Modelado matemático de robots	3
1.4.- Clasificación de los robots manipuladores	5
1.5.- Sistema de control	7
1.5.1. Control en Lazo Abierto	9
1.5.2. Control en lazo Cerrado	10
1.6.- Robot SCARA	10
1.7.- Planteamiento del problema	12
1.8.- Sumario	13
Referencias	14
CAPÍTULO 2.- Modelo dinámico	16
2.1.- Introducción	17
2.2.- Cinemática	17
2.2.1.- Cadena cinemática	17
2.2.2.- Cinemática directa	18
2.2.3.- Cinemática inversa	21
2.2.4.- Matriz Jacobiana	25

Contenido	vii
2.2.5.- Jacobiana inversa	27
2.3.- Dinámica	30
2.3.1.- Formulación Lagrangiana	32
2.4.- Sumario	39
Referencias	41
CAPÍTULO 3.- Diseño mecánico	43
3.1.- Generalidades	44
3.2.- El proceso de diseño	44
3.3.- Diseño conceptual	46
3.3.1.- Identificación de las necesidades del cliente	47
3.3.2.- Generación de especificaciones objetivo	48
3.3.3.- Generación de conceptos	50
3.4.- Modelado CAD	51
3.5.- Definición de materiales	53
3.6.- Análisis de fuerzas	54
3.7.- Sumario	64
Referencias	65
CAPÍTULO 4.- Manufactura del prototipo	67
4.1.- Generalidades	68
4.2.- Modelos 3D	68
4.3.- Prototipos rápidos	69
4.4.- Planeación del prototipo	70
4.5.- Construcción del prototipo (Primera Versión)	72
4.6.- Construcción del prototipo (Segunda Versión)	73
4.7.- Construcción mecánica	74
4.7.1.- Sistema de tracción	75
4.7.2.- Transmisión	77
4.8.- Sumario	78
Referencias	80

CAPÍTULO 5.- Interfaz	81
5.1.- Generalidades	82
5.2.- Microcontroladores	82
5.3.- La interfaz	84
5.4.- Simulación en Proteus	86
5.5.- Interfaz Visual Basic	88
5.6.- Sumario	89
Referencias	90
Conclusiones y discusiones	91
ANEXOS.	94

ÍNDICE DE FIGURAS**CAPÍTULO 1**

Figura 1.1.- Robot ABB IRB6600	3
Figura 1.2.- Representación simbólica de articulaciones	4
Figura 1.3.- Espacio de trabajo del manipulador SCARA.	5
Figura 1.4.- Estructura del manipulador articulado (RRR)	6
Figura 1.5.- Estructura del manipulador esférico (RRP)	7
Figura 1.6.- Estructura del manipulador SCARA (RRP)	7
Figura 1.7.- Estructura del manipulador cilíndrico (RPP)	8
Figura 1.8.- Estructura del manipulador cartesiano (PPP)	8
Figura 1.9.- Manipulador Comercial Tipo SCARA	11

CAPÍTULO 2

Figura 2.1.- Sistema de coordenadas	19
Figura 2.2.- Eslabones 1 y 2	31
Figura 2.3.- Eslabón 3	32
Figura 2.4.- Eslabón 4	32
Figura 2.5.- Vista superior	33

CAPÍTULO 3

Figura 3.1.- Diagrama de la metodología de diseño	45
Figura 3.2.- Diseño preliminar modelado mediante CAD	52
Figura 3.3.- Diseño de detalle manipulador SCARA	53
Figura 3.4.- Esquema general del Robot SCARA	56
Figura 3.5.- Diagrama de Cuerpo Libre eslabón 4	58
Figura 3.6.- Diagrama cinético eslabón 4	58
Figura 3.7.- Diagrama de Cuerpo Libre eslabón 3	60
Figura 3.8.- Diagrama cinético eslabón 3	60
Figura 3.9.- Diagrama de Cuerpo Libre eslabón 2	61
Figura 3.10.- Diagrama cinético eslabón 2	62

Índice de Figuras	x
Figura 3.11.- Diagrama de Cuerpo Libre eslabón 1	63
Figura 3.12.- Diagrama cinético eslabón 1	63
CAPÍTULO 4	
Figura 4.1.- Modelo por computadora en 3D del brazo robótico tipo SCARA	69
Figura 4.2.- Prototipos rápidos	69
Figura 4.3.- Moldes de silicón	70
Figura 4.4.- Base del Brazo (Eslabón 0)	73
Figura 4.5.- Eslabones 2 y 3	73
Figura 4.6.- Eslabón 0	74
Figura 4.7.- Eslabón 1	74
Figura 4.8.- Eslabón 2	75
Figura 4.9.- Eslabón 3	75
Figura 4.10.- Ensamble	75
Figura 4.11.- Motores y engranes empleados en las articulaciones 2, 3 y 4	76
Figura 4.12.- Arreglo de motores en el SCARA	77
Figura 4.13.- Transmisión en el SCARA.	78
CAPÍTULO 5	
Figura 5.1.- Circuito Max232 y conexión PIC-PC mediante un conector DB9	86
Figura 5.2.- Circuito simulado en Proteus	87
Figura 5.2.- Interfaz en Visual Basic	88

ÍNDICE DE TABLAS**CAPÍTULO 1**

Tabla 1.1.- Comparación entre controladores de Lazo Abierto y Lazo Cerrado	10
--	----

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1.- Convención de colores.	19
Tabla 2.2.- Parámetros según convención de D-H.	20
Tabla 2.3.- Parámetros D-H del robot SCARA.	20

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1.- Declaración de la misión para el desarrollo.	46
Tabla 3.2.- Enunciados del cliente y necesidades interpretadas.	47
Tabla 3.3.- Entrada: Componentes separados.	48
Tabla 3.4.- Salida: Componentes unidos.	48
Tabla 3.5.- Tipos de carga.	54
Tabla 3.6.- Datos del eslabón 4.	57
Tabla 3.7.- Datos del eslabón 3.	59
Tabla 3.8.- Datos del eslabón 2.	61
Tabla 3.9.- Datos del eslabón 1.	62

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1.- Patrones de planeación del prototipo.	71
Tabla 4.2.- Características del motor con reductor.	76
Tabla 4.3.- Características técnicas de poleas sincrónicas.	77
Tabla 4.4.- Características técnicas de la banda sincrónica.	78

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1.- Nombres y funciones de los pines de un DB9.	85
---	----

SIMBOLOGÍA

1D	Una dimensión.
2D	Dos dimensiones.
3D	Tres dimensiones.
C.N.C.	Computer Numerical Control (Control Numérico Continuo).
CAD	Computer aided design (Diseño asistido por computadora).
CAM	Computer aided manufacturing (Manufactura asistida por computadora).
d	Diámetro.
ε	Deformación.
E	Modulo de elasticidad o de Young.
F	Fuerza.
K	Factor de concentración de esfuerzos.
MEF	Método del Elemento Finito.
mm	Milímetro.
MPa	Mega pascal.
PPP	Prismática-Prismática-Prismática.
RPP	Revolución-Prismática-Prismática.
RRP	Revolución-Revolución-Prismática.
RRR	Revolución-Revolución-Revolución.
ν	Relación de Poisson.
N	Newton.
x	Eje x .
y	Eje y .

INTRODUCCIÓN

La automatización de los procesos industriales a través de los años ha dado lugar a un avance espectacular de la industria. Todo ello ha sido posible gracias a una serie de factores entre los que se encuentran las nuevas tecnologías en el campo mecánico, la introducción de las computadoras y la regulación de sistemas y procesos. La incorporación de las computadoras en la producción, la automatización de los procesos industriales y la robotización han permitido la reducción de costos, aumento de la productividad y la mejora del producto.

En la actualidad, los sistemas automatizados han revolucionado las industrias de producción en serie teniendo como consecuencia que los trabajadores requieran de elementos que les permitan manejar grandes volúmenes de producción para satisfacer las demandas del mercado sin sacrificar la calidad de los productos y así estar en condiciones de ser competitivos. Con esta problemática se han implementado la creación y posterior mente la incorporación de robots industriales. Los robots cumplen con tareas de un alto nivel de complejidad, precisión, rapidez y efectividad.

Un robot industrial es un manipulador reprogramable con funciones múltiples, diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados variables para el desempeño de una gran diversidad de tareas. La mayoría de las industrias automatizadas cuenta con robots manipuladores para asistir o sustituir al operador en trabajos peligrosos, monótonos o de alta complejidad.

Esta investigación está enfocada al diseño y desarrollo de un brazo robótico tipo SCARA de tres grados de libertad con la finalidad de ser destinado al proceso de soldadura TIG, inicialmente ideado para aplicar cordones rectos de soldadura en geometrías relativamente sencillas.

Para lo cual se emplearán técnicas de diseño, modelado,

La solución a estos objetivos se desarrollará en el capitulado de esta tesis, por lo que la secuencia de solución se describe a continuación:

En el Capítulo 1 se resumen los orígenes de los manipuladores robóticos, la forma general en que se clasifican así como una breve descripción del manipulador robótico tipo SCARA.

En el Capítulo 2 se desarrolla el modelo dinámico del manipulador, la mayoría de los manipuladores tipo SCARA emplean cuatro grados de libertad, tres para la posición y uno para la orientación. En el desarrollo de este modelo, el cuarto grado de libertad presenta cierto grado de complejidad debido a la configuración.

En el Capítulo 3 se contempla la metodología implementada para el diseño mecánico de esta investigación la cual está dividida en cuatro fases y esta a su vez en diversas actividades.

El Capítulo 4 detalla la materialización del manipulador a partir del desarrollo de los capítulos 2 y 3.

En el Capítulo 5 se describe la interfaz desarrollada para el control de un circuito de potencia así como su aplicación en el manejo del brazo SCARA.

Posteriormente se resumen las discusiones y conclusiones a las que se llegaron y se proponen para su posterior investigación después de la realización de este trabajo.

Finalmente, se presentan las referencias bibliográficas que sirvieron como soporte de esta investigación y se plantean algunas sugerencias para trabajos futuros.

1.1.- Generalidades

La robótica es un campo relativamente joven de la tecnología moderna que cruza tradicionales los límites de la ingeniería. Comprender la complejidad de los robots y sus aplicaciones requiere un conocimiento de la ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica, sistemas e ingeniería industrial, informática, economía, y las matemáticas. Nuevas disciplinas de la ingeniería, tales como la Ingeniería de Manufactura, han surgido para tratar con la complejidad del campo de la robótica y la automatización industrial.

El término "robot" apareció por primera vez en una revista cómica de Checoslovaquia llamada Rossum's Universal Robots por Karel Capek en 1920 [1.1] [1.2]. Los robots en esta obra, tendían a ser humanoides. De ahí, se vieron en muchas buenas historias de ciencia-ficción, que los involucraban en revueltas contra la autoridad humana, lo cual requiere inteligencia [1.3] [1.4].

Esta idea se modificó hacia la década de los sesenta cuando la demanda de automóviles crecía y los fabricantes buscaban nuevas maneras de aumentar de la eficiencia de la cadena de montaje. Los esfuerzos se centraron para que los robots imitaran los movimientos del operador a distancia. En el año 1961 General Motors instaló el sistema aplicado "telecheries" en su línea de montaje [1.2].

1.2.- Definición de robot

¿Qué es el robot industrial? Se entiende por Robot Industrial a un dispositivo de maniobra destinado a ser utilizado en la industria y dotado de uno o varios brazos, fácilmente programable para cumplir operaciones diversas con varios grados de libertad y destinado a sustituir la actividad física del hombre en las tareas repetitivas, monótonas, desagradables o peligrosas.

El RIA, Robot Institute of America, define al Robot como *Un manipulador multifuncional reprogramable, diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos variables programados para el desempeño de una variedad de labores*. Estas definiciones indudablemente no abarcan todas las posibilidades de

aplicación presente y futuras de los Robots y en opinión de quienes escriben, el Robot es para la producción, lo que el computador es para el procesamiento de datos. Es decir, una nueva y revolucionaria concepción del sistema productivo cuyos alcances recién comienzan a percibirse en los países altamente industrializados [1.3] [1.4].

De manera generalizada se considera que un manipulador robótico es un equipo industrial operado mediante un sistema de control, como el que se aprecia en la **Figura 1.1**.



Figura 1.1 Robot ABB IRB6600.

1.3.- Modelado matemático de robots

El modelado matemático de robots se emplea para representar los aspectos geométricos básicos de la manipulación robótica, los aspectos dinámicos de la manipulación, y los diversos sensores disponibles en los sistemas robóticos. Con el conocimiento de estos modelos matemáticos, se es capaz de desarrollar métodos para la planificación y el control de robots para llevar a cabo tareas específicas. A continuación se describen algunas de las ideas básicas que son comunes en el desarrollo de modelos matemáticos para manipuladores robóticos.

- **Representación simbólica de robots**

Los manipuladores robóticos se componen de eslabones conectados por articulaciones para formar una cadena cinemática. Las articulaciones son generalmente rotatorias (de revolución) o lineales (prismáticos) **Figura 1.2**. Una articulación de revolución es como una bisagra y

permite el giro relativo entre dos eslabones. Una articulación prismática permite un movimiento lineal relativo entre dos eslabones. Se denota a articulaciones de revolución por R y a las articulaciones prismáticas por P .

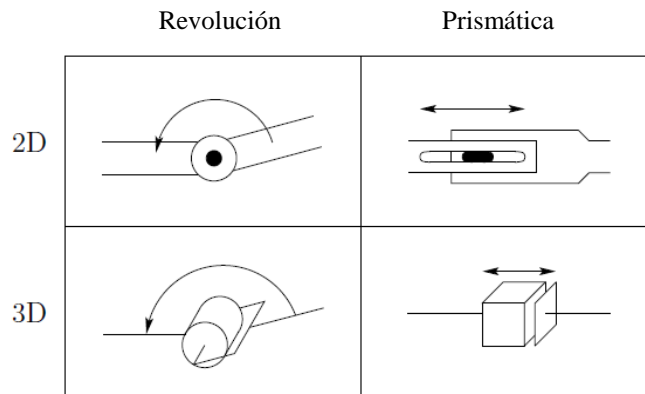


Figura 1.2 Representación simbólica de articulaciones.

Una articulación de revolución se denota por θ y una articulación prismática por d , dichas variables representan el desplazamiento relativo entre los eslabones adyacentes.

- **La configuración del espacio**

Una configuración de un manipulador es una especificación completa de la ubicación de todos los puntos en el manipulador. El conjunto de todas las configuraciones posibles se llama espacio de configuración. Si se conocen los valores de las variables comunes, entonces es fácil inferir la posición de cualquier punto en el manipulador, ya que los vínculos individuales del manipulador se supone rígida, y la base del manipulador se supone fija.

- **El espacio de trabajo**

El espacio de trabajo de un manipulador es el volumen total barrido por el efector final cuando el manipulador ejecuta todos los movimientos posibles. El espacio de trabajo es limitado por la geometría del manipulador, así como por las articulaciones. Por ejemplo, el espacio de trabajo del manipulador SCARA se muestra en la [Figura 1.3](#).

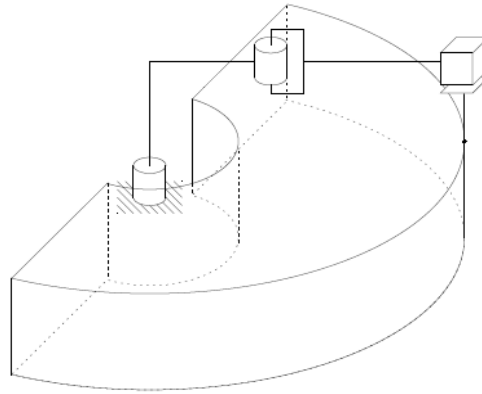


Figura 1.3 Espacio de trabajo del manipulador SCARA.

Los conceptos anteriores pueden ser ampliados consultando diversos textos escritos sobre robótica [1.4 - 1.7].

1.4.- Clasificación de los robots manipuladores

Los manipuladores robóticos se pueden clasificar por varios criterios, tales como su fuente de energía, o el modo en que las articulaciones son accionadas, su geometría o estructura cinemática, su área de aplicación previsto, o su método de control. Tal clasificación es útil sobre todo con el fin de determinar qué robot es el adecuado para una tarea dada. Por ejemplo, un robot hidráulico no sería conveniente para el alimento manipulación o aplicaciones de limpieza en una oficina.

- **Fuente de energía.** Normalmente, los robots son alimentados en forma eléctrica, hidráulica o neumática. Los actuadores hidráulicos no tienen rival en velocidad de respuesta y capacidad de esfuerzo de torsión. Por lo tanto los robots hidráulicos se utilizan principalmente para levantar cargas pesadas. Los inconvenientes de los robots hidráulicos que tienden a fuga de líquido hidráulico, requieren mucho más equipamiento periférico (por ejemplo, bombas, que requieren un mayor mantenimiento), y son ruidosos. Los robots impulsados por motores de corriente continua o servos de CA son cada vez más populares, ya que son más baratos, limpios y silenciosos. Los robots neumáticos son simples y de bajo costo, pero no pueden ser controlados con precisión. Como resultado, los robots neumáticos están limitados en su rango de aplicaciones y popularidad.

- **Área de aplicación.** Los robots son a menudo clasificados por su aplicación en operaciones de ensamble y de procesos de manufactura. Los robots de ensamble tienden a ser pequeños mecánica y eléctricamente en su diseño. Las principales áreas de aplicación de los manipuladores de procesos de manufactura han sido hasta la fecha en operaciones de soldadura, pintura y manipulación de materiales principalmente.
- **Método de control.** Los programas en el controlador del robot pueden ser agrupados de acuerdo al nivel de control que realizan:

Nivel de inteligencia artificial, donde el programa aceptará un comando como "levantar el producto" y descomponerlo dentro de una secuencia de comandos de bajo nivel basados en un modelo estratégico de las tareas.

Nivel de modo de control, donde los movimientos del sistema son modelados, para lo que se incluye la interacción dinámica entre los diferentes mecanismos, trayectorias planeadas, y los puntos de asignación seleccionados.

Niveles de servosistemas, donde los actuadores controlan los parámetros de los mecanismos con el uso de una retroalimentación interna de los datos obtenidos por los sensores, y la ruta es modificada sobre la base de los datos que se obtienen de sensores externos. Todas las detecciones de fallas y mecanismos de corrección son implementados en este nivel.

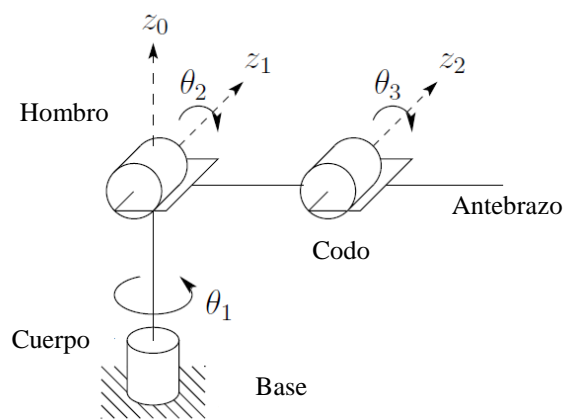


Figura 1.4 Estructura del manipulador articulado (RRR)

- **Geometría.** La mayoría de manipuladores industriales en la actualidad tienen seis o menos grados de libertad. Estos manipuladores se clasifican cinemáticamente en base a las tres primeras articulaciones del brazo, la muñeca se describe por separado. La mayoría de estos manipuladores caen en uno de los cinco tipos geométricos: articulado (RRR), esférico (RRP), SCARA (RRP), cilíndrica (RPP), o cartesiana (PPP). Estas geometrías se muestran en las Figuras 1.4 – 1.8.

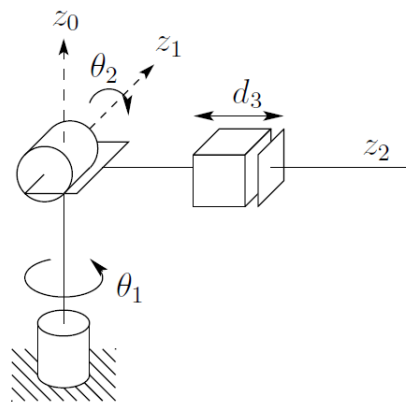


Figura 1.5 Estructura del manipulador esférico (RRP)

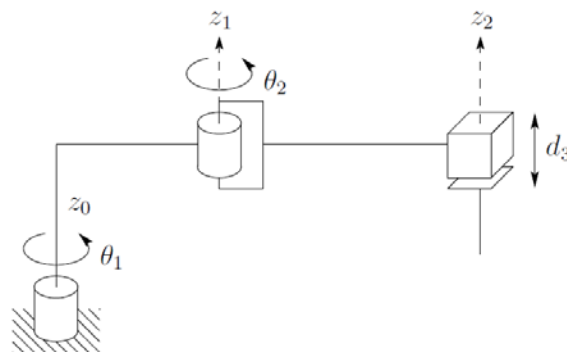


Figura 1.6 Estructura del manipulador SCARA (RRP)

1.5.- Sistema de Control.

Un sistema de control es un grupo de componentes ensamblados de tal manera que permitan regular una energía de entrada para lograr la salida deseada [1.8].

Las principales características de un Sistema de Control típico incluyen la estabilidad, exactitud, velocidad de respuesta y sensibilidad de la salida a cambios en los componentes o en las condiciones ambientales, el grado de importancia entre estas características se determina por el diseñador basado tanto en la naturaleza del sistema como en su aplicación. Frecuentemente estas características son usadas como parámetros de desempeño para evaluar un sistema de control, en otras palabras, estos cuatro parámetros son los criterios para un buen sistema de control.

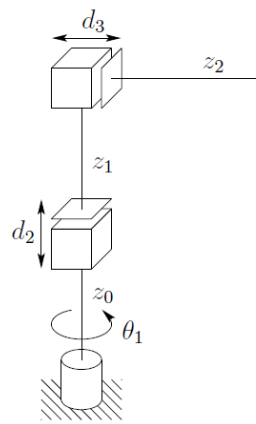


Figura 1.7 Estructura del manipulador cilíndrico (RPP)

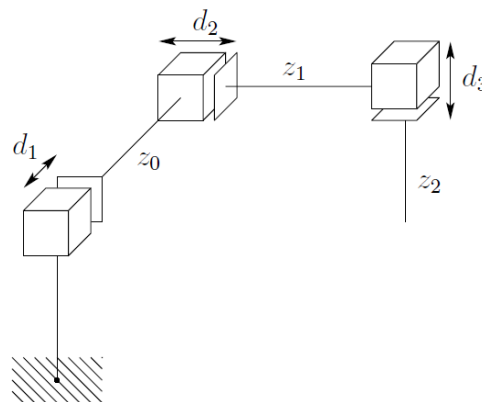


Figura 1.8 Estructura del manipulador cartesiano (PPP)

- *Estabilidad:* Se dice que un sistema es estable si su salida alcanza un cierto valor en un tiempo finito después de haberle aplicado una entrada. Un sistema estable alcanza un valor estable en el tiempo $t = \infty$ después de que la entrada ha cambiado en el tiempo $t = 0$.

- *Exactitud*: Indica la desviación actual de la salida respecto del valor deseado y es una medida relativa del desempeño de un sistema. En la práctica, la estabilidad y la exactitud están estrechamente relacionadas tanto que se puede perder la estabilidad de un sistema tratando de mejorar su exactitud, o se puede mejorar la estabilidad perdiendo exactitud.
- *Velocidad de respuesta*: Es una medida de qué tan rápidamente la salida alcanza el valor de régimen permanente después de haber aplicado una entrada, en el dominio del tiempo, la respuesta de salida de un determinado sistema está compuesta por dos partes, una parte transitoria y una parte de régimen permanente.
- *Sensibilidad*: Es una medida de que tan sensible es la salida a cambios en los valores de los componentes físicos, así como, a cambios en las condiciones ambientales.

1.5.1 Control en Lazo Abierto

Un sistema de control en lazo abierto es aquel en el que el control a la entrada del sistema no es afectado en modo alguno por la salida del sistema. También es necesario, sin embargo que el sistema en sí mismo no varíe en forma alguna la respuesta a la salida del sistema [1.9]. Esta definición indica que los sistemas de lazo abierto son en general relativamente simples y a menudo de bajo costo. Un ejemplo excelente es un tostador eléctrico automático en que el control se proporciona por medio de un temporizador que determina la duración de que el pan se puede tostar. La salida del sistema de tostado es entonces el color o la calidad de lo tostado, el supuesto es que una vez que el temporizador se ha establecido el operador sólo tiene que esperar para examinar el producto final.

Es evidente que la respuesta de un sistema de lazo abierto depende de las características del sistema mismo en términos de la relación entre la entrada del sistema y las señales de salida. Es evidente, pues, que si las características del sistema cambian en algún momento entonces la exactitud de respuesta y capacidad de repetición puede verse seriamente afectada. Sin embargo, en casi todos los casos, el sistema de lazo abierto no presenta problemas, en la mayoría de los casos, de estabilidad.

1.5.2 Control en Lazo Cerrado

En un sistema de lazo cerrado, la entrada del control se ve afectada por la salida del sistema. Mediante el uso de información, la entrada del control del sistema se ve afectada de alguna manera por la salida del mismo sistema, lo que se conoce como retroalimentación y es lo que regula el sistema [1.9]. Tal es el caso, cuando una señal realimentada desde la salida del sistema se compara con una referencia de entrada, con el resultado de esta comparación (la diferencia), se obtiene una compensación aplicada a la actuación del sistema

En la [Tabla 1.1 \[1.10\]](#) se pueden observar las principales diferencias entre un sistema en lazo abierto y uno en lazo cerrado.

Tabla 1.1. Comparación entre controladores de Lazo Abierto y Lazo Cerrado

Control en Lazo Cerrado	Control en Lazo Abierto
Rechaza perturbaciones	No rechaza perturbaciones
Puede hacerse inestable	No tiene problemas de estabilidad
Se puede controlar un sistema inestable	No se puede controlar un sistema inestable
Es adecuado cuando no se conoce bien la planta	Requiere un conocimiento exacto de la planta
Requiere mayor número de componentes	Requiere menor número de componentes
Suele ser caro	Suele ser más económico
No requiere de un operador	Requiere de un operador

1.6.- Robot SCARA.

El robot SCARA fue creado por un grupo de industrias electrónicas japonesas, en colaboración con dos universidades, para insertar los componentes de forma vertical [1.11]. Como se puede observar, esta configuración está formada por dos articulaciones de rotación con respecto a dos ejes paralelos entre sí y perpendiculares al plano de trabajo, y una de desplazamiento en una dirección paralela a la de los ejes de rotación de tal manera que todos los ejes de movimiento son paralelos [Figura 1.6](#).

Las siglas SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) significan Brazo Robótico de Ensamble de Desempeño Selectivo. Este manipulador se caracteriza por presentar una estructura mecánica que ofrece una gran rigidez a las cargas verticales y horizontales para la

manipulación de cargas [1.3]. Como tal, la estructura SCARA es muy adecuada para tareas de montaje vertical. Es similar al de configuración cilíndrica, pero el radio y la rotación se obtienen por uno o dos eslabones. Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. El robot de configuración SCARA también puede hacer un movimiento lineal. Debido a estas características se usan ampliamente en la fabricación de electrónica de consumo y en la clasificación de artículos para su empaquetado [1.3] [1.11] [1.12].

La correspondencia entre los grados de libertad y las variables de espacio cartesiano se mantiene sólo para la componente vertical en coordenadas cartesianas. La exactitud de posicionamiento para la muñeca disminuye a medida que la distancia de la muñeca de la aumenta con respecto al plano de los eslabones horizontales [1.3].

En general, los manipuladores tipos SCARA poseen un cuarto grado de libertad, el cual permite al efector final girar 360° sobre el eje vertical, **Figura 1.9.**, o bien tener la capacidad de abrir y cerrar las puntas de dicho efector.



Figura 1.9 Manipulador Comercial Tipo SCARA

Existen diversas investigaciones en torno al desarrollo de variados sistemas de control para el manipulador tipo SCARA, entre los que destacan el control clásico PID, control por par calculado CTC, control predictivo funcional CPF y redes neuronales RN [1.12]. En dichas investigaciones se incluyen tareas sobre la simulación de manipuladores robóticos de

configuración SCARA de tres grados de libertad. El problema principal que se plantea es el seguimiento de trayectorias cartesianas y la disminución del error de seguimiento de trayectorias [1.12 – 1.18].

Realmente, los Robots no incorporan nada nuevo a la tecnología en general, la novedad radica en la particularidad de su arquitectura y en los objetivos que se procura con los mismos. El trabajo del Robot se limita generalmente a pocos movimientos repetitivos de sus ejes, estos son casi siempre 3 para el cuerpo y 3 para la mano o puño, su radio de acción queda determinado por un sector circular en el espacio donde este alcanza a actuar.

Los sistemas de control de Lazo Cerrado y de Lazo Abierto ofrecen una serie de ventajas y desventajas en el control de sistemas. Se debe definir claramente la aplicación a fin de estar en condiciones de seleccionar la conveniencia de implementar uno u otro.

1.7.- Planteamiento del problema.

A mediados de la década pasada la Dirección General de Industria Militar ha realizado esfuerzos importantes para lograr la modernización de la Industria Militar no sólo llevando a cabo la adquisición de maquinaria y equipo; sino también impulsando el desarrollo de tecnología que permita agilizar los procesos de invención, desarrollo y manufactura, mejorando de este modo la calidad de los productos que fabrica actualmente.

Una de las áreas que requiere de esta modernización es el taller de soldadura en donde se llevan a cabo las operaciones de ensamble permanente de diversos componentes y que debido a la importancia que representan dentro del funcionamiento de las armas requieren de un cuidado especial durante las fases de unión.

A pesar de la importancia que representa este tipo de operaciones, el taller de soldadura carece de un sistema que permita realizar las operaciones de manera estandarizada dependiendo en casi todos los casos en la habilidad y experiencia de los operadores.

Debido a lo anterior, resulta evidente la necesidad de desarrollar un sistema que permita realizar las operaciones de soldadura de manera estandarizada, continua y con la calidad que demanda el desempeño del armamento.

Antes de llevar a cabo el desarrollo de un sistema que ayude a agilizar, estandarizar, aumentar la productividad y disminuir residuos así como costos de producción es necesario dar respuesta a la siguiente pregunta.

¿Cómo pueden llevarse a cabo las operaciones de soldadura en la unión de elementos mecánicos que desempeñan una función dinámica durante la operación del armamento, y garantizar la estandarización, uniformidad y calidad del proceso?

1.8.- Sumario.

En este capítulo se trató parte de la historia y nacimiento de robótica así como las diferentes concepciones que se tiene acerca de la palabra robot y de las características que lo definen como tal.

Se explicó también las configuraciones más conocidas y estudiadas que existen en la actualidad sobre manipuladores robóticos así como una breve descripción de su geometría, capacidades y aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1.1] Fu K. S., Gonzales R. C., Lee C. S. G., *Robótica: Control, detección, visión e inteligencia*, McGraw Hill, 1988.
- [1.2] Appin Knowledge Solutions, *Robotics*, Infinity Science Press Llc, 2007
- [1.3] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G., *Robotics, Modelling, Planning and Control*, Springer, 2010.
- [1.4] Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M., *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons, 2006.
- [1.5] Bajd T., Mihelj M., Lenarcic J, *Robotics*, Springer, 2010.
- [1.6] Craig J. J., *Introduction to robotics mechanics and control*, Addison Wesley, 1989.
- [1.7] Lewis F. L., *Control of Robot Manipulators*, NJ10022, 1993.
- [1.8] Ramakant G., Leonard S., *Analog and Digital Control Systems*, Prentice Hall Englewood Cliffs, 1988.
- [1.9] Warwick K., *An Introduction to Control Systems*, World Scientific, 1996.
- [1.10] Nobajas J. J., Díaz-Cordovés A., *Ingeniería de Control – Control de Sistemas Continuos*, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Navarra, España, 2004
- [1.11] Cano R., Isidro I., Córdor L., Pinedo J. , *Control Dinámico de un Manipulador de Configuración SCARA de 3 GDL*, Universidad Nacional de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica. Agosto 01, del 2009

-
- [1.12] O. Vivas, *Predictive Control of a Scara Robot*, *Ingeniare - Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 14 N° 2, 2006, pp. 135-145
- [1.13] Hollis R., Quaid A., *An Architecture for Agile Assembly*, *Proc. Am. Soc. of Precision Engineering*, 10th Annual Mtg., Austin, October 15 – 19, 1995
- [1.14] Ge S. S., Lee T. H., Zhu G., *Asymptotically Stable End-Point Regulation of a Flexible SCARA/Cartesian Robot*, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Vol. 3, No. 2, June 1998.
- [1.15] Ricardo M., *Force Control of a Scara Robot using Neural Networks*, Fourth International Workshop on Robot Motion and Control, 2004, p.247 – 252.
- [1.16] Gauthier F., Angeles J., Nokleby S., *Optimization of a Test Trajectory for SCARA Systems*, Centre for Intelligent Machines, McGill University, Montreal, Quebec, Canada.
- [1.17] Mareczek J., Buss M., Schmidt G., *Robust Control of a Non-Holonomic Underactuated SCARA Robot*.
- [1.18] Khalal O., Mellit A., Rahim M., Salhi H., Guessoum A., *Robust Control of Manipulator Robot by using the Variable Structure Control with Sliding Mode*, *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation*, July 27-29, 2007, Athens – Greece

CAPÍTULO 2

MODELO DINÁMICO

2.1.- Introducción.

En este capítulo se obtendrá el modelo dinámico del manipulador. Para ello se divide en dos: la parte de la cinemática, y la parte de la dinámica. La cinemática describe el movimiento del manipulador sin considerar las fuerzas y torques que lo producen, en tanto que las ecuaciones dinámicas explícitamente describen la relación entre la fuerza y el movimiento que ésta produce [2.1]. La importancia de las ecuaciones de movimiento radica en que son el eje en torno al cual giran el diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot, el dimensionamiento de los actuadores, la simulación del movimiento y por supuesto la concepción y evaluación del algoritmo de control.

2.2.- Cinemática.

La descripción de la cinemática es por sí misma una descripción geométrica [2.2]. La cinemática se divide a su vez en directa e inversa. Primeramente consideraremos el problema de la cinemática directa, la cual determina la posición y orientación del efector final dado los valores de las variables para las articulaciones del brazo. El problema de la cinemática inversa consiste en determinar los valores de las variables para las articulaciones del brazo dado la posición y orientación del efector final.

2.2.1.- Cadena cinemática.

Como se explicó anteriormente, el brazo SCARA está compuesto por una serie de eslabones conectados a través de articulaciones. Dado que el brazo está compuesto por tres juntas de revolución y una junta prismática, se considera que por cada par articulación-eslabón existe un grado de libertad.

Con la suposición de cada junta tiene un grado de libertad, la acción de cada articulación puede ser representada por un sólo número real; el ángulo de rotación en el caso de la junta de revolución o el desplazamiento en el caso de la junta prismática.

Denavit y Hartenberg [2.3] propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un robot, con respecto a sistema de referencia fijo. Esta notación es ampliamente usada en la formulación de

problemas de posición de manipuladores a través de la llamada matriz de transformación usando para ello algebra matricial [2.4 - 2.6].

El brazo SCARA de este estudio tiene 4 articulaciones y 5 eslabones, cada articulación conecta 2 eslabones. Las articulaciones son enumeradas desde 1 hasta n , en tanto los eslabones se enumeran desde 0 hasta n , comenzando en la base. De esta manera se define el manipulador de como un brazo de 4 grados de libertad. Por medio de esta convención, la junta i conecta el eslabón $i-1$ al eslabón i . Cuando la junta i actúa, el eslabón i se mueve. Se presentan dos tipos de movimiento en los eslabones de acuerdo al tipo de junta que se mueve, en el caso de una junta de revolución el movimiento (qi) es un ángulo de rotación θ_i y en el caso de la junta prismática es un desplazamiento (di).

2.2.2.- Cinemática directa.

Existen algunos textos que consideran el estudio de la cinemática [2.2] [2.7 - 2.9] en manipuladores robóticos pero es raro que alguno considere la cinemática de un brazo SCARA con 4 grados de libertad en la que este último sea una articulación de revolución. En esta sección se desarrollará la configuración de ecuaciones cinemáticas para el brazo SCARA.

Para seleccionar los cuadros de referencia en aplicaciones robóticas se emplea el método de Denavit-Hartenberg [2.2 - 2.4], o convención D-H. En esta convención cada matriz de transformación A_i está representada como el producto de cuatro transformaciones básicas.

$$A_i = Rot_{1,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,d_i} Rot_{x,\alpha_i}$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.1)$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.2)$$

donde los cuatro parámetros θ_i , α_i , d_i y a_i están asociados con el eslabón i y la junta i . La notación $c\theta_i$ es equivalente a $\cos\theta_i$ y $s\alpha_i$ equivale a $\sin\alpha_i$, etc.

En lo sucesivo, será empleada la siguiente convención para simplificar la notación de los cálculos realizados con el ángulo, de tal manera que se denotará a $\theta_1+\theta_2$ como θ_{12} ; de igual manera $\cos(\theta_1+\theta_2)$ se escribirá como c_{12} , etc.

El primer paso consiste en localizar y etiquetar los ejes de rotación de las juntas como se muestran en la **Figura 2.1**. Se ha establecido un código de colores para identificar los tres ejes del sistema coordenado **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1. Convención de colores

Eje	Color
X	Rojo
Y	Verde
Z	Azul

Los orígenes fueron establecidos como se muestran, por conveniencia para este caso en particular. Se determinó el eje x_0 en el plano de la hoja de papel como se muestra. Esto es completamente arbitrario y solamente afecta la configuración cero del manipulador, que es, la posición del manipulador cuando $\theta_1=0$.

Para determinar cada eje en el sistema se consideran los siguientes criterios de DH.

DH1. El eje x_i es perpendicular al eje z_{i-1} .

DH2. El eje x_i intersecta al eje z_{i-1} .

Inicialmente, se determinaron los ejes z_0, \dots, z_4 de una manera conveniente. Específicamente, fue asignado x_i como el eje de rotación para la junta $i+1$. De aquí que para las juntas de rotación los ejes z_i fueron seleccionados a partir de sus ejes de rotación. Para el caso específico de la junta prismática el eje z_i quedó determinado por el sentido y dirección de su desplazamiento.

Después de establecer los ejes z_i , se fijó el sistema de coordenadas en la base del brazo como

se muestra en la figura. La determinación de los ejes y es casi arbitraria, pero al final el arreglo corresponde con la regla de la mano derecha. Para el resto de los ejes se consideraron los criterios DH1 y DH2. Finalmente el arreglo de los sistemas de coordenadas así como las direcciones de los ejes se muestran en la **Figura 2.1**.

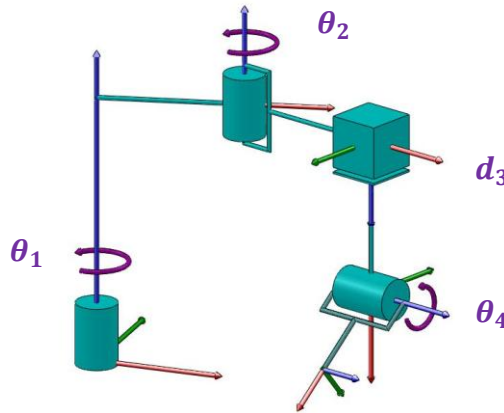


Fig. 2.1 Sistema de coordenadas.

De acuerdo a la convención DH se tienen parámetros para los eslabones de un brazo robótico.

Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros según convención de D-H.

Parámetro	Descripción
a_i	Es la distancia a lo largo de x_i desde o_i a la intersección de x_i y z_{i-1}
α_i	Es el ángulo entre z_{i-1} y z_i medido alrededor del eje x_i .
d_i	Distancia a lo largo de z_{i-1} desde o_{i-1} a la intersección de x_i y z_{i-1} .
θ_i	Es el ángulo entre x_{i-1} y x_i medido alrededor de z_{i-1} .

Los parámetros de la tabla anterior se presentan en la **Tabla 2.3**.

Tabla 2.3 Parámetros D-H del robot SCARA.

Articulación	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	0	d_1	θ_1^*
2	a_2	180	0	θ_2^*
3	0	0	d_3^*	0
4	a_4	0	0	θ_4^*

En seguida se muestran las matrices de transformación.

$$A_2 = \begin{pmatrix} c_2 & s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & -c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.3) \quad A_2 = \begin{pmatrix} c_2 & s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & -c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.4)$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.5) \quad A_4 = \begin{pmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_4 c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & a_4 s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.6)$$

De aquí se obtiene, que las ecuaciones de la cinemática directa del brazo están dadas por la siguiente matriz de transformación.

$$T_4^0 = A_1 A_2 A_3 A_4$$

$$= \begin{pmatrix} c_4(c_1 c_2 - s_1 s_2) + s_4(c_1 s_2 + c_2 s_1) & c_4(c_1 s_2 + c_2 s_1) - s_4(c_1 c_2 - s_1 s_2) & 0 & 0 \\ c_4(c_1 s_2 + c_2 s_1) - s_4(c_1 c_2 - s_1 s_2) & -c_4(c_1 c_2 - s_1 s_2) - s_4(c_1 s_2 + c_2 s_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 c_1 + a_4 c_4(c_1 c_2 - s_1 s_2) + a_4 s_4(c_1 s_2 + c_2 s_1) + a_2 c_1 c_2 - a_2 s_1 s_2 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 s_1 + a_4 c_4(c_1 s_2 + c_2 s_1) - a_4 s_4(c_1 c_2 - s_1 s_2) + a_2 c_1 s_2 + a_2 c_2 s_1 & 0 \\ -1 & 0 & d_1 - d_3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12} c_4 + s_{12} s_4 & -c_{12} s_4 + s_{12} c_4 & 0 & c_{12} a_4 c_4 + s_{12} a_4 s_4 + c_{12} a_2 + a_1 c_1 \\ s_{12} c_4 - c_{12} s_4 & -s_{12} s_4 - c_{12} c_4 & 0 & s_{12} a_4 c_4 - c_{12} a_4 s_4 + s_{12} a_2 + a_1 s_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.7)$$

2.2.3.- Cinemática inversa.

En la sección anterior se mostró como determinar la posición y orientación del efector final a partir de las juntas en su calidad de variables a partir de la utilización de matrices de transformación homogénea y que el resultado es independiente de la configuración del robot. Esta sección está dedicada a encontrar los valores de las juntas en términos de la posición y orientación del efector final; sin embargo, a diferencia de la cinemática directa, la resolución del problema cinemático inverso está fuertemente ligada a la configuración del robot.

En general el problema cinemático inverso es bastante difícil [2.2], dado que es necesario calcular la posición y orientación del efector final, para nuestro caso particular, este cálculo se realizó en dos partes: primero se calculó la orientación y posteriormente la posición última del efector.

Posición.

El objeto de resolver el problema de la posición en la cinemática directa es determinar la posición cartesiana x del efector final dados los ángulos de orientación [2.10].

El método empleado para desarrollar esta primera parte de la cinemática inversa del brazo SCARA es el Método Geométrico [2.2] [2.7] [2.11] dado que por su simplicidad resulta práctico.

Proyectando el manipulador sobre el plano $x_0 - y_0$, se tiene las siguientes relaciones geométricas:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad \dots (2.8)$$

Por la ley de los cosenos se tiene que

$$r^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos \theta \quad \dots (2.9)$$

$$-\cos \theta = \frac{r^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \quad \dots (2.10)$$

Aplicando la siguiente identidad trigonométrica

$$\cos \theta_2 = \cos(2\pi) \cos \theta + \sin(2\pi) \sin \theta$$

$$\cos \theta_2 = -\cos \theta$$

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}$$

puesto que

$$\begin{aligned}\sin \theta_2 &= \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2} \\ \tan \theta_2 &= \frac{\sin \theta_2 \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}}{\cos \theta_2} \\ \tan \theta_2 &= \frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D} \\ \theta_2 &= \arctan \left(\frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D} \right) \quad \dots (2.11)\end{aligned}$$

Se puede apreciar que los dos posibles valores según la elección del signo dan lugar a dos valores diferentes de θ_2 correspondientes a una posición derecha y otra izquierda.

Calculando θ_1

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \alpha_2 - \alpha_1 \\ \tan \alpha_2 &= \frac{x}{y} \\ \alpha_2 &= \arctan \left(\frac{x}{y} \right) \\ \cos \alpha_1 &= \frac{ca}{h} = \frac{a_1 + a_2 \cos \theta_2}{r} \\ \sin \alpha_1 &= \frac{co}{h} = \frac{a_2 \sin \theta_2}{r} \\ \tan \alpha_1 &= \frac{\sin \alpha_1}{\cos \alpha_1} = \frac{a_2 \sin \theta_2}{a_1 + a_2 \cos \theta_2} \\ \alpha_1 &= \arctan \left(\frac{a_2 \sin \theta_2}{a_1 + a_2 \cos \theta_2} \right) \quad \dots (2.12)\end{aligned}$$

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{x}{y} \right) - \arctan \left(\frac{a_2 s_2}{a_1 + a_2 c_2} \right) \quad \dots (2.13)$$

Calculando d_3

$$d_3 = p_z - d_1 \quad \dots (2.14)$$

Orientación.

Una vez que ha sido resuelto el problema de la posición, se procede a resolver la parte de la

orientación [2.2] [2.3]. Dada la configuración del brazo SCARA esta parte presenta cierta facilidad para su resolución, puesto que sólo será necesario calcular un grado de libertad, de acuerdo a la figura.

Dado que se han obtenido θ_1 , θ_2 , y d_3 , queda ahora obtener el valor de θ_4 el cual consigue la orientación deseada. Para lo cual se establece que:

$$R_4^0 = R_3^0 R_4^3 \quad \dots (2.15)$$

donde R_4^0 es conocida por ser la orientación deseada del extremo del brazo, y R_3^0 definida por:

$$\begin{aligned} R_3^0 &= R_1^0 R_2^1 R_3^2 \\ &= \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_2 & s_2 & 0 \\ s_2 & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12} - s_{12} & c_1 s_2 + c_2 s_1 & 0 \\ c_1 s_2 + c_2 s_1 & s_{12} - c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

también conocida dado que se tienen los valores de θ_1 , θ_2 , y d_3 . De esta manera se establece que:

$$R_4^3 = [r_{ij}] = [R_4^0]^{-1} R_4^0 \quad \dots (2.16)$$

tendrá componentes numéricas conocidas. De igual forma se sabe que:

$$R_4^3 = [r_{ij}] = \begin{pmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.17)$$

Donde r_{ij} serán por la Ecuación (2.17) valores conocidos. Ahora, de la ecuación (2.16) se puede tomar los siguientes valores:

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_4 \\ r_{21} &= s_4 \end{aligned} \quad \dots (2.18)$$

del conjunto de la Ecuación (2.18) es posible obtener el valor de la articulación restante:

$$\tan\theta_4 = \frac{r_{11}}{r_{21}} = \frac{s_4}{c_4}$$

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{s_4}{c_4}\right) \quad \dots (2.19)$$

2.2.4.- Matriz Jacobiana.

Con las secciones anteriores se han establecido las relaciones existentes entre las coordenadas articulares y la del efector final, en esta sección, ahora se determinará las relaciones entre sus respectivas derivadas, es decir, la relación entre las velocidades angulares y lineales de las coordenadas articulares y las de la posición y orientación del extremo del robot.

Es conocido que la cinemática directa especifica la posición y orientación de las articulaciones en el espacio cartesiano. Las relaciones entre las velocidades arriba mencionadas se determinarán por medio de la Matriz Jacobiana o Jacobiano. El Jacobiano es uno de los cálculos más importantes en el análisis y control del movimiento de un robot. Interviene virtualmente en cada aspecto de la manipulación del robot: en la concepción y ejecución de suaves trayectorias, en la determinación de configuraciones singulares, en la ejecución de movimientos antropomórficos coordinados, en la derivación de ecuaciones dinámicas de movimiento y en la transformación de fuerzas y torques desde el efector final hasta las articulaciones del brazo [2.2] [2.3] [2.11].

En nuestro caso particular el Jacobiano es una matriz de 6×4 dado que el brazo SCARA presenta sólo cuatro grados de libertad.

Partiendo de que las articulaciones 1 , 2 y 4 son de revolución y la 3 es prismática, el Jacobiano queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{pmatrix} z_0 \times (O_4 - O_0) & z_1 \times (O_4 - O_1) & z_2 \times (O_4 - O_2) & z_3 \times (O_4 - O_3) \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \quad \dots (2.20)$$

$$J = \begin{pmatrix} z_0 \times (O_4 - O_0) & z_1 \times (O_4 - O_1) & z_2 & z_3 \times (O_4 - O_3) \\ z_0 & z_1 & 0 & z_3 \end{pmatrix}$$

En base a las matrices dadas por las Ecuaciones 2.3 a 2.6 se calcula la matriz $T_4^0 = A_1 \dots A_4$, de donde se obtiene que

$$O_1 = \begin{pmatrix} a_1 c_1 \\ a_1 s_1 \\ d_1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.21) \quad O_2 = \begin{pmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ a_1 s_1 + a_2 s_{12} \\ d_1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.22)$$

$$O_3 = \begin{pmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ a_1 s_1 + a_2 s_{12} \\ d_1 - d_3 \end{pmatrix} \quad \dots (2.23)$$

$$O_4 = \begin{pmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} \\ a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_4 c_4 s_{12} - a_4 s_4 c_{12} \\ d_1 - d_3 \end{pmatrix} \quad \dots (2.24)$$

En relación a la configuración del brazo Scara se considera el sentido de los ejes como $z_0 = z_1 = z_3 = k$, y $z_2 = -k$. De esta forma el Jacobiano para el brazo SCARA queda como:

$$z_0 \times (O_4 - O_0) = \begin{pmatrix} -a_1 s_1 - a_2 s_{12} - a_4 c_4 s_{12} + a_4 s_4 s_{12} \\ a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots (2.25)$$

$$z_1 \times (O_4 - O_1) = \begin{pmatrix} -a_2 s_{12} + a_4 s_4 c_{12} - a_4 c_4 s_{12} \\ a_1 c_{12} + a_4 s_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots (2.26)$$

$$z_3 \times (O_4 - O_3) = \begin{pmatrix} a_4 s_4 c_{12} - a_4 c_4 s_{12} \\ a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots (2.27)$$

$$J = \begin{pmatrix} -a_1 s_1 - a_2 s_{12} - a_4 c_4 s_{12} + a_4 s_4 s_{12} & -a_2 s_{12} + a_4 s_4 c_{12} - a_4 c_4 s_{12} & 0 & a_4 s_4 c_{12} - a_4 c_4 s_{12} \\ a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} & a_1 c_{12} + a_4 s_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} & 0 & a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (2.28)$$

2.2.5.- Jacobiana Inversa.

Con la Matriz Jacobiana es posible determinar las velocidades en el extremo del brazo a partir de la relación entre las velocidades de las articulaciones, del mismo modo es posible determinar la velocidad de las articulaciones a partiendo de las velocidades en el extremo. Lo anterior se logra con el cálculo del Jacobiano inverso.

Dado que los procedimientos existentes para el cálculo del Jacobiano inverso en la práctica resultan tener un alto grado de dificultad y dada la importancia que para el control del movimiento del robot tiene la Jacobiana, se han desarrollado procedimientos numéricos para el cálculo rápido de la Jacobiana [2.2] [2.3] [2.11].

Configuraciones singulares.

Reciben este nombre aquellas configuraciones del robot en donde el determinante de su matriz Jacobiana se anula, es decir, en las configuraciones singulares no existe Jacobiana inversa [2.2].

Las diferentes configuraciones singulares del robot pueden clasificarse como:

1. Singularidades en los límites. Se presentan cuando el extremo del robot está en algún punto del límite de trabajo interior o exterior.
2. Singularidades en el interior del espacio de trabajo del robot. Ocurren dentro de la zona de trabajo y se producen generalmente por el alineamiento de dos o más ejes de las articulaciones del robot.

De igual forma se sabe que identificar las singularidades del brazo es de suma importancia por diversas razones, entre las que podemos mencionar:

1. Representan configuraciones desde las cuales ciertas direcciones de movimiento podrían resultar inasequibles.

2. Las velocidades en los límites del efector final podrían corresponder a velocidades infinitas en las articulaciones.
3. Las fuerzas y torques en los límites del extremo podrían presentar valores infinitos.
4. Usualmente las singularidades corresponden a los puntos que se encuentran sobre los límites del espacio de trabajo del efector final, esto es, en los puntos donde el brazo se extiende por completo.
5. Las singularidades corresponden a los puntos del espacio de trabajo del brazo que podrían no ser alcanzados bajo pequeñas perturbaciones de los parámetros de la articulación, tales como longitud o separación.
6. Para singularidades cercanas podría no existir solución o bien, existir infinitas soluciones para el problema de la cinemática inversa.

De la misma manera en que se resolvió el problema de la cinemática inversa, primero tratando el caso de la posición y posteriormente el de la orientación, es posible abordar el problema de las singularidades para nuestro caso particular, es decir, primeramente se resolverán las singularidades para el brazo y posteriormente para el efector final.

Como se determinó en la sección anterior, el Jacobiano es una matriz de 6×4 y una configuración que q es singular si y sólo si

$$\det J(q) = 0 \quad \dots (2.29)$$

Si se particiona el Jacobiano en bloques se obtiene que

$$J = [J_P | J_O] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad \dots (2.30)$$

Analizando la figura puede observarse que, geoméricamente, el brazo SCARA sólo presenta

una singularidad y que ésta se da cuando los eslabones están alineados. Dicha alineación se presenta de dos formas, cuando el brazo está completamente extendido y cuando está completamente retraído. A partir de las Ecuaciones (2.26) y (2.28) se puede determinar la singularidad dada como

$$J_{11} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_3 & 0 \\ \alpha_2 & \alpha_4 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \dots (2.31)$$

Donde

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -a_1 s_1 - a_2 s_{12} - a_4 c_4 s_{12} + a_4 s_4 s_{12} \\ \alpha_2 &= a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} \\ \alpha_3 &= -a_2 s_{12} + a_4 s_4 c_{12} - a_4 c_4 s_{12} \\ \alpha_4 &= a_1 c_{12} + a_4 s_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12} \end{aligned}$$

puede verse que el rango de J_{11} será menor que tres precisamente cuando $\alpha_1 \alpha_4 - \alpha_2 \alpha_3 = 0$, por lo que el Jacobiano será

$$\begin{aligned} |J| &= -[(a_2 c_{12} + a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12})(a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_4 c_4 s_{12} - a_4 s_4 c_{12})] \\ &\quad + [(a_2 s_{12} - a_4 s_4 c_{12} + a_4 c_4 s_{12})(a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12})] \end{aligned}$$

que se anula para

$$\begin{aligned} &(a_2 c_{12} + a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12})(a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_4 c_4 s_{12} - a_4 s_4 c_{12}) \\ &= (a_2 s_{12} - a_4 s_4 c_{12} + a_4 c_4 s_{12})(a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_4 c_4 c_{12} + a_4 s_4 s_{12}) \end{aligned}$$

lo que cumple siempre que $\theta_2 = 0$ o π , ya que la igualdad anterior se verifica para cualquier θ_1 .

$$\begin{aligned} &(a_2 c_1 + a_4 c_4 c_1 + a_4 s_4 s_1)(a_1 s_1 + a_2 s + a_4 c_4 s_1 - a_4 s_4 c_1) \\ &= (a_2 s_1 - a_4 s_4 c_1 + a_4 c_4 s_1)(a_1 c_1 + a_2 c_1 + a_4 c_4 c_1 + a_4 s_4 s_1) \end{aligned}$$

Esta situación definida por $\theta_2 = 0$ o π corresponde a los puntos límite del espacio de trabajo

del robot:

$\theta_2 = 0$: Límite exterior del espacio de trabajo.

$\theta_2 = \pi$: Límite interior del espacio de trabajo.

2.3.- Dinámica.

Esta sección se describe, a través del modelo dinámico del manipulador, los siguientes aspectos matemáticos [2.2] [2.3]:

1. La localización del robot definida por su cinemática definida en la sección anterior.
2. Las velocidades y aceleraciones del extremo final.
3. Las fuerzas y pares de torsión aplicados tanto en las articulaciones como en el extremo del brazo.
4. Los parámetros de longitud, masas e inercias de los elementos del manipulador.

Para el desarrollo del modelo dinámico del manipulador se considerará únicamente la dinámica de los eslabones dado que para este caso particular la masa de los actuadores ya están considerados como parte de los eslabones y que las cargas e inercias de los equipos electrónicos de mando no son significativos para ocasionar deformaciones en los eslabones.

Para la obtención del modelo dinámico de un sistema mecánico, se basa, fundamentalmente, en la segunda ley de Newton

$$\sum F = m \frac{dv}{dt} \quad \dots (2.32)$$

o su equivalente para movimientos de rotación, establecida por Euler.

$$\sum T = I\omega + \omega \times (I\omega) \quad \dots (2.33)$$

Como planteamiento alternativo para la obtención del modelo puede emplearse la formulación *Lagrangiana* [2.1 - 2.3], basada en consideraciones energéticas. Este planteamiento es más

sistemático que el anterior, y por lo tanto, facilita enormemente la formulación de un modelo tan complejo como es el caso de un robot. La formulación *Lagrangiana* establece que:

$$\mathcal{L} = \mathcal{K} - \mathcal{P} \quad \dots (2.34)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y} = f \quad \dots (2.35)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = f \quad \dots (2.36)$$

La función L , la cual es la diferencia entre la energía cinética K y la potencial P , es llamada el *Lagrangiano* del sistema y la **Ecuación (2.33)** es llamada la *Ecuación de Euler-Lagrange*.

Aunque ambas formulaciones conducen a los mismos resultados, lo hacen por procedimientos bastante diferentes. La formulación *Euler-Lagrange* se trata de un procedimiento un tanto ineficiente desde el punto de vista computacional. Puede comprobarse que el algoritmo es de un orden de complejidad n^4 , es decir, el número de operaciones a realizar crece con la potencia 4 del número de grados de libertad. Sin embargo conduce a unas ecuaciones finales bien estructuradas donde aparecen de manera clara los diversos pares y fuerzas que intervienen en el movimiento [2.9] [2.12].

Por otro lado, la formulación de *Newton-Euler* conduce a una formulación recursiva (primero hacia adelante y después hacia atrás) en la que se obtienen la posición, velocidad y aceleración partiendo del eslabón i al eslabón n , posteriormente, se obtienen las fuerzas y pares a partir del eslabón n hasta el eslabón i [2.14 – 2.16].

El algoritmo se basa en operaciones vectoriales siendo más eficiente en comparación con las operaciones matriciales asociadas a la formulación Lagrangiana. De hecho, el orden de complejidad computacional de la formulación recursiva de Newton-Euler en n , lo que indica que depende directamente del número de grados de libertad [2.17].

2.3.1 Formulación Lagrangiana [2.4]

En la **Figura 2.2** se puede observar las coordenadas de los extremos y centros de masa de los eslabones 1 y 2.

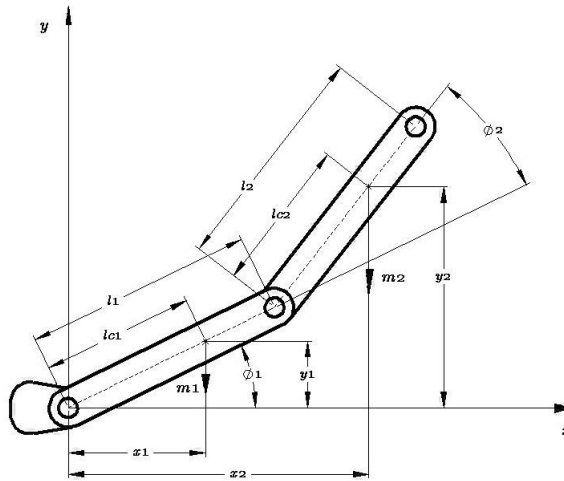


Fig. 2.2. Eslabones 1 y 2.

$$\mathcal{K} = \frac{1}{2} m v_i^2 + \frac{1}{2} J \theta_i^2 \quad \dots (2.37)$$

$$v_i^2 = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 \quad \dots (2.38)$$

$$v_i = m_i g h_i \quad \dots (2.39)$$

de la **Figura 2.2** tenemos que

$$\begin{aligned} x_1 &= l_{c1} c_1 & \dot{x}_1 &= -l_{c1} s_1 \dot{\theta}_1 \\ y_1 &= l_{c1} s_1 & \dot{y}_1 &= l_{c1} c_1 \dot{\theta}_1 \end{aligned} \quad \dots (2.40)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= l_1 c_1 + l_{c2} c_{12} & \dot{x}_2 &= -l_1 s_1 \dot{\theta}_1 - l_{c2} s_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ y_2 &= l_1 s_1 + l_{c2} s_{12} & \dot{y}_2 &= l_1 c_1 \dot{\theta}_1 + l_{c2} c_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{aligned} \quad \dots (2.41)$$

En la **Figura 2.3** se puede observar las coordenadas del eslabón 3, de donde se obtiene que

$$\begin{aligned} x_3 &= l_1 c_1 + l_2 c_{12} & \dot{x}_3 &= -l_1 s_1 \dot{\theta}_1 - l_2 s_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ y_3 &= l_1 s_1 + l_2 s_{12} & \dot{y}_3 &= l_1 c_1 \dot{\theta}_1 + l_2 c_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ z_3 &= l_{c3} = \frac{1}{2} l_3 & \dot{z}_3 &= \frac{1}{2} \dot{l}_3 \end{aligned} \quad \dots (2.42)$$

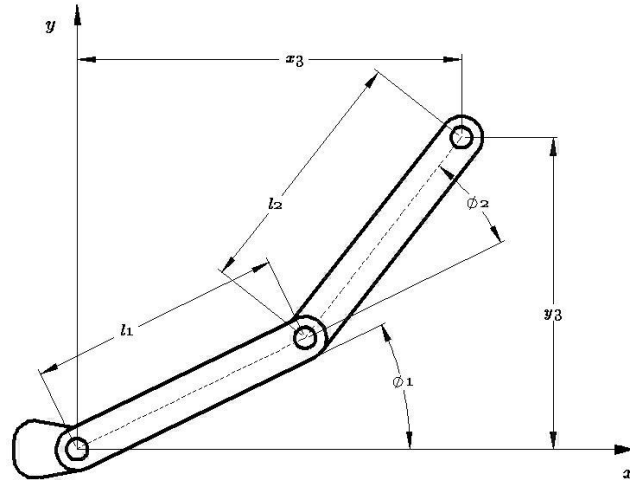


Fig. 2.3. Eslabón 3.

considerando que θ_4 puede tomar los valores desde 0° hasta 180° . y que

$$s\left(\frac{\pi}{2} - (\theta_1 + \theta_2)\right) = s\frac{\pi}{2}c_{12} - c\frac{\pi}{2}s_{12} = c_{12}$$

$$c\left(\frac{\pi}{2} - (\theta_1 + \theta_2)\right) = s\frac{\pi}{2}c_{12} - c\frac{\pi}{2}s_{12} = c_{12}$$

A partir de las Figuras 2.4 y 2.5 se tiene que

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= -l_1s_1\dot{\theta}_1 - l_2s_{12}\dot{\theta}_1 + l_{c_4}c_4c_{12}\dot{\theta}_1 + l_{c_4}c_4c_{12}\dot{\theta}_2 - l_2s_{12}\dot{\theta}_2 - l_{c_4}s_{12}s_4\dot{\theta}_4 \\ \dot{y}_4 &= l_1c_1\dot{\theta}_1 + l_2c_{12}\dot{\theta}_1 + l_{c_4}c_4s_{12}\dot{\theta}_1 + l_2c_{12}\dot{\theta}_2 + l_{c_4}c_4s_{12}\dot{\theta}_2 - l_{c_4}c_{12}s_4\dot{\theta}_4 \\ \dot{z}_4 &= -\dot{l}_3 - l_{c_4}c_4\dot{\theta}_4 \end{aligned} \quad \dots (2.43)$$

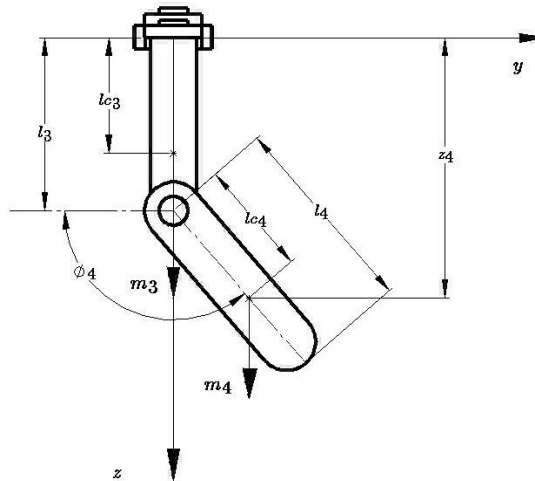


Fig. 2.4. Eslabón 4.

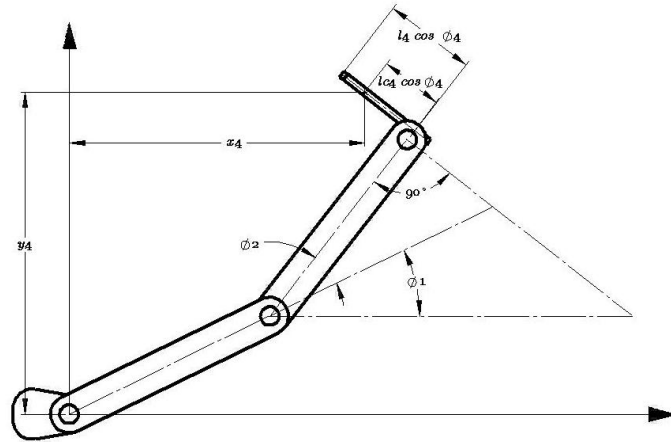


Fig. 2.5. Vista superior.

Sustituyendo las Ecuaciones 2.40 a 2.43 en 2.38 se tiene que

$$v_1^2 = l_{c_1}^2 \dot{\theta}_1^2 \quad \dots (2.44)$$

$$v_2^2 = (l_1^2 + l_{c_2}^2 + 2l_1 l_{c_2} c_2) \dot{\theta}_1^2 + l_{c_2}^2 \dot{\theta}_1^2 + 2l_{c_2} (l_{c_2} + l_1 c_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad \dots (2.45)$$

$$v_3^2 = (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2) \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + 2l_2 (l_2 + l_1 c_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{4} l_3^2 \quad \dots (2.46)$$

$$\begin{aligned} v_4^2 = & (l_1^2 + 2l_1 l_2 c_2 + 2l_1 l_{c_4} c_4 s_2 + l_2^2 + l_{c_4}^2 c_4^2) \dot{\theta}_1^2 + 2(l_1 l_2 c_2 + l_1 l_{c_4} s_2 + l_2^2 + l_{c_4}^2 c_4^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ & + 2(l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + l_2 l_{c_4} s_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + (l_{c_4}^2 c_4^2 + l_2^2) \dot{\theta}_2^2 + 2l_2 l_{c_4} s_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + l_{c_4}^2 \dot{\theta}_4^2 \\ & + l_3^2 - 2l_{c_4} c_4 l_3 \dot{\theta}_4 \end{aligned} \quad \dots (2.47)$$

Sustituyendo las Ecuaciones 2.44 a 2.47 en 2.37

$$k_1 = \frac{1}{2} (m_1 l_{c_1}^2 + J_1) \dot{\theta}_1^2 \quad \dots (2.48)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} m_2 (l_1^2 + l_{c_2}^2 + 2l_1 l_{c_2} c_2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} (m_2 l_{c_2}^2 + J_2) \dot{\theta}_2^2 + m_2 l_{c_2} (l_{c_2} + l_1 c_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad \dots (2.49)$$

$$k_3 = \frac{1}{2} m_3 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + m_3 l_2 (l_2 + l_1 c_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{4} m_3 l_3^2 \quad \dots (2.50)$$

$$\begin{aligned}
k_4 &= \frac{1}{2} m_4 (l_1^2 + 2l_1 l_2 c_2 + 2l_1 l_{c_4} s_2 + l_2^2 + l_{c_4}^2 c_4^2) \dot{\theta}_1^2 \\
&+ m_4 (l_1 l_2 c_2 + l_1 l_{c_4} c_4 s_2 + l_2^2 + l_{c_4}^2 c_4^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
&+ m_4 (l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + l_2 l_{c_4} s_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{1}{2} m_4 (l_{c_4}^2 c_4^2 + l_2^2) \dot{\theta}_2^2 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \\
&+ \frac{1}{2} m_4 l_{c_4}^2 \dot{\theta}_4^2 + \frac{1}{2} m_4 l_3^2 - m_4 l_{c_4} c_4 l_3 \dot{\theta}_4 + \frac{1}{2} J_4 \dot{\theta}_4^2
\end{aligned} \quad \dots (2.51)$$

$$k = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 \quad \dots (2.52)$$

Sustituyendo las Ecuaciones 2.48 a 2.51 en 2.52

$$\begin{aligned}
k &= \frac{1}{2} [m_1 l_{c_1}^2 + J_1 + m_2 (l_1^2 + l_{c_2}^2 + 2l_1 l_{c_2} c_2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2) \\
&+ m_4 (l_1^2 + 2l_1 l_2 c_2 + 2l_1 l_{c_4} s_2 + l_2^2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \dot{\theta}_1^2 \\
&+ \frac{1}{2} [m_2 l_{c_2}^2 + J_2 + m_3 l_2^2 m_4 (l_{c_4}^2 c_4^2 + l_2^2)] \dot{\theta}_2^2 \\
&+ [m_2 l_{c_2} (l_{c_2} + l_1 c_2) + m_3 l_2 (l_2 + l_1 c_2) + m_4 (l_1 l_2 c_2 + l_1 l_{c_4} c_4 s_2 + l_2^2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
&+ m_4 (l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + l_2 l_{c_4} s_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + \frac{1}{2} (J_4 + m_4 l_{c_4}^2) \dot{\theta}_4^2 - m_4 l_{c_4} c_4 l_3 \dot{\theta}_4 \\
&+ \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} m_3 + m_4 \right) m_4 l_3^2
\end{aligned} \quad \dots (2.53)$$

Ahora se calcula la energía potencial de cada uno de los eslabones

$$\begin{aligned}
v_1 &= m_1 g l_0 & v_3 &= m_3 g (l_0 - l_{c_3}) \\
v_2 &= m_2 g l_0 & v_4 &= m_4 g (l_0 - l_3 - l_{c_4} s_4)
\end{aligned} \quad \dots (2.54)$$

de la suma se tiene que

$$v = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g l_0 - m_3 g l_{c_3} - m_4 g (l_3 + l_{c_4} s_4) \quad \dots (2.55)$$

Por lo tanto el *Lagrangiano* queda como

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & \frac{1}{2} [m_1 l_{c_1}^2 + J_1 + m_2 (l_1^2 + l_{c_2}^2 + 2l_1 l_{c_2} c_2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2) \\
& + m_4 (l_1^2 + 2l_1 l_2 c_2 + 2l_1 l_{c_4} s_2 + l_2^2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \dot{\theta}_1^2 \\
& + \frac{1}{2} [m_2 l_{c_2}^2 + J_2 + m_3 l_2^2 + m_4 (l_{c_4}^2 c_4^2 + l_2^2)] \dot{\theta}_2^2 \\
& + [m_2 l_{c_2} (l_{c_2} + l_1 c_2) + m_3 l_2 (l_2 + l_1 c_2) \\
& + m_4 (l_1 l_2 c_2 + l_1 l_{c_4} c_4 s_2 + l_2^2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad \dots (2.56) \\
& + m_4 (l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + l_2 l_{c_4} s_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + \frac{1}{2} (J_4 + m_4 l_{c_4}^2) \dot{\theta}_4^2 \\
& - m_4 l_{c_4} c_4 \dot{l}_3 \dot{\theta}_4 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} m_3 + m_4 \right) m_4 \dot{l}_3^2 + (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g l_0 \\
& - m_3 g l_{c_3} - m_4 g (l_3 + l_{c_4} s_4)
\end{aligned}$$

Para la primera articulación, se calcula $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1}$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} = & [m_1 l_{c_1}^2 + J_1 + m_2 (l_1^2 + l_{c_2}^2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2) + m_4 (l_1^2 + l_2^2)] \dot{\theta}_1 \\
& + [2m_2 l_1 l_{c_2} c_2 + 2m_3 l_1 l_2 c_2 + m_4 (2l_1 l_2 c_2 + 2l_1 l_{c_4} s_2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \dot{\theta}_1 \\
& + [m_2 l_{c_2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2] \dot{\theta}_2 \\
& + [m_2 l_{c_2} l_1 c_2 + m_3 l_1 l_2 c_2 + m_4 (l_1 l_2 c_2 + l_1 l_{c_4} c_4 s_2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \dot{\theta}_2 \\
& + m_4 (l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + l_2 l_{c_4} s_4) \dot{\theta}_4
\end{aligned}$$

Derivando con respecto al tiempo

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} = & [m_1 l_{c_1}^2 + J_1 + m_2 (l_1^2 + l_{c_2}^2 + 2l_1 l_{c_2} c_2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2) \\
& + m_4 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2 + 2l_1 l_{c_4} s_2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \ddot{\theta}_1 \\
& + [m_2 (l_{c_2}^2 + l_{c_2} l_1 c_2) + m_3 l_2^2 (l_1 l_2 c_2) + m_4 (l_2^2 + l_1 l_2 c_2 + l_1 l_{c_4} c_4 s_2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \ddot{\theta}_2 \\
& + m_4 (l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + l_2 l_{c_4} s_4) \ddot{\theta}_4 + m_4 l_1 l_{c_4} c_2 c_4 \dot{\theta}_2^2 + (m_4 l_1 l_{c_4} c_2 c_4 + m_4 l_2 l_{c_4} c_4) \dot{\theta}_4^2 \\
& + (-2m_2 l_1 l_{c_2} s_2 - 2m_3 l_1 l_2 s_2 - 2m_4 l_1 l_2 s_2) \dot{\theta}_1 \\
& + (-m_2 l_1 l_{c_2} s_2 - m_3 l_1 l_2 s_2 - m_4 l_1 l_2 s_2) \dot{\theta}_2 + 2m_4 l_1 l_{c_4} c_4 c_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
& + (-2m_4 l_1 l_{c_4} s_2 s_4 - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + (-2m_4 l_1 l_{c_4} s_2 s_4 - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4
\end{aligned}$$

Ahora se calcula $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1}$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} = \tau_1$$

$$\begin{aligned} \tau_1 = & [m_1 l_{c_1}^2 + J_1 + m_2 (l_1^2 + l_{c_2}^2 + 2l_1 l_{c_2} c_2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2) \\ & + m_4 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2 + 2l_1 l_{c_4} s_2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \ddot{\theta}_1 \\ & + [m_2 (l_{c_2}^2 + l_{c_2} l_1 c_2) + m_3 l_2^2 (l_1 l_2 c_2) \\ & + m_4 (l_2^2 + l_1 l_2 c_2 + l_1 l_{c_4} c_4 s_2 + l_{c_4}^2 c_4^2)] \ddot{\theta}_2 + m_4 (l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + l_2 l_{c_4} s_4) \ddot{\theta}_4 \\ & + m_4 l_1 l_{c_4} c_2 c_4 \dot{\theta}_2^2 + (m_4 l_1 l_{c_4} c_2 c_4 + m_4 l_2 l_{c_4} c_4) \dot{\theta}_4^2 \quad \dots (2.57) \\ & + (-2m_2 l_1 l_{c_2} s_2 - 2m_3 l_1 l_2 s_2 - 2m_4 l_1 l_2 s_2) \dot{\theta}_1 \\ & + (-m_2 l_1 l_{c_2} s_2 - m_3 l_1 l_2 s_2 - m_4 l_1 l_2 s_2) \dot{\theta}_2 + 2m_4 l_1 l_{c_4} c_4 c_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ & + (-2m_4 l_1 l_{c_4} s_2 s_4 - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 \\ & + (-2m_4 l_1 l_{c_4} s_2 s_4 - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \end{aligned}$$

Para la segunda articulación se tiene que

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} = & [m_2 l_{c_2}^2 + J_2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2] \dot{\theta}_2 + m_4 l_{c_4}^2 c_4^2 \dot{\theta}_2 + [m_2 l_{c_2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2] \dot{\theta}_1 \\ & + (m_2 l_{c_2} l_1 + m_3 l_1 l_2 + m_4 l_1 l_2) c_2 \dot{\theta}_1 + m_4 l_1 l_{c_4} c_4 s_2 \dot{\theta}_1 + m_4 l_{c_4}^2 c_4^2 \dot{\theta}_1 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \dot{\theta}_4 \end{aligned}$$

Derivando con respecto al tiempo

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} = & [m_2 l_{c_2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2 + m_2 l_{c_2} l_1 c_2 + m_3 l_1 l_2 c_2 + m_4 l_1 l_2 c_2 + m_4 l_1 l_{c_4} c_4 s_2 + m_4 l_{c_4}^2 c_4^2] \ddot{\theta}_1 \\ & + [m_2 l_{c_2}^2 + J_2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2 + m_4 l_{c_4}^2 c_4^2] \ddot{\theta}_2 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \ddot{\theta}_4 + m_4 l_2 l_{c_4} c_4 \dot{\theta}_4^2 \\ & - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + (-m_2 l_{c_2} l_1 s_2 - m_3 l_1 l_2 s_2 - m_4 l_1 l_{c_4} c_4 c_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ & + (-m_4 l_1 l_{c_4} s_2 s_4 - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 \end{aligned}$$

Ahora se calcula $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} = & [-m_2 l_1 l_{c_2} s_2 - m_3 l_1 l_2 s_2 - m_4 l_1 l_2 s_2 + m_4 l_1 l_{c_4} c_4 c_2] \dot{\theta}_1^2 \\ & + [-m_2 l_1 l_{c_2} s_2 - m_3 l_1 l_2 s_2 - m_4 l_1 l_2 s_2 + m_4 l_1 l_{c_4} c_4 c_2] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_4 l_1 l_{c_4} s_4 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 \end{aligned}$$

Ahora se calcula

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} = \tau_2$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & [m_2 l_{c_2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2 + m_2 l_{c_2} l_1 c_2 + m_3 l_1 l_2 c_2 + m_4 l_1 l_2 c_2 + m_4 l_1 l_{c_4} c_4 s_2 \\ & + m_4 l_{c_4}^2 c_4^2] \ddot{\theta}_1 + [m_2 l_{c_2}^2 + J_2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2 + m_4 l_{c_4}^2 c_4^2] \ddot{\theta}_2 \\ & + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \ddot{\theta}_4 \quad \dots (2.58) \\ & + [m_2 l_1 l_{c_2} s_2 + m_3 l_1 l_2 s_2 + m_4 l_1 l_2 s_2 - m_4 l_1 l_{c_4} c_4 c_2] \dot{\theta}_1^2 + m_4 l_2 l_{c_4} c_4 \dot{\theta}_4^2 \\ & - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \dots (2.56) \end{aligned}$$

Para la tercera articulación se tiene que

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} = -m_4 l_{c_4} c_4 \dot{\theta}_4 + \left[\frac{1}{2} m_3 + m_4 \right] \dot{l}_3$$

Derivando

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} = -m_4 l_{c_4} c_4 \ddot{\theta}_4 + m_4 l_{c_4} s_4 \dot{\theta}_4^2 + \left[\frac{1}{2} m_3 + m_4 \right] \ddot{l}_3$$

Ahora se calcula

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{l}_3} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial l_3} = f_3$$

$$f_3 = -m_4 l_{c_4} c_4 \ddot{\theta}_4 + m_4 l_{c_4} s_4 \dot{\theta}_4^2 + \left[\frac{1}{2} m_3 + m_4 \right] \ddot{l}_3 + \left[\frac{1}{2} m_3 + m_4 \right] g \quad \dots (2.59)$$

Para la cuarta articulación, se calcula $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_4}$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_4} = m_4 [l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + l_2 l_{c_4} s_4 c_2] \dot{\theta}_1 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \dot{\theta}_2 + [J_4 + m_4 l_{c_4}^2] \dot{\theta}_4 - m_4 l_{c_4} c_4 \dot{l}_3$$

Derivando con respecto al tiempo

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_4} = & [m_4 l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4] \ddot{\theta}_1 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \ddot{\theta}_2 - m_4 l_{c_4} c_4 \ddot{l}_3 + (J_4 + m_4 l_{c_4}^2) \ddot{\theta}_4 + m_4 l_{c_4} s_4 \dot{l}_3 \\ & - m_4 l_1 l_{c_4} s_2 s_4 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + (m_4 l_1 l_{c_4} c_2 c_4 + m_4 l_2 l_{c_4} c_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + m_4 l_2 l_{c_4} c_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \end{aligned}$$

Ahora se calcula $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_4}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_4} = & [-m_4 l_1 l_{c_4} s_2 s_4 - m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4] \dot{\theta}_1^2 - m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4 \dot{\theta}_2^2 + [-m_4 l_1 l_{c_4} s_2 s_4 - 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ & + [m_4 l_1 l_{c_4} c_2 c_4 + m_4 l_2 l_{c_4} c_4] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + m_4 l_2 l_{c_4} c_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + m_4 l_{c_4} s_4 \dot{l}_3 \dot{\theta}_4 - m_4 g l_{c_4} c_4 \end{aligned}$$

Ahora se calcula

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_4} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_4} = \tau_4 \\ \tau_4 = [m_4 l_1 l_{c_4} s_4 c_2 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4] \ddot{\theta}_1 + m_4 l_2 l_{c_4} s_4 \ddot{\theta}_2 - m_4 l_{c_4} c_4 \ddot{l}_3 + (J_4 + m_4 l_{c_4}^2) \ddot{\theta}_4 \\ + [m_4 l_1 l_{c_4} s_4 s_2 + m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4] \dot{\theta}_1^2 + m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4 \dot{\theta}_2^2 \quad \dots (2.60) \\ + m_4 l_{c_4} s_4 (1 - \dot{\theta}_4) \dot{l}_3 + 2m_4 l_{c_4}^2 c_4 s_4 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_4 g l_{c_4} c_4 \end{aligned}$$

Las **Ecuaciones 2.57 a 2.60** pueden convertirse en un arreglo matricial que tiene la siguiente forma general:

$$M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad \dots (2.61)$$

La cual es una ecuación diferencial no lineal.

El modelado dinámico del robot SCARA consiste en encontrar las matrices que permitan conocer el comportamiento del robot, conociendo como entradas, los torques aplicados en cada junta, específicamente los brindados por los motores. La dinámica del manipulador está gobernada por la **Ecuación matricial 2.61**.

El torque aplicado por los motores está definido por τ . Luego M es una matriz simétrica no singular que relaciona el efecto inercial de los eslabones y expresa la fuerza inercial debido al movimiento del manipulador. El vector C , es generado por la reacción de los efectos centrífugos y de Coriolis, debido al acoplo de velocidades durante el movimiento del robot. El vector fuerza G representa los efectos de la gravedad en los eslabones.

2.4 Sumario

En esta sección se desarrolló el modelo matemático del manipulador SCARA con 4 grados de libertad. Se partió de la cinemática directa e inversa para posteriormente abarcar la parte

dinámica del sistema. De igual forma se desarrolló el jacobiano para esta configuración en específico y así determinar las singularidades del brazo.

Para el desarrollo de la cinemática se emplea la convención de Denavit – Hantenberg y para la dinámica se utiliza la formulación de Euler – Lagrange con ciertas particularidades que permite facilitar el cálculo del modelo matemático disminuyendo en una pequeña proporción la exactitud del desarrollo.

REFERENCIAS

- [2.1] Cano R., Isidro I., C3ndor L., Pinedo J., *Control Din3mico de un Manipulador de Configuraci3n SCARA de 3 GDL*, Universidad Nacional de Ingenier3a. Escuela Profesional de Ingenier3a Mecatr3nica. Agosto 01, del 2009.
- [2.2] Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M., *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons, 2006.
- [2.3] Angeles J., *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems Theory, Methods, and Algorithms*, Springer, 2003.
- [2.4] Hern3ndez V., Bravo G., Rubio J. J., Pacheco J., *Kinematics and Jacobians for the SCARA and the Cylindrical manipulators*
- [2.5] Cano R., Isidro I., C3ndor L., Pinedo J., *Control Din3mico de un Manipulador de Configuraci3n SCARA de 3 GDL*, Universidad Nacional de Ingenier3a. Escuela Profesional de Ingenier3a Mecatr3nica. Agosto 01, del 2009.
- [2.6] Salman M., Ionescu F., Taha R., *Kinematic Modeling and Simulation of a SCARA Robot by Using Solid Dynamics and Verification by MATLAB/Simulink*, European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.37 No.3 (2009), pp.388-405.
- [2.7] Lewis F., Abdallah C., Dawson D., *Control of robot manipulators*, Ed. Maxwell-Macmillan, pp. 65-72, 1993.
- [2.8] Fu K. S., Gonzales R. C., Lee C. S. G., *Rob3tica: Control, detecci3n, visi3n e inteligencia*, McGraw Hill, 1988.

-
- [2.9] Boada Y., Morales L., Sotomayor N., *Ensamblaje y Control de un Robot de Tres Grados de Libertad Tipo SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)*, Escuela Politécnica de Ecuador.
- [2.10] Trevisani A., Gallina P., Williams R., *Cable-Direct-Driven Robot (CDDR) with Passive SCARA Support: Theory and Simulation*, J Intell Robot Syst (2006) 46: 73–94, DOI 10.1007/s10846-006-9043-7.
- [2.11] Craig J. J., *Introduction to robotics mechanics and control*, Addison Wesley, 1989.
- [2.12] Barrientos A., *Fundamentos de Robótica*, McGraw-Hill.
- [2.13] Munro N., *Robot Manipulator Control, Theory and Practice*, Marcel Dekker, 2004.
- [2.14] Lewis F. L., *Control of Robot Manipulators*, NJ10022, 1993.
- [2.15] Murray R. M., Li Z., Shankar S., *A Mathematic Robot Modeling and Control*.
- [2.16] Alshamasin M. S., Ionescu and F., Al-Kasasbeh R. T., *Kinematic Modeling and Simulation of a SCARA Robot by Using Solid Dynamics and Verification by MATLAB/Simulink*, European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.37 No.3 (2009), pp.388-405.
- [2.17] Checa D., Luna D., Mosquera V., *Simulador de un Robot SCARA de 4 Grados de Libertad*, Cuarto Congreso Colombiano de Computación 4CCC.

CAPÍTULO 3

DISEÑO MECÁNICO

3.1.- Generalidades

Actualmente existe un debate entre la comunidad académica y la industria en torno a si el diseño debe impartirse estableciendo una base teórica, o comprometiendo al futuro diseñador en una práctica flexible supervisada. Como en muchos ámbitos de la vida profesional y más aún en la cotidiana la medida justa es el equilibrio [3.1]. La teoría sin práctica definitivamente es poco efectiva. La práctica sin marco teórico puede producir resultados pobres. En el desarrollo de productos: la competencia se gana a través de la práctica pero conocer la teoría sobre el funcionamiento de las cosas ayudan de manera considerable.

Existen en el mercado robots industriales con dos, cuatro o incluso más de seis grados de libertad, sin embargo existen tareas o aplicaciones industriales que no requieren emplear en su totalidad seis grados de libertad y dichas actividades pueden llegar a ser realizadas por brazos robóticos de cuatro o cinco grados de libertad.

Para este caso de estudio se ha elegido un brazo tipo SCARA de tres grados de libertad precisamente. En este capítulo emplearemos el proceso de diseño para llevar a cabo el diseño de la estructura del manipulador.

3.2.- El proceso de diseño

El proceso de diseño abarca las actividades y eventos que transcurren entre el reconocimiento de un problema y la especificación de una solución del mismo modo que sea funcional, económica y satisfactoria de algún modo [3.2]. Existen diversas propuestas sobre la estructura de metodologías de diseño, todas ellas con enfoques muy variados, desde el punto de vista de funcionalidad, ensamble, materiales, entre otras [3.3] [3.4] [3.5].

Ningún método de diseño es de por sí una receta única. Lo que sí puede asegurarse es que de un modo u otro todos tienen puntos en común y una correlación lógica [3.6]. Lo realmente bueno acerca de los métodos de diseño es que se debe ser más consciente de cómo organizar el propio proceso de diseño y no verse confundido por él [3.7]. Por más racional y lógico que sea un método siempre será particular para cada trabajo, ya que deberá combinar otro tipo de

variables mucho más afines con la sensibilidad porque cada problema se presenta en situaciones muy distintas unas de otras.

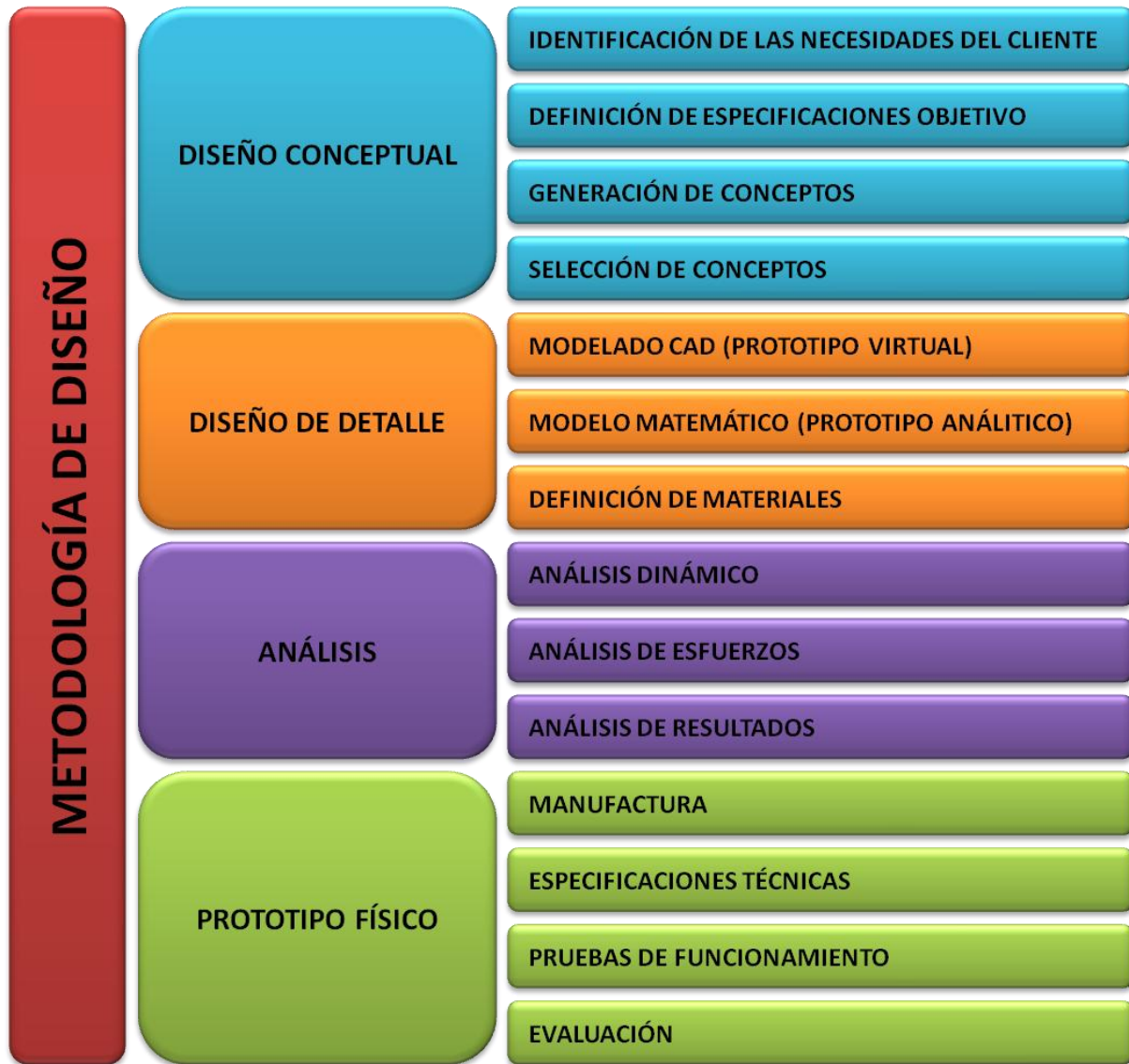


Figura 3.1.- Diagrama de la metodología de diseño.

Con esto se pretende decir que no existe una única metodología pero sí que sea cual fuere el problema a resolver se debe organizar un *modus operandi* que responda a las necesidades propias de dicho trabajo, estableciendo un organigrama con tiempos muy bien definidos para cada etapa y teniendo en cuenta la importancia que poseen una investigación por demás

detallada y extensa, una profunda experimentación y una constante verificación. Para el presente trabajo se propone la metodología mostrada en la **Figura 3.1**.

Antes de iniciar con un proyecto de desarrollo, se debe especificar una oportunidad de mercado en particular y planear las amplias restricciones y objetivos para el proyecto. La declaración de la misión específica hacia qué dirección hay que encaminarse, pero por lo general no se especifica un destino preciso, o una forma particular en la que hay que proceder [3.1]. La declaración de la misión para un dispositivo para la aplicación de soldadura se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Declaración de la misión para el desarrollo.

Declaración de la misión: Proyecto de dispositivo para la aplicación de soldadura	
Descripción del producto	Un dispositivo automático para la aplicación de soldadura entre dos componentes.
Metas comerciales clave	Producto introducido en el cuarto trimestre de 2012. 50% de margen bruto.
Mercado Primario	Talleres de soldadura de la Dirección General de Industria Militar
Mercado Secundario	Talleres externos dedicados a la soldadura.
Postulados	Semiportátil Alimentado por corriente eléctrica Tecnología de baterías recargables
Personas interesadas	Usuarios Minoristas Taller de mantenimiento Producción

3.3.- Diseño conceptual.

El problema consiste en diseñar un dispositivo automático para la aplicación de soldadura TIG, para procesos de ensamble en componentes metálicos, específicamente de acero. La particularidad que presenta el diseño es que cubra en lo posible, una compatibilidad con el

mayor número de accesorios (antorchas para la aplicación de soldadura TIG) en su variedad de materiales y dimensiones estándar. Como primera etapa se deberá de identificar las necesidades del cliente.

3.3.1.- Identificación de las necesidades del cliente.

El proceso de identificación de las necesidades del cliente es una parte integral del proceso de desarrollo del producto, y está más estrechamente relacionado con la selección y generación del concepto y el establecimiento de las especificaciones del producto. En la [Tabla 3.2.](#), se muestra los enunciados del cliente y las necesidades interpretadas.

Tabla 3.2. Enunciados del cliente y necesidades interpretadas.

Enunciado	Enunciado del cliente	Necesidad interpretada
Aplicación	Se necesita soldar los componentes más rápidamente que con una antorcha manual.	El dispositivo suelda los componentes más rápido que con una antorcha manual.
	Algunas ocasiones se sueldan componentes con geometrías pequeñas que requieren de un gran esfuerzo y tiempo.	El dispositivo automático suelda componentes con geometrías pequeñas y complicadas de manera rápida y sencilla.
	En cada cordón aplicado el operador se retira la careta para observar la aplicación del cordón de soldadura	El dispositivo automático puede soldar varias piezas sin tener que interrumpir el proceso.
Ventajas dispositivo actual	Puede trasladarse de un taller a otro sin complicaciones	El dispositivo automático es portátil
	Se puede acomodar fácilmente casi en cualquier posición.	El dispositivo automático requiere de poco espacio para su instalación.
Desventajas dispositivo	Es difícil mantener la misma	El dispositivo automático

actual	distancia de la antorcha a las piezas a soldar	mantiene la distancia adecuada entre la antorcha y los componentes a soldar.
--------	--	--

3.3.2.- Generación de especificaciones objetivo.

Las necesidades del cliente por lo general se expresan en un lenguaje coloquial como se muestra en la Tabla 3.2. Sin embargo es necesario establecer un conjunto de especificaciones objetivo, las cuales expliquen con detalle preciso y medurable lo que el producto tiene que hacer. En las [Tablas 3.3 y 3.4](#) se muestran estas especificaciones dividiéndolas en variables de entrada y variables de salida.

Tabla 3.3. Entrada: Componentes separados.

<i>Variables de entrada</i>	<i>Limitaciones de entrada</i>
Tamaño de los componentes	No deben ser mayores a 5 dm ³
Longitud de la unión.	No puede ser mayor de 200 mm
Tipo de material de los componentes	Debe ser ligero, resistente a la deformación
Cantidad de componentes	Ninguna

Tabla 3.4. Salida: Componentes unidos.

<i>Variables de salida</i>	<i>Limitaciones de salida</i>
Fuerza de unión	Conforme a la norma
Calentamiento	No mayor a 150°C
Grado de deformación	No mayor de 0.2 mm a lo largo del eje horizontal

Las especificaciones técnicas también se reflejan en las funciones que se desea que haga el dispositivo automático, los requisitos de diseño que debe cumplir así como los criterios de diseño a los que el desarrollo estará sujeto.

Funciones.

1. Recibir la orden de inicio de la operación.
2. Desplazar la antorcha desde home hasta el punto de trabajo.
3. Alimentar el material de aporte.

4. Realizar la operación de soldadura.
5. Regresar al punto de home.

Requisitos de diseño.

1. Radio de trabajo de 800 mm.
2. Radio interno de 164 mm.
3. No mayor de 50 kg.
4. Emplear corriente monofásica de 120 volts.
5. Los componentes soldados deben cumplir con la norma correspondiente.
6. El costo no debe exceder de los \$50,000.00.
7. Debe operar a prueba de equivocaciones.
8. El control debe ser confiable.
9. La interfaz de usuario debe ser amigable.
10. Es conveniente tener una eficiencia mecánica mayor de 95%.
11. Debe tener capacidad para soportar al menos 1.5 kg en el efector final.
12. Se espera que el brazo opere 8 horas diarias, 5 días por semana, con una vida útil de 10 años.
13. Debe ser capaz de trabajar el cualquier lugar de México, a temperaturas que van de 0 a 100 °C.
14. El volumen de producción será de 40,000 operaciones por año.
15. Observar las normas de seguridad gubernamentales y de la industria.

Criterios

1. Desempeño.
2. Bajo costo de fabricación, operación y mantenimiento.
3. Facilidad de manufactura, operación y mantenimiento.
4. Seguridad para el operario.
5. Confiabilidad.
6. Velocidad de aplicación.
7. Tamaño pequeño y peso ligero.
8. Silencioso y con poca vibración.

9. Usar materiales estándar y de fácil adquisición.
10. Apariencia atractiva y adecuada a la aplicación.
11. Fácil configuración.

3.3.3.- Generación de conceptos.

Un concepto de producto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de funcionamiento, y forma del producto. Es una descripción concisa sobre cómo va a satisfacer el producto las necesidades del cliente. Por lo general, un concepto se expresa como un bosquejo o un modelo tridimensional tosco, y es acompañado por una breve descripción textual. Para la generación del concepto se establece las capacidades y limitaciones

Función Global de Servicio del Producto

La función global de servicio del sistema en el proceso de diseño, describe el papel a desempeñar del mismo, es decir la capacidad que tiene para realizar cada elemento o el conjunto del sistema [3.8]. Y la cual queda definida de la siguiente manera:

"Transformar la energía disponible en una fuente de calor en un trabajo mecánico de ensamble, a través de la soldadura, por medio de un electrodo de tungsteno, para unir de manera rígida y permanente dos componentes de acero"

Límites del Producto

El establecimiento de límites al sistema, forma parte del mismo, ya que no puede estar aislado, porque está restringido por el entorno que lo rodea, tanto con elementos físicos como humanos y que están con relación al ciclo de vida del producto. En este caso, El manipulador tendrá interacción con los elementos siguientes:

1. Conexiones instaladas en los extremos del sistema de alimentación del material de aporte.
2. Conexión de alimentación de gas inerte.
3. Energía eléctrica.
4. Medio ambiente (temperatura, humedad, residuos sólidos).
5. Instalación.

6. Mantenimiento.
7. Reparación.
8. Espacio disponible.
9. Integrante de un sistema de fabricación en serie.

Análisis funcional de mayor nivel para el producto.

"Transformar la energía disponible en un trabajo mecánico para la aplicación de soldadura TIG para unir permanentemente dos o más componentes de acero".

Además tanto los eslabones como el sistema de control contemplan las siguientes funciones de servicio.

1. Resistir la corrosión.
2. Facilitar la instalación.
3. Facilitar la reparación.
4. Facilitar el mantenimiento preventivo.
5. Entrar en un espacio disponible.

3.4.- Modelado CAD

El concepto de “Diseño Asistido por Computadora” (CAD Computer Aided Design) representa el conjunto de aplicaciones informáticas que permiten al diseñador definir el producto a fabricar [3.9] [3.10]. Las aplicaciones CAD, que permiten especificar la representación unívoca de una pieza son:

- Proyecciones bidimensionales del objeto: alzados, plantas, secciones, perspectivas.
- Modelado geométrico (descripción analítica de la volumetría, contorno y dimensiones del objeto), incluyendo relaciones geométricas e incluso algebraicas entre los distintos componentes.
- Base de datos de propiedades: materiales, tolerancias dimensionales, acabados.

El término “Ingeniería Asistida por computadora” (CAE Computer Aided Engineering) engloba las herramientas informáticas que permiten analizar y simular el comportamiento del producto diseñado [3.9].

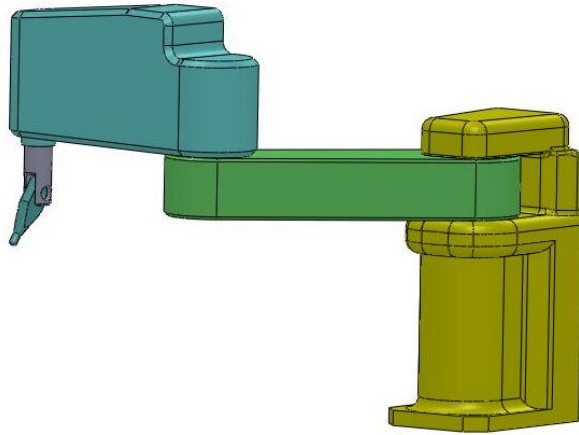


Figura 3.2.- Diseño preliminar modelado mediante CAD.

La mayoría de ellas se presentan como módulos o extensiones de aplicaciones CAD, que incorporan análisis cinemático, análisis por el método de los elementos finitos (FEM Finite Elements Method), o de simulación de programas CNC (Control Numérico Computarizado).

Con los datos obtenidos durante el desarrollo conceptual se modeló un concepto preliminar del manipulador **Figura 3.2.**, y en la **Figura 3.3** se aprecia el diseño de detalle del manipulador SCARA.

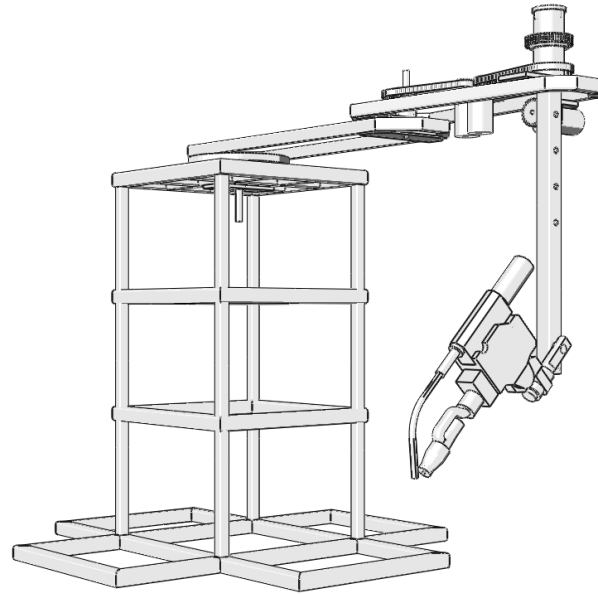


Figura 3.3.- Diseño de detalle manipulador SCARA.

3.5. Definición de materiales

Durante el proceso de selección de un material debe considerarse las funciones y forma del componente [3.11] [3.12]. Lista de propiedades clave para la selección del material.

1. Resistencia, indicada por la resistencia última a la tensión, resistencia de fluencia, resistencia a la compresión, resistencia a la fatiga, resistencia al cortante y otras.
2. Magnitudes y tipos de las cargas y torques.
3. Rigidez, indicada por el módulo de elasticidad en tensión, módulo de elasticidad en cortante o módulo de flexión.
4. Peso y masa, indicados por el peso específico o la densidad.
5. Ductilidad, indicada por el porcentaje de elongación.
6. Tenacidad, indicada por la energía de impacto (Izod, Charpy, etc).
7. Datos del comportamiento de arrastramiento o deformación progresiva.
8. Resistencia a la corrosión y compatibilidad con el ambiente.
9. Tipo de conexiones y ensambles.
10. Apariencia.
11. Costo del material.

12. Costo de procesar el material.

3.6.- Análisis de fuerzas

El tipo de carga de un sistema se divide en diversas clases, con base en el carácter de las cargas aplicadas y en la presencia o ausencia de movimiento en el sistema. Una vez definida la configuración general del sistema mecánico y calculado sus movimientos cinemáticos, la siguiente tarea será determinar la magnitud y dirección de todas las fuerzas y los pares de fuerzas presentes en los diversos elementos. Estas cargas pueden ser constantes o variables a lo largo del tiempo [3.13] [3.14]. Los elementos del sistema pueden ser estacionarios o en movimiento como se muestra en la **Tabla 3.5**. La clase más general es la de un sistema en movimiento, con cargas que varían con el tiempo, como es el caso del brazo SCARA de este estudio. Las demás combinaciones son subconjuntos de la clase general.

Tabla 3.5. Tipos de carga.

	Cargas constantes	Cargas que varían con el tiempo
Elementos estacionarios	Clase 1	Clase 2
Elementos en movimiento	Clase 2	Clase 4

La clase **4** describe el caso general de un sistema en movimiento rápido, sujeto a cargas que varían con el tiempo. Cuando en algún caso dado las cargas externas aplicadas son más o menos constantes, las cargas dinámicas provenientes de sus aceleraciones que se producen sobre los elementos variarán con el tiempo. El sistema robótico de este estudio queda claramente definido por la clase **4**.

Diagrama de cuerpo libre.

A fin de identificar correctamente todas las fuerzas potenciales y momentos en el sistema, es necesario dibujar diagramas precisos de cuerpo libre de cada uno de los miembros del sistema. Estos diagramas muestran en forma general el componente con todas las fuerzas y momentos de fuerzas que actúan sobre él. Existen fuerzas y momentos de fuerzas externas aplicadas a la

pieza desde fuera del sistema, así como fuerzas y momentos de interconexión donde cada una de las piezas está unida o entra en contacto con el resto de los componentes adyacentes.

Además de las fuerzas y los pares de las fuerzas conocidas que aparecen en el diagrama de cuerpo libre, se definen las dimensiones y los ángulos de los elementos del conjunto, de acuerdo con un sistema de coordenadas localizado en los centros de gravedad de cada elemento. Para un análisis de cargas dinámicas, es necesario conocer o calcular las aceleraciones cinemáticas, tanto angulares como las lineales antes de llevar a cabo el análisis de las cargas [3.15].

Determinar las fuerzas teóricas de cuerpo rígido que actúan en tres dimensiones, en el sistema del brazo SCARA. Se conoce la geometría del acoplamiento, las masas y los momentos de inercia de masa, así como las velocidades de los motores a que se desea que operen el sistema.

Premisas: las aceleraciones son significativas. Será empleado un modelo de carga clase 4 y por tanto se requiere de un análisis dinámico. No existen cargas externas sobre el sistema, siendo las cargas todas ellas debidas a la aceleración de los eslabones. Las fuerzas por peso son significativas en comparación con las fuerzas de inercia, por lo que serán consideradas.

La **Figura 3.4** muestra el modelo de demostración de acoplamiento de cuatro eslabones. Está formado por cuatro elementos en movimiento más la base o elemento fijo. El motor acoplado en base impulsa al eslabón 1 mediante un motor de CD.

Aún cuando existe una diversidad de componentes que integran cada uno de los eslabones, estos últimos se consideran como una pieza única. La entrada al eslabón 1 es una velocidad angular constante, además de un par de torsión, generados por el impulso del motor acoplado en la base.

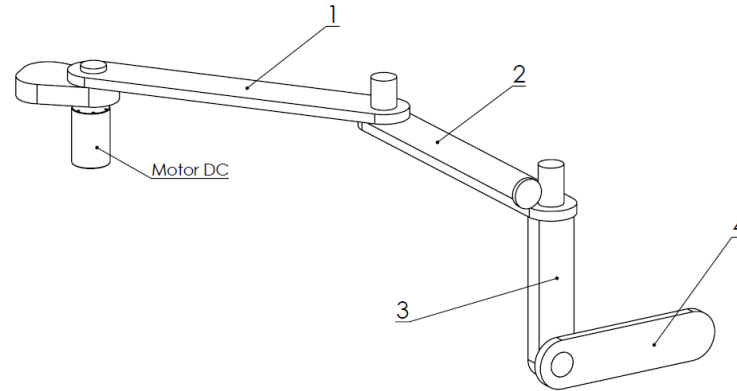


Figura 3.4.- Esquema general manipulador SCARA.

El eslabón *1* gira sobre su pivote *1a* con una amplitud de 210° . Aún cuando el eslabón *1* llegue a tener una aceleración angular igual a cero, si opera a una velocidad angular constante, aún así habrá en los eslabones *2*, *3* y *4* aceleraciones angulares que variarán con el tiempo. En cualquier caso, los centros de gravedad de los eslabones experimentarán aceleraciones lineales que variarán con el tiempo, conforme dichos centros se mueven. Estas aceleraciones angulares y lineales generarán fuerzas y pares de torsión de inercia. Por lo tanto, incluso sin la aplicación de fuerzas de torsión externas a los eslabones, las fuerzas de inercia crearán fuerzas de reacción en los pasadores. Son estas fuerzas las que se desean calcular con la finalidad de establecer los valores de los pares de torsión de cada uno de los motores.

Las Figuras 3.5 a 3.10 muestran los diagramas de cuerpo libre de cada pieza individual. El sistema de coordenadas local no giratorio de cada eslabón se ubica en el eje de los motores.

Se pueden escribir ecuaciones para cada eslabón en movimiento dentro del sistema. Para aplicar sus valores en estas ecuaciones, deben calcularse masas y momentos de inercia de masa de cada eslabón en función de su centro de gravedad. En este caso práctico se utilizó un sistema CAD de modelado "SolidWorks" para diseñar la geometría de los componentes y para calcular sus propiedades de masa. Dichos valores serán presentados conforme se avance en el desarrollo de los cálculos correspondientes.

El sistema empleará cuatro motores, para lo cual es necesario calcular las características con que deben contar dichos motores. Partiendo del eslabón 4, se tiene los siguientes datos:

Tabla 3.6. Datos del eslabón 4.

Datos	Símbolo	Magnitud	Unidad
Masa	m_4	1.24	kg
Distancia al centro de gravedad	r_{4G}	0.152	m
Velocidad final del eslabón	ω_{4f}	12	r.p.m.
Velocidad inicial del eslabón	ω_{40}	0	r.p.m.
Tiempo en alcanzar la aceleración	t	0.5	s

El eslabón sólo se desplazará en un sector de 180° . Se desea que la velocidad de desplazamiento sea alcanzada en 0.5 segundos por lo que la aceleración será de

$$\alpha_4 = \frac{1.257 - 0}{0.5} = 2.514 \text{ rads/s}^2$$

Considerando al eslabón en su punto crítico para alcanzar dicha aceleración se muestra el siguiente diagrama cinético, el punto G describe una trayectoria circular y por tanto tiene dos componentes de aceleración. Es importante que la componente tangencial $a_{4t} = \alpha_4 r_{4G}$ actúe arriba puesto que debe concordar con el sentido de rotación de α_4

Ecuaciones de movimiento.

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} + \\ \leftarrow \end{matrix} \sum F_{4n} &= m_4 \omega_4^2 r_{4G}; & O_{4n} &= (1.2 \text{ kg})(1.257 \text{ rads/s})^2(0.152 \text{ m}) \\
 \begin{matrix} + \\ \downarrow \end{matrix} \sum F_{4t} &= m_4 \alpha_4 r_{4G}; & -O_{4t} + (1.2)(9.81)N &= (1.2 \text{ kg})(2.514 \text{ rads/s}^2)(0.152 \text{ m}) \quad \dots (3.1) \\
 \begin{matrix} + \\ \curvearrowright \end{matrix} \sum M_{4G} &= I_{4G} \alpha_4; & O_{4t}(0.152 \text{ m}) - M_O &= (0.034246 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(2.514 \text{ rads/s}^2)
 \end{aligned}$$

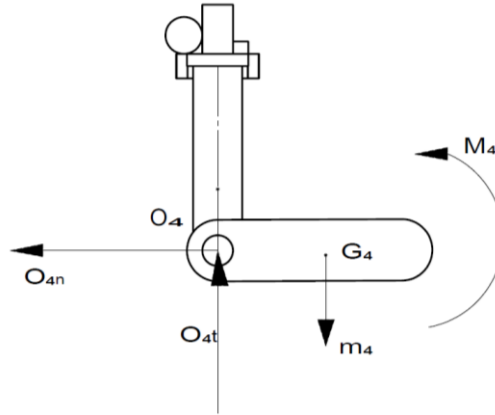


Figura 3.5.- Diagrama de Cuerpo Libre eslabón 4.

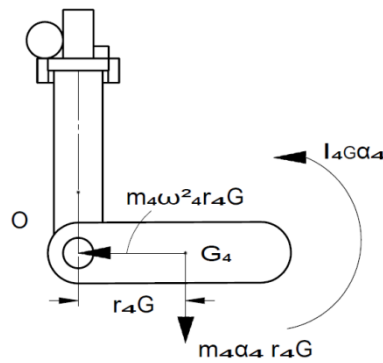


Figura 3.6.- Diagrama cinético eslabón 4.

Al resolver

$$O_{4n} = 0.3625 \text{ N}$$

$$O_{4t} = 11.3135 \text{ N}$$

$$M_{40} = 1.6336 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Es conveniente disponer del valor del torque en *kg cm*, dado que la mayoría de los motores eléctricos manejan este tipo de unidades.

$$\tau_4 = 1.6336 \text{ N} \cdot \text{m} \left(\frac{1 \text{ kg}}{9.8 \text{ N}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 16.67 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Para el tercer eslabón se considera la masa de este más la masa del cuarto eslabón, con lo que se tiene el siguiente cuadro de datos:

Tabla 3.7. Datos del eslabón 3.

Datos	Símbolo	Magnitud	Unidad
Masa de eslabón 3 y 4	m_3	1.70	kg
Distancia al centro de gravedad	r_{3G}	0.19	m
Velocidad del eslabón	ω_{3f}	2.514	Rads / s ²
Radio del engrane	r_3	0.05	m

Considerando los eslabones 3 y 4 por separado, Figura 3.7. El bloque se acelera hacia arriba, en su punto crítico, generando una aceleración angular en sentido contrario al de las manecillas del reloj α del engrane.

Los eslabones 3 y 4 se desplazan en un sentido vertical por lo que el movimiento hacia arriba se ve afectado por la aceleración gravitacional y la aceleración que debe tener el sistema en su movimiento ascendente. Por ello, la aceleración lineal total queda expresada como

$$a_T = a_g + a_s$$

Donde

a_T	Aceleración total	
a_g	Aceleración gravitacional	m/s ²
a_s	Aceleración del sistema	

La aceleración lineal del sistema está dada por

$$a_s = \alpha_3 r_e = (2.514 \text{ rads} / \text{s}^2)(0.05 \text{ m}) = 0.1257 \text{ m} / \text{s}^2$$

Sustituyendo a_s en (3)

$$a_T = 9.81 + 0.1257 = 9.936 \text{ m} / \text{s}^2$$

De acuerdo a la figura 4, la fuerza de tensión ejercida sobre el centro de gravedad de los eslabones es

$$T_3 = 1.7 \text{ kg}(9.936 \text{ m} / \text{s}^2) = 16.90 \text{ N}$$

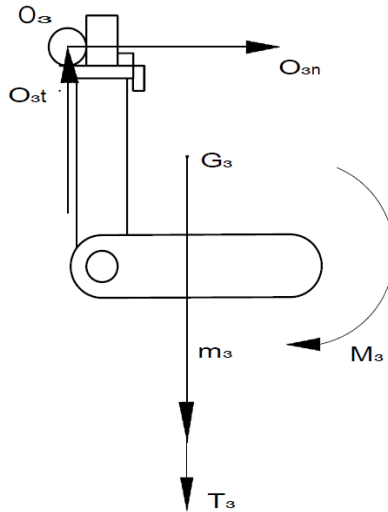


Figura 3.7.- Diagrama de Cuerpo Libre eslabón 3.

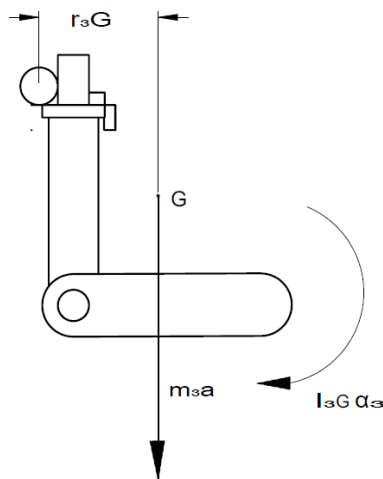


Figura 3.8.- Diagrama cinético eslabón 3.

De acuerdo a (1) para los eslabones 3 y 4 tenemos que

$$\alpha_T = 1.51 \text{ rads/ s}^2$$

El momento de inercia de éste queda determinado por

$$I_{3G} = 1.3464 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

La aplicación de las ecuaciones de movimiento de traslación queda como sigue:

$$\begin{aligned}
 + \sum \leftarrow F_{3y} &= m_3(a_{3G})_y; & -1.7(9.81) + T_3 &= 1.7a_3 \\
 + \sum \curvearrowright M_{3G} &= I_{3G}\alpha_3; & T_3(0.05 \text{ m}) - 1.7(9.81)(0.05) &= (1.3464 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(\alpha_s)
 \end{aligned}
 \quad \dots (3.2)$$

Por lo que el torque es

$$M_{30} = 16.9 (0.11) = 1.86 \text{ N} \cdot \text{m} = 19 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Para el segundo eslabón se tiene los siguientes datos

Tabla 3.8. Datos del eslabón 2.

Datos	Símbolo	Magnitud	Unidad
Masa de eslabón 2, 3 y 4	m_2	6.30	kg
Distancia al centro de gravedad	r_{2G}	0.30	m
Velocidad del eslabón	ω_{2f}	2.514	Rads / s ²

En la **Figura 3.9** se muestra el diagrama de cuerpo libre del eslabón 2 y en la **Figura 3.10** el diagrama cinético.

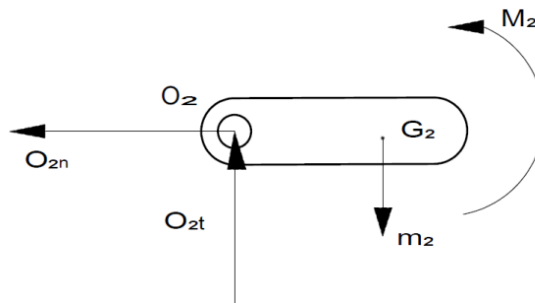
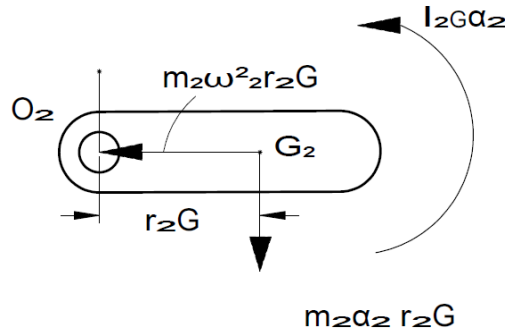


Figura 3.9.- Diagrama de Cuerpo Libre eslabón 2.



/Figura 3.10.- Diagrama cinético eslabón 2.

El momento de inercia de éste queda determinado por

$$I_{2G} = 1.3464 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

La aplicación de las ecuaciones de movimiento de rotación queda como sigue:

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{array}{l} + \\ \leftarrow \end{array} \right\} \sum F_{2n} &= m_2 \omega_2^2 r_{2G}; & O_{2n} &= (6.3 \text{ kg})(1.257 \text{ rads/s})^2(0.30 \text{ m}) \\
 \left. \begin{array}{l} + \\ \downarrow \end{array} \right\} \sum F_{2t} &= m_2 \alpha_2 r_{2G}; & -O_{2t} &= (6.3 \text{ kg})(2.514 \text{ rads/s}^2)(0.30 \text{ m}) & \dots (3.3) \\
 \left. \begin{array}{l} + \\ \curvearrowright \end{array} \right\} \sum M_{2G} &= I_{2G} \alpha_2; & O_{2t}(0.30 \text{ m}) - M_{2O} &= (0.052994 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(2.514 \text{ rads/s}^2)
 \end{aligned}$$

$$O_{2n} = 2.38 \text{ N}$$

$$O_{2t} = 4.751 \text{ N}$$

$$M_{2O} = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\tau_2 = 15.31 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Para el primer eslabón se tiene los siguientes datos

Tabla 3.9. Datos del eslabón 1.

Datos	Símbolo	Magnitud	Unidad
Masa de los eslabones 1, 2, 3 y 4	m_1	8.50	kg
Distancia al centro de gravedad	r_{1G}	0.55	m
Velocidad del eslabón	ω_{1f}	2.514	Rads / s ²

Como puede apreciarse en las Figuras 3.11 y 3.12, los diagramas de cuerpo libre y cinético del eslabón 1 son similares a los correspondientes al eslabón 2.

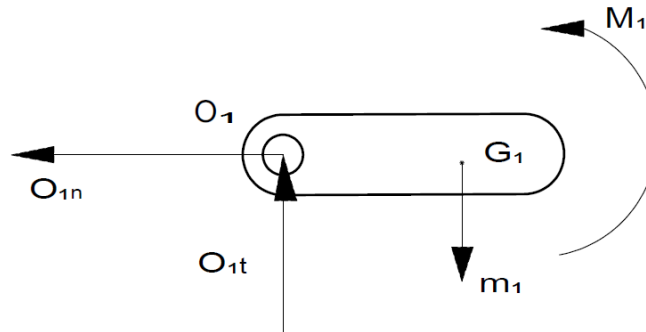


Figura 3.11.- Diagrama de Cuerpo Libre eslabón 1.

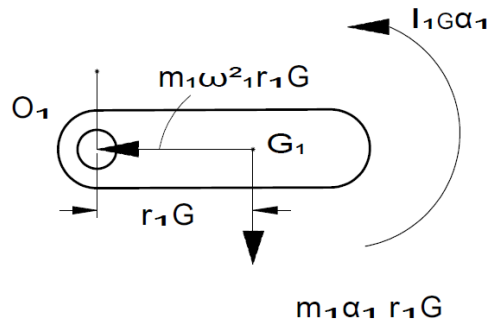


Figura 3.12.- Diagrama cinético eslabón 1.

El momento de inercia de éste queda determinado por

$$I_{1G} = 0.2697 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

La aplicación de las ecuaciones de movimiento de rotación queda como sigue:

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} + \\ \leftarrow \end{matrix} \sum F_{1n} &= m_1 \omega_1^2 r_{1G}; & O_{1n} &= (8.5 \text{ kg})(1.257 \text{ rads/s})^2(0.55 \text{ m}) \\
 \begin{matrix} + \\ \downarrow \end{matrix} \sum F_{1t} &= m_1 \alpha_1 r_{1G}; & -O_{1t} &= (8.5 \text{ kg})(2.514 \text{ rads/s}^2)(0.55 \text{ m}) & \dots (3.4) \\
 \begin{matrix} + \\ \curvearrowright \end{matrix} \sum M_{1G} &= I_{1G} \alpha_1; & O_{1t}(0.55 \text{ m}) - M_{1O} &= (0.2697 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(2.514 \text{ rads/s}^2)
 \end{aligned}$$

Al resolver

$$O_{1n} = 5.88 \text{ N}$$

$$O_{1t} = 11.75 \text{ N}$$

$$M_{10} = 5.78 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\tau_1 = 5.78 \text{ N} \cdot \text{m} \left(\frac{1 \text{ kg}}{9.8 \text{ N}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 59 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

3.7.- Sumario

En este apartado se presenta una metodología de diseño que varía con las ya conocidas y expuestas al inicio del presente capítulo. Esta metodología permite llevar a cabo el proceso de diseño del manipulador robótico de una forma sistematizada.

Se estableció las necesidades del cliente, en este caso, del proceso para poder establecer una solución que permitiera alcanzar los objetivos que inicialmente se plantearon.

REFERENCIAS

- [3.1] Ulrich K., Eppinger Steven, *Product design and development*, Ed. Mc. Graw Hill Companies, Inc., 2004.
- [3.2] Krick, E., *Introducción a la ingeniería y al diseño en ingeniería*. Ed. Limusa, pp.121, 2006.
- [3.3] Chen K., Feng X0., *Computer-aided design method for the components made of heterogeneous materials*, Elsevier, 2002.
- [3.4] Simpson T., Maier J., Mistree F., *Product platform design: method and application*, 2001.
- [3.5] Myung S., Han S., *Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method*, Elsevier, 2001.
- [3.6] Bruno Munari, “Cómo nacen los objetos”. Colección GG Diseño.
- [3.7] John Christopher Jones, “Diseñar el Diseño”. Colección GG Diseño.
- [3.8] Juvinall, Robert. “Fundamentals of Machine Component Desing”, 2003.
- [3.9] Capuz Rizo, Salvador. “Introducción a la Ingeniería de Producción”. Ed. Alfaomega. Barcelona, 2000.
- [3.10] Craig, R., *Mecánica de materiales*, Ed. Patria, pp.48-49,737-740, 2007.
- [3.11] Askeland, D., Phule, P., *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 4ª Edición Ed. Thomson, pp. 246, 2006.

-
- [3.12] Degarmo, E., Black, J., Kohser, R., *Materials and Processes in Manufacturing*, Ed. Wiley, 9th edition, pp. 373 - 392, 2003.
- [3.13] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G., *Mechanical Engineering Design*, Ed. McGraw Hill, pp. 4, 2004
- [3.14] Shigley, J., Mitchell, L., *Diseño en ingeniería mecánica*. Ed. Mcgraw-hill, pp. 10, 1985.
- [3.15] Ullman, D., G., *El proceso de diseño mecánico*, Mc Graw Hill, 4^a edición, pp.12-67, 2009.
- [3.16] Licker, M., *Dictionary of Scientific and Technical Terms*, Ed. McGraw-Hill, 6th edition, pp. 2015, 2002.

CAPÍTULO 4

MANUFACTURA DEL PROTOTIPO

4.1 Generalidades

Aunque los diccionarios definen prototipo sólo como un sustantivo, en la práctica dicha palabra se utiliza como sustantivo, verbo y adjetivo [1].

1. Los diseñadores industriales producen prototipos de sus conceptos.
2. Los ingenieros crean un prototipo de un diseño.
3. Los desarrolladores de software escriben programas prototipo.

En este trabajo, se define un prototipo como “una aproximación hacia el producto final junto con una o más dimensiones de interés”. Bajo esta definición, cualquier entidad que exhiba cuando menos un aspecto del producto de interés para el equipo de desarrollo, puede ser visto como un prototipo. Esta definición varía del uso estándar en que se incluyen muy diversas formas de bocetos conceptuales de un prototipo, modelos matemáticos y versiones de preproducción completamente funcionales del producto. La creación de prototipos es el proceso de desarrollo que encauza hacia una aproximación del producto.

4.2 Modelado 3D

Las ventajas del modelado por computadora incluyen la capacidad de visualizar fácilmente la forma tridimensional del diseño; la capacidad de calcular de manera automática propiedades físicas como lo son la masa, el volumen, los momentos inerciales; y la eficiencia que surge de la creación de una y sólo una descripción canónica del diseño, del cual, se pueden crear descripciones más enfocadas, como son las vistas en sección transversal.

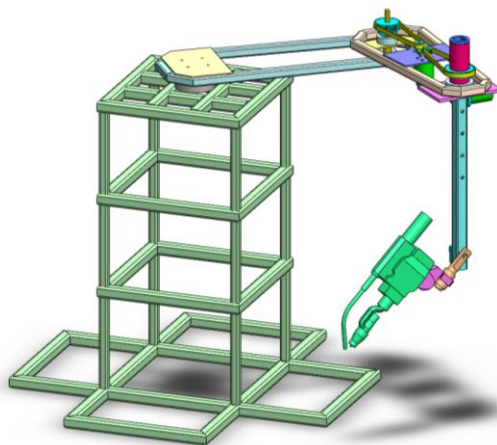


Fig. 4.1 Modelo por computadora en 3D del brazo robótico tipo SCARA

También los modelos por computadora fueron útiles para detectar interferencias geométricas entre las partes, que son la representación subyacente para análisis más enfocados, como la cinemática o los esfuerzos. Este modelo por computadora es considerado el primer prototipo del presente trabajo al que comúnmente se le denomina “Prototipo Virtual”. Con el empleo de este software fueron eliminados más de dos prototipos físicos.

4.3 Prototipos Rápidos.

En 1984, 3D Systems introdujo el primer sistema comercial de fabricación de “Prototipos Rápidos”. Esta tecnología llamada Estereolitografía crea objetos físicos directamente de los modelos por computadora 3D, en este caso particular se empleó una máquina de impresión 3D que trabaja mediante el método FDM. Esta tecnología funciona creando un objeto, una capa transversal a la vez, depositando un material líquido que puede ser Nylon o Policarbonato.

La tecnología de impresión 3D permite que se pueda crear prototipos tridimensionales realistas con mayor anticipación y de un menor costo. Utilizándolos de manera apropiada, estos prototipos reducen el tiempo de desarrollo del producto. Además esta tecnología se emplea para concebir rápido y con un costo reducido conceptos de distintos productos.

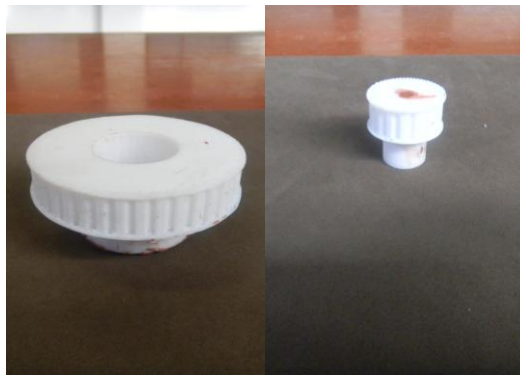


Fig. 4.2 Prototipos rápidos

En la **Figura 4.2.**, se muestra prototipos rápidos de las poleas sincrónicas calculadas en el capítulo 3 y que fueron empleadas durante la manufactura del manipulador como elementos positivos para la fabricación de los moldes de silicón.

Además fabricar moldes de silicón para las poleas sincrónicas, también se elaboraron para la cremallera, piñón y bujes, como se muestra en la **Figura 4.3**.



Fig. 4.3 Moldes de silicón

4.4 Planeación del Prototipo.

A continuación se presenta los pasos que se siguieron en el desarrollo del prototipo.

Etapa 1: Definición del propósito del prototipo

Existen cuatro propósitos de los prototipos: aprendizaje, comunicación, integración y verificación [1]. Para definir el propósito del prototipo, se enlistaron las necesidades específicas de aprendizaje y comunicación.

Para el prototipo del brazo robótico tipo SCARA, el propósito del mismo es determinar la movilidad de los eslabones a partir del diseño mecánico mediante la implantación de una aplicación de control. Este prototipo de “aprendizaje” estaba muy enfocado y no existían otros propósitos principales de este prototipo.

Etapa 2: Nivel de aproximación del prototipo.

La planeación de un prototipo requiere que se defina el grado al cual se aproxima al producto final. Se debe considerar si es necesario un prototipo físico, o si un prototipo analítico se adaptaría mejor a las necesidades. En la mayoría de los casos, el mejor prototipo es el más simple que servirá a los propósitos establecidos en la etapa 1.

Tabla. 4.1 Patrones de planeación del prototipo.

Nombre del prototipo	Brazo Robótico tipo SCARA
Propósito	<p>¿qué configuración mecánica producirá el menor esfuerzo entre los eslabones 1 y 2? (aprendizaje)</p> <p>¿Cuál es la variación de posición de los eslabones impulsados por motores que a su vez son manipulados por un control de aplicación? (aprendizaje)</p> <p>¿El diseño mecánico y electrónico generan los movimientos esperados a través del control aplicado? (integración)</p>
Nivel de aproximación	<p>Dimensiones de trabajo como está planeado para el diseño de producción.</p> <p>Características técnicas de motores como fueron calculados durante el diseño.</p> <p>Tracción mecánica y configuración de los grados de libertad conforme al producto final.</p>
Perfil del plan de prueba	<p>Desplazar el eslabón 1 manteniendo el resto de los eslabones en forma inmóvil.</p> <p>Repetir el proceso anterior para los eslabones 2, 3 y 4.</p> <p>Desplazar los eslabones 1 y 2 manteniendo el resto de los eslabones en forma inmóvil.</p> <p>Repetir el proceso anterior para las siguientes combinaciones: 1 y 3, 1 y 4, 2 y 3, 2 y 4, 3 y 4.</p> <p>Desplazar los eslabones 1, 2 y 3, manteniendo inmóvil el eslabón 4.</p> <p>Repetir el proceso anterior manteniendo inmóvil el eslabón 1, luego el 2 y por último el 3.</p> <p>Desplazar los cuatro eslabones al mismo tiempo buscando ir desde la posición de home hasta un punto determinado.</p>

Para el brazo robótico de nuestro estudio se decidió que los atributos del producto que requerían aproximación eran las dimensiones de trabajo, el sistema de tracción, los motores, el circuito electrónico así como el control a utilizar. Todos los otros aspectos fueron ignorados incluyendo el color, la carcasa que lo cubrirá y el proceso final por el que será manufacturado. En el capítulo 2, se estableció el prototipo analítico y se consideró que era necesario el prototipo físico para verificar el análisis y comparar los resultados teóricos contra los reales. Se determinó que el cojinete colocado en la base soportaba una gran parte del peso de los eslabones al grado de eliminar de los cálculos la fuerza ejercida por la fuerza de gravedad, lo que permitiría emplear motores de una menor capacidad.

Etapa 3: El plan experimental

En la mayoría de los casos, el uso de un prototipo en el desarrollo de un producto puede ser considerado como un experimento. La buena práctica experimental ayuda a asegurar la extracción del máximo valor de la actividad de creación de prototipos. El plan experimental incluye la identificación de las variables del experimento, el protocolo de prueba, una indicación de cuáles son las medidas que se van a desarrollar, y un plan para analizar los datos resultantes.

Etapa 4: Programa para la obtención, creación y prueba

Debido a que la construcción y prueba de un prototipo se puede considerar como un subproyecto dentro del proyecto de desarrollo en general. Para definir el esfuerzo de creación de prototipos, son particularmente importantes tres fases. En la primera, se define cuando estarán listas las partes para el ensamble. En la segunda, se define cuando el prototipo será probado por primera vez. En la tercera fase, se define cuando se espera concluir las pruebas y se produzcan los resultados finales.

4.5 Construcción del Prototipo (Primera Versión).

Inicialmente se planeó construir el prototipo en madera, específicamente en MDF, cuyas características permitirían mantener la rigidez necesaria en su estructura y por su fácil obtención y bajo costo.

En un inicio no se presentaron obstáculos significativos para el ensamble entre componentes de madera; sin embargo, los problemas aparecieron cuando se intentó ensamblar los componentes metálicos, esto debido a la falta de maquinaria especializada para llevar a cabo trazos de precisión.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestra hasta donde se avanzó en la manufactura del manipulador con este tipo de materiales.

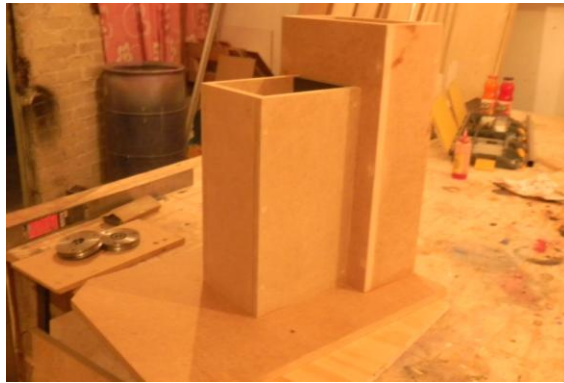


Fig. 4.4. Base del Brazo (Eslabón 0)



Fig. 4.5. Eslabones 2 y 3

4.6 Construcción del Prototipo (Segunda Versión).

Dado que el proceso de diseño es iterativo y flexible; y en base a los resultados obtenidos en la fabricación del prototipo con madera MDF se decidió realizar la fabricación en metal. Esta decisión repercutió decididamente en el diseño de detalle, de tal suerte que se realizó, bajo el mismo concepto, un rediseño que difería en gran medida del diseño original.

Tomar esta decisión trajo grandes ventajas, entre las que destacan:

- Materias primas comerciales.
- Facilidad de maquinado.
- Posibilidad de soldar los componentes.
- Rigidez y estabilidad en la estructura.
- Fácil ajuste de los componentes.
- Robustez.

A continuación se muestra como se realizó la construcción del prototipo con componentes metálicos.

4.7 Construcción Mecánica.

En las Figuras 4.6 a 4.9 se muestran los eslabones por separado



Fig. 4.6. Eslabón 0

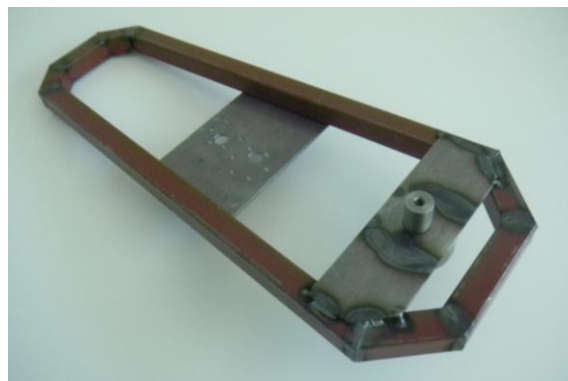


Fig. 4.7. Eslabón 1

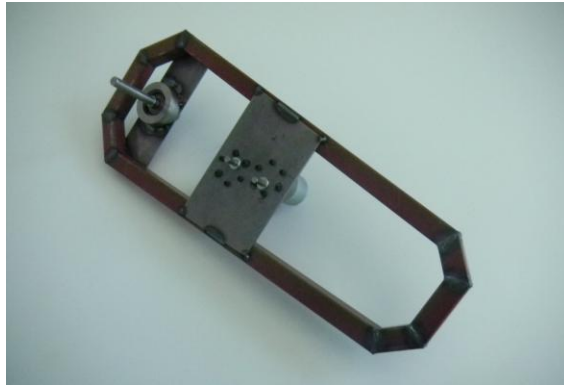


Fig. 4.8. Eslabón 2



Fig. 4.9. Eslabón 3

En la **Figura 4.10** se aprecia el manipulador SCARA ensamblado.



Fig. 4.10. Ensamble

4.7.1 Sistema de tracción.

Como elemento de tracción para dar movimiento a cada articulación se emplea el motor con reductor con relación de engranaje 122:1



Fig. 4.11. Motores y engranes empleados en las articulaciones 2, 3 y 4

Este motor funciona con voltajes que van de los 6 a los 12 Volts y que puede proporcionar una velocidad máxima de 80 r.p.m.

Tabla. 4.2 Características del motor con reductor.

CARACTERÍSTICAS	A 12 VOLTS	A 6 VOLTS
VELOCIDAD	80 R.P.M.	41 R.P.M
CORRIENTE SIN CARGA	300 mA	250 mA
CORRIENTE MÁXIMA	5A	2.5 A
TORQUE MÁXIMO	18 kg·cm	9 kg·cm
DIMENSIONES	Ø 37 mm x 57 mm	
PESO	193 GRAMOS	
LARGO DEL EJE	12 mm EN FORMA DE "D"	

De acuerdo a las especificaciones señaladas para el motor en la [Tabla 4.2](#) y a los cálculos obtenidos en las [ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4](#) se deduce que para proporcionar el movimiento en cada articulación son necesarios:

- 1 Motor para la articulación 4,
- 1 Motor para la articulación 3,
- 2 Motores para la articulación 2 y
- 1 Motor para la articulación 1

Lo anterior se aprecia en la **Figura 4.12**.



Fig. 4.12. Arreglo de motores en el SCARA.

4.7.2 Transmisión.

El movimiento generado por los motores en las respectivas articulaciones se trasmite a los eslabones a través de bandas dentadas colocadas entre poleas sincrónicas de diferentes diámetros y número de dientes, la relación de movimiento de estas poleas fue calculado en el capítulo 3. Las características técnicas de las poleas sincrónicas se muestran en la **Tabla 4.3**. y de la banda en la **Tabla 4.4**.

Tabla. 4.3 Características técnicas de poleas sincrónicas.




Descripción	Figura	No. de dientes	Paso	Ancho	Diámetro del paso
P12XL037-PB		12	1/5"	9/16"	0.764"
P32XL037-PB		32	1/5"	9/16"	2.037"

Tabla. 4.4 Características técnicas de la banda sincrónica.

Descripción	Figura	No. de dientes	Paso	Ancho	Longitud (pulg.)
160 XL		80	1/5"	3/8"	16

En la **Figura 4.13** se muestra a detalle el acoplamiento de las poleas sincrónicas y las bandas dentadas.

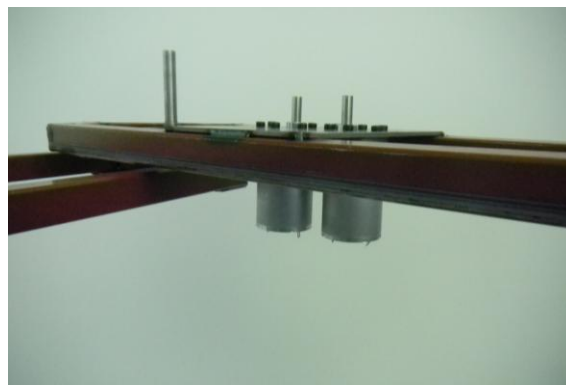


Fig. 4.13. Transmisión en el SCARA.

4.8.- Sumario

El desarrollo del producto casi siempre requiere la construcción y prueba de los prototipos. Un prototipo es una aproximación del producto en una o más dimensiones de interés.

El prototipo físico materializado fue la consecuencia de los prototipos analítico y virtual desarrollados con anterioridad. Se usó el prototipo analítico para determinar el rango de las dimensiones de trabajo, la fuerza de los motores y la eficiencia de la configuración mecánica que posteriormente fue investigada y verificada por el prototipo físico.

Los prototipos se utilizan para el aprendizaje, la comunicación, la integración y la verificación. Aunque se pueden utilizar todo tipo de prototipos para estos propósitos, los prototipos físicos

por lo general son mejores para la comunicación y los integrales para la integración y las verificaciones.

Las tecnologías de modelado por computadora en 3D y la fabricación de prototipos rápidos han reducido el costo y tiempo relativos que se requieren para crear prototipos.

Los prototipos verificados se definen en el plan de proyecto de desarrollo del producto. El número de dichos prototipos y su programación en tiempos es uno de los elementos clave del plan de desarrollo global.

REFERENCIAS

- [4.1] Ulrich K., Eppinger Steven, *Product design and development*, Ed. Mc. Graw Hill Companies, Inc., 2004.
- [4.2] Groover, M., *Fundamentos de manufactura moderna*, Prentice Hall hispanoamericana, pp. 3, 655, 677, 828 - 831, 1997
- [4.3] Iscar, *Complete Machine solutions*, Member IMC Group Iscar, pp. B32, B61, 2006
- [4.4] Oberg, E., Jones, F., Horton, H., Ryffel, H., *Machinery's Handbook*, Industrial Press, 28 Edition, 2008 pp. 3028.
- [4.5] Real Academia Española, *Diccionario de la lengua española* - Vigésima segunda edición, 2001.

CAPÍTULO 5

INTERFAZ

5.1 Generalidades

En el capítulo 2 se obtuvo el modelo matemático del brazo, en este capítulo se controla teóricamente mediante simulación el sistemas a través de un algoritmo y para el caso del brazo se contrastarán los resultados del algoritmo de control propuesto tanto para los valores teóricos obtenidos mediante simulaciones como para los resultados experimentales observados en el laboratorio.

El objetivo primordial del control dinámico de un robot es procurar que las trayectorias articulares $\theta(t)$ realmente seguidas por el robot sean lo más parecidas posibles a las propuestas por el usuario o programador, para ello, es necesario auxiliarse de varias herramientas matemáticas como son:

1. El modelo dinámico del robot y,
2. La teoría de control retroalimentado (análisis y diseño), la cual involucra conceptos tales como:
 - Representación interna,
 - Representación en el espacio de estados,
 - Teoría de sistemas no lineales,
 - Estabilidad,
 - Control PID,
 - Control adaptable, entre otros.

5.2 Microcontroladores.

Existe una gran diferencia entre los microprocesadores y microcontroladores en cuanto a sus aplicaciones, pues los microprocesadores se han desarrollados fundamentalmente hacia el manejo de ordenadores personales o estaciones de trabajo, donde se requiere una elevada potencia de cálculo, un gran manejo de memoria y una gran velocidad de procesamiento. En cambio los microcontroladores se usan en automoción, en equipos de comunicaciones y de telefonía o en instrumentos de control, es decir en aplicaciones donde el microcontrolador debe realizar un número pequeño de tareas, al menor costo posible.

En estas aplicaciones, el microcontrolador ejecuta un programa almacenado en su memoria, el cual trabaja con algunos datos almacenados temporalmente e interactúa con el exterior a través de líneas de entrada o salida que dispone.

Hay varias características que son deseables en un microcontrolador:

- Recursos de entrada salida. Más que en la capacidad de cálculo del microcontrolador, muchas veces se requiere hacer énfasis en los recursos de entrada o salida del dispositivo, tales como el manejo individual de líneas de entrada o salida, el manejo de interrupciones, señales analógicas, etc.
- Espacio optimizado. Se trata de tener en el menor espacio posible, y a un costo razonable, los elementos esenciales para desarrollar una aplicación. Dado el número de terminales que puede tener un circuito integrado viene limitado por las dimensiones de su encapsulado, el espacio se puede optimizar haciendo que unos mismos terminales realicen funciones diferentes como conversión de analógico a digital de señales o como terminales de comunicación rs232.
- Bajo consumo de energía. Dado que hay muchas aplicaciones donde se desea utilizar baterías como fuentes de alimentación, es altamente deseable que el microcontrolador consuma poca energía.

Dependiendo del tipo de aplicación se selecciona el tipo de microcontrolador a usar en dicha aplicación, es importante señalar que existen varias clases de microcontroladores en el mercado, los microcontroladores de gama alta y los microcontroladores de gama media, los cuales se diferencian uno del otro en algunas aplicaciones en donde se requiera mas memoria o más capacidad de procesamiento.

El microcontrolador ejecuta un programa que se encuentra almacenado en su memoria, dicho programa es diseñado en un compilador, donde este se encarga de traducir el lenguaje o instrucciones que se escriben en un software, a un lenguaje que entienda el microcontrolador

(lenguaje maquina o código maquina), en la actualidad se disponen de varios tipos de lenguajes de programación los cuales se encuentran agrupados en lenguajes de alto nivel y lenguajes de bajo nivel.

5.3 La interfaz.

La interfaz RS-232 está diseñada para distancias cortas, de hasta 15 metros según la norma, y para velocidades de comunicación bajas, de no más de 20 Kilobits/segundo. A pesar de ello, muchas veces se utiliza a mayores velocidades con un resultado aceptable. La interfaz puede trabajar en comunicación asíncrona o síncrona y tipos de canal simplex, half dúplex o full dúplex. En un canal simplex los datos siempre viajarán en una dirección, por ejemplo desde DCE (*Data Communication Equipment*, Equipo de Comunicación de datos) a DTE (Equipo terminal de datos). En un canal half dúplex, los datos pueden viajar en una u otra dirección, pero sólo durante un determinado periodo de tiempo; luego la línea debe ser conmutada antes que los datos puedan viajar en la otra dirección. En un canal full dúplex, los datos pueden viajar en ambos sentidos simultáneamente. Las líneas de handshaking de la RS-232 se usan para resolver los problemas asociados con este modo de operación, tal como en qué dirección los datos deben viajar en un instante determinado.

Si un dispositivo de los que están conectados a una interfaz RS-232 procesa los datos a una velocidad menor de la que los recibe deben de conectarse las líneas handshaking que permiten realizar un control de flujo tal que al dispositivo más lento le dé tiempo de procesar la información. Las líneas de “hand shaking” que permiten hacer este control de flujo son las líneas RTS y CTS. Los diseñadores del estándar no concibieron estas líneas para que funcionen de este modo, pero dada su utilidad en cada interfaz posterior se incluye este modo de uso.

Las UART o USART (Transmisor y Receptor Síncrono Asíncrono Universal) se diseñaron para convertir las señales que maneja la CPU y transmitir las al exterior. Las USART deben resolver problemas tales como la conversión de voltajes internos del DCE con respecto al DTE, gobernar las señales de control, y realizar la transformación desde el bus de datos de señales en paralelo a serie y viceversa. Debe ser robusta y deberá tolerar circuitos abiertos,

cortocircuitos y escritura simultánea sobre un mismo pin, entre otras consideraciones. Es en la UART en donde se implementa la interfaz.

Generalmente cuando se requiere conectar un microcontrolador (con señales típicamente entre 3.3 y 5 V) con un puerto RS-232 estándar se utiliza un driver de línea, típicamente un MAX232 o compatible, el cual mediante dobladores de voltaje positivos y negativos permite obtener la señal bipolar (típicamente alrededor de +/- 6V) requerida por el estándar.

Para los propósitos de la RS-232 estándar, una conexión es definida por un cable desde un dispositivo a otro. Hay 25 conexiones en la especificación completa, pero es muy probable que se encuentren menos de la mitad de éstas en una interfaz determinada. La causa es simple, una interfaz full dúplex puede obtenerse con solamente 3 cables.

Tabla 5.1 Nombres y funciones de los pines de un DB9.

PIN	EIA	CCITT	E/S	Función DTE-DCE
1	CG	AA 101		Chassis Ground
2	TD	BA 103	Salida	Transmit Data
3	RD	AA 104	Entrada	Receive Data
4	RTS	CA 105	Salida	Request To Send
5	CTS	CB 106	Entrada	Clear To Send
6	DSR	CC 107	Entrada	Data Set Ready
7	SG	AB 102	---	Signal Ground
8	DCD	CF 109	Entrada	Data Carrier Detect
9*			Entrada	Pos. Test Voltage

Existe una cierta confusión asociada a los nombres de las señales utilizadas, principalmente porque hay tres convenios diferentes de denominación (nombre común, nombre asignado por la EIA, y nombre asignado por el CCITT).

En la [Tabla 5.1](#) se muestra los tres nombres junto al número de pin del conector al que está asignado (los nombres de señal están desde el punto de vista del DTE (por ejemplo para Transmit Data los datos son enviados por el DTE, pero recibidos por el DCE) y el conector DB9 utilizado para la conexión.

5.4 Simulación en Proteus.

La PC maneja valores de voltajes diferentes a los voltajes que generalmente se manejan en circuitos con microcontroladores es por ello que para poder acoplar un circuito que trabaje con microcontroladores se utiliza el Max232, este es un integrado que realiza la función de convertir las señales que envía la PC a niveles TTL. En la [Figura 5.1](#) se observa un circuito con el Max232 y la conexión con el PIC16F877. El circuito consta de cuatro capacitores de 1uf para un Max232 tipo “N”, es importante resaltar que existen varias clases de circuitos integrados Max232 en el mercado y esto hace que cambie el valor de los capacitores, la configuración de conexión de los capacitores es la misma para todos los tipos de Max232.

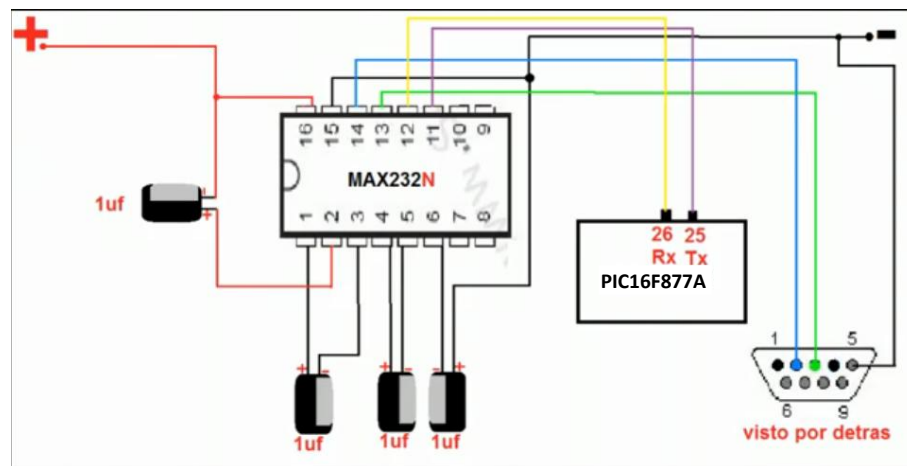


Fig. 5.1 Circuito Max232 y conexión PIC-PC mediante un conector DB9

En la [Figura 5.2](#) se aprecia el arreglo electrónico empleado para el control de los eslabones del manipulador SCARA. Se emplea el PIC16F877A que contiene el programa de control de los

eslabones. El arreglo consta de cinco motores de corriente directa, tres de ellos (eslabones 1, 3 y 4) conectados a un determinado pin de salida del microcontrolador. En el caso del eslabón 2, se aprecia la conexión en paralelo de dos motores de corriente directa que a su vez están conectados a uno de los pines del PIC. La razón de lo anterior es que se requiere manipular los dos motores de manera simultánea pero con sentidos de giro opuestos para realizar el movimiento deseado.

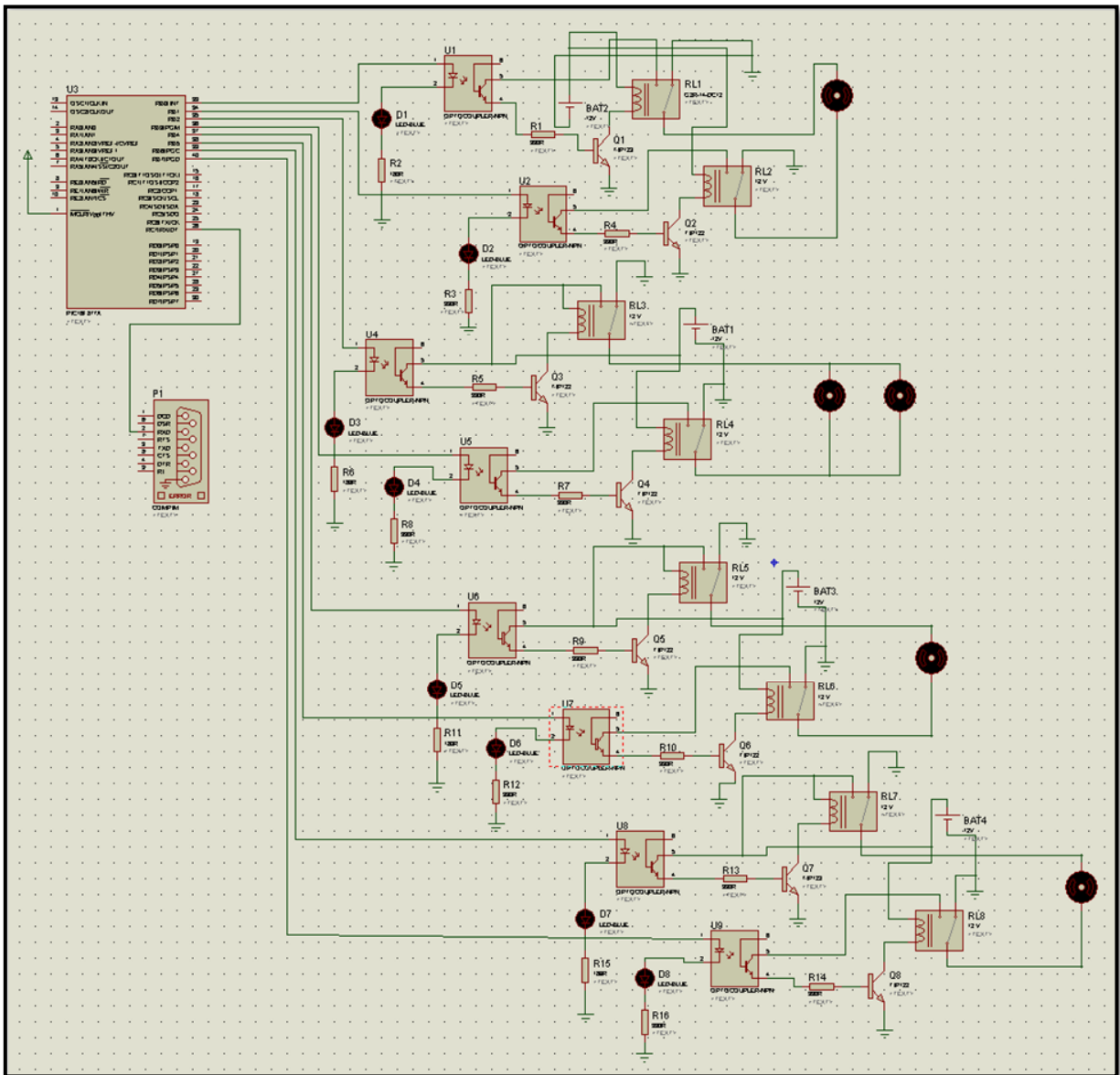


Fig. 5.2 Circuito simulado en Proteus

Para programar el PIC 16F6877A se empleó el Compilar C CCS y el programa puede ser consultado en el Anexo “C” de este trabajo.

5.5 Interfaz Visual basic.

La **Figura 5.3** muestra el formulario y los controles de la interfaz del proyecto. La interfaz se compone de un botón de comando para la conexión de un puerto, que previamente ha sido seleccionado en el combo desplegable para la selección del puerto a emplear. También se presenta un par de botones para operar el sentido de giro de cada uno de los eslabones. Uno de los eslabones opera con dos motores conectados en paralelo pero con un sentido de giro opuesto. Finalmente se tiene un botón para salir del programa. Las propiedades y los valores de los controles se muestran en el Anexo A y la programación de los controles se especifica en el anexo B.



Fig. 5.3 Interfaz en Visual Basic

Inicialmente se selecciona un puerto disponible de la computadora para establecer la comunicación la el circuito electrónico.

En cuanto se da la conexión se tiene la disponibilidad de manipular los motores del manipulador mediante esta máscara. Se tiene dos botones para cada uno de los eslabones, esto

se debe a que el motor tiene dos sentidos de giro. Los botones que se encuentran debajo de cada uno de los eslabones tienen una letra subrayada que indica la letra del teclado de la computadora que debe presionarse para hacer girar cualquiera de los motores.

Mientras se mantenga presionada la tecla que corresponda al motor y sentido de giro seleccionado se estará enviando un impulso hacia el circuito y por lo tanto el motor girará, si se suspende la presión sobre la tecla correspondiente, entonces el motor se detendrá en forma inmediata.

5.6 Sumario

En esta sección se presentó la interfaz en Visual Basic que es empleada para el circuito de potencia de los motores del manipulador.

El programa del microcontrolador fue desarrollado en C. El microcontrolador usado para este circuito fue el PIC 16F877A.

REFERENCIAS

- [5.1] Ogata Katsuhiko, "*Ingeniería de Control Moderna*", 4ª Edición, Pearson - Prentice Hall Hispanoamericana, México, 2003, ISBN13: 9788420536781, ISBN: 8420536784.
- [5.2] Craig John J., "*Robótica*", 3ª Edición, Pearson Educación, S.A., México, 2006, ISBN: 970-26-0772-8.
- [5.3] Kelly, R. y Santibáñez V., "*Control de Movimiento de Robots Manipuladores*", Pearson Educación, S.A., Madrid, 2003, ISBN: 84-205-3831-0.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES

El desarrollo de nuevos productos, procesos o servicios se logran siguiendo una metodología y si se desea obtener resultados satisfactorios en tiempos razonables de ejecución, ésta debe estar bien fundamentada. Este trabajo no es la excepción, dado que, de manera general todo diseño es respaldado por la aplicación de etapas que van desde el planteamiento del problema, hasta las diversas formas de resolver, proponer y evaluar las soluciones más viables para fabricar, manufacturar y ensamblar un producto requerido.

La metodología planteada en este trabajo permite abarcar todas las etapas en el desarrollo del producto de una forma concisa y clara que al mismo tiempo defina claramente las metas a alcanzar en cada etapa. Se sabe que todo proceso de diseño es iterativo y en este caso la iteración se da desde la primera fase hasta la última permitiendo llevarla a cabo incluso entre etapas no consecutivas.

La metodología mostrada aplicada al diseño del brazo robótico tipo SCARA ha generado una gran cantidad de información detallada y simplificada, que describe la concepción del mismo a través de un modelo funcional desarrollado en la etapa del diseño conceptual, éste se concreta en un modelo estructural mediante la evaluación de funciones, acentuando las bases en dibujos, croquis, esquemas, cálculos y planos durante la etapa del diseño de detalle llegando incluso hasta la manufactura y pruebas iniciales de funcionamiento.

Las metas de diseño en su mayoría se han cumplido, quedando pendiente la realización de uno o varios lotes experimentales y de lotes piloto para alcanzar en el momento adecuado una producción en serie.

Los conceptos aplicados para el estudio de la cinemática y la dinámica son eficientes en este caso particular y que permiten hacer el análisis para cualquier otro trabajo, desde la obtención de los parámetros de posición, velocidad y aceleración angular, hasta el resultado de los pares o torques angulares para cada articulación de revolución y la generación de trayectorias mediante la interacción de todas estas herramientas en la solución de la cinemática inversa y la dinámica.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda para trabajos futuros:

Aplicar la presente metodología de diseño al desarrollo de distintos tipos de productos, principalmente de sistemas mecánicos, aunque puede extenderse al desarrollo de sistemas electromecánicos o incluso mecatrónicos.

Experimentar e implementar distintos algoritmos de control a fin de mejorar el desempeño del diseño mecánico del brazo robótico de este estudio. Dado que en esta tesis el desarrollo sólo cubrió la parte del circuito de potencia, es necesario aplicar un sistema de control que puede ir desde el clásico PID hasta los sistemas que involucran inteligencia artificial. Esto exigirá que el sistema mecánico sea cada vez más eficiente con el fin de equilibrar el desarrollo de control y de circuito electrónico.

Otra área de oportunidad que es latente involucra el desarrollo de nuevas interfaces, con mayores prestaciones y sobre todo con una comunicación más dinámica entre el usuario y el manipulador robótico.

ANEXOS

ANEXO "A"

Controles utilizados en el Programa de Visual Basic para la Interfaz de Usuario

Control	Propiedad	Valor	Control	Propiedad	Valor
Form	Name	Form1	Label	Name	lblEslabon03
	Caption	CONTROL BRAZO SCARA		Caption	Eslabón 03
	Heigth	6300		Font	Calibri, Bold, 11
	Width	9000		Heigth	400
PictureBox	Name	Picture1		Width	2200
	Heigth	2900		Left	1200
	Width	4700		Top	2900
	Left	100	Label	Name	lblEslabon04
	Top	100		Caption	Eslabón 04
Label	Name	lblEslabon01		Font	Calibri, Bold, 11
	Caption	Eslabón 01		Heigth	400
	Font	Calibri, Bold, 11		Width	2200
	Heigth	400		Left	5200
	Width	2200		Top	2900
	Left	1200	TextBox	Name	TxtEnviar
	Top	1200		Text	
Label	Name	lblEslabon02		Visible	False
	Caption	Eslabón 02		Heigth	500
	Font	Calibri, Bold, 11		Width	1300
	Heigth	400		Left	6500
	Width	2200		Top	360
	Left	5200			
	Top	1200			

Control	Propiedad	Valor	Control	Propiedad	Valor
CommandButton	Name	CmdConectar	CommandButton	Name	Command3
	Caption	&Conectar		Caption	D&erecha
	Font	Calibri, Bold, 11		Font	Calibri, Bold, 12
	Heigth	650		Heigth	600
	Width	1400		Width	1300
	Left	3800		Left	4800
	Top	360		Top	1700
	Style	Graphical		Style	Graphical
CommandButton	Name	Command1	CommandButton	Name	Command4
	Caption	&Derecha		Caption	I&zquierda
	Font	Calibri, Bold, 12		Font	Calibri, Bold, 12
	Heigth	600		Heigth	600
	Width	1300		Width	1300
	Left	800		Left	6500
	Top	1700		Top	1700
	Style	Graphical		Style	Graphical
CommandButton	Name	Command2	CommandButton	Name	Command5
	Caption	&Izquierda		Caption	&Arriba
	Font	Calibri, Bold, 12		Font	Calibri, Bold, 12
	Heigth	600		Heigth	600
	Width	1300		Width	1300
	Left	2500		Left	800
	Top	1700		Top	3400
	Style	Graphical		Style	Graphical

Control	Propiedad	Valor	Control	Propiedad	Valor
CommandButton	Name	Command6	CommandButton	Name	Command9
	Caption	A&bajo		Caption	&Salir
	Font	Calibri, Bold, 12		Font	Calibri, Bold, 11
	Heigth	600		Heigth	650
	Width	1300		Width	1400
	Left	2500		Left	3800
	Top	3400		Top	4300
	Style	Graphical		Style	Graphical
CommandButton	Name	Command7	ComboBox	Name	CmbSeleccionar
	Caption	&Horario		Caption	Seleccione un puerto
	Font	Calibri, Bold, 12		Font	Calibri, Bold, 10
	Heigth	600		Width	2300
	Width	1300		Left	1200
	Left	4800		Top	360
	Top	3400		List	Com1 Com2 Com3 Com4 Com5 Com6
	Style	Graphical	Timer	Name	Timer1
CommandButton	Name	Command8		Enabled	False
	Caption	A&ntihorario		Interval	60
	Font	Calibri, Bold, 12		Left	7200
	Heigth	600		Top	4300
	Width	1300	MSComm	Name	Puerto
	Left	6500		Settings	9600,n,8,1
	Top	3400		Left	1300
	Style	Graphical		Top	4300

ANEXO "B"**Estructura del Programa de Visual Basic para la Interfaz de Usuario**

```
Dim textout, textin As String
```

```
Private Sub CmdConectar_Click()
```

```
If CmdConectar.Caption = "&Conectar" Then
```

```
    Puerto.CommPort = Val(CmbSeleccionar.ListIndex + 1)
```

```
    Puerto.PortOpen = True
```

```
    Timer1.Enabled = True
```

```
    CmdConectar.Caption = "D&esconectar"
```

```
Else
```

```
    If CmdConectar.Caption = "D&esconectar" Then
```

```
        Timer1.Enabled = False
```

```
        Puerto.PortOpen = False
```

```
        CmdConectar.Caption = "&Conectar"
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command9_Click()
```

```
End
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Picture1_KeyDown(KeyCode As Integer, Shift As Integer)
```

```
    If KeyCode = vbKeyD Then
```

```
        Command1.BackColor = vbGreen
```

```
        TxtEnviar.Text = "D"
```

```
        textout = TxtEnviar.Text
```

```
        Puerto.Output = textout
```

```
    End If
```

```
If KeyCode = vbKeyI Then
    Command2.BackColor = vbGreen
    TxtEnviar.Text = "I"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If
```

```
If KeyCode = vbKeyE Then
    Command3.BackColor = vbGreen
    TxtEnviar.Text = "E"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If
```

```
If KeyCode = vbKeyZ Then
    Command4.BackColor = vbGreen
    TxtEnviar.Text = "Z"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If
```

```
If KeyCode = vbKeyA Then
    Command5.BackColor = vbGreen
    TxtEnviar.Text = "A"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If
```

```
If KeyCode = vbKeyB Then
    Command6.BackColor = vbGreen
    TxtEnviar.Text = "B"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If
```

```
If KeyCode = vbKeyH Then
    Command7.BackColor = vbGreen
```

```
TxtEnviar.Text = "H"
textout = TxtEnviar.Text
Puerto.Output = textout
End If

If KeyCode = vbKeyN Then
    Command8.BackColor = vbGreen
    TxtEnviar.Text = "N"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If
End Sub

Private Sub Picture1_KeyUp(KeyCode As Integer, Shift As Integer)

    If KeyCode = vbKeyD Then
        Command1.BackColor = vbButtonFace
        TxtEnviar.Text = "P"
        textout = TxtEnviar.Text
        Puerto.Output = textout
    End If

    If KeyCode = vbKeyI Then
        Command2.BackColor = vbButtonFace
        TxtEnviar.Text = "P"
        textout = TxtEnviar.Text
        Puerto.Output = textout
    End If

    If KeyCode = vbKeyE Then
        Command3.BackColor = vbButtonFace
        TxtEnviar.Text = "P"
        textout = TxtEnviar.Text
        Puerto.Output = textout
    End If
```

```
If KeyCode = vbKeyZ Then
    Command4.BackColor = vbButtonFace
    TxtEnviar.Text = "P"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If

If KeyCode = vbKeyA Then
    Command5.BackColor = vbButtonFace
    TxtEnviar.Text = "P"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If

If KeyCode = vbKeyB Then
    Command6.BackColor = vbButtonFace
    TxtEnviar.Text = "P"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If

If KeyCode = vbKeyH Then
    Command7.BackColor = vbButtonFace
    TxtEnviar.Text = "P"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If

If KeyCode = vbKeyN Then
    Command8.BackColor = vbButtonFace
    TxtEnviar.Text = "P"
    textout = TxtEnviar.Text
    Puerto.Output = textout
End If
End Sub
```

ANEXO “C”**Estructura del Programa PIC en C para el Microcontrolador PIC16F877A**

```
#include <16f877A.h>    // Librería de componentes que se empelan en la aplicación.

#fuses xt,nowdt,noprotect  // Instrucciones para el quemador o grabador de pic.

#use delay(clock=4000000) // Frecuencia de trabajo

#use RS232(baud=9600,xmit=PIN_c6,rcv=PIN_c7,bits=8) /* Librería y configuración del
USART RS232, se especifica la velocidad de transmisión y
recepción de datos que es de 9600 baudios por segundo, RC6
como la terminal de Transmisión y RC7 como la terminal de
recepción.*/

#use fixed_IO (b_outputs = PIN_B0, PIN_B1, PIN_B2, PIN_B3, PIN_B4, PIN_B5, PIN_B6,
PIN_B7)
                /* El puerto B opera como salida*/

void main(void){    // Programa Principal

    for(;;){        // Bucle infinito

        switch(getc()){ /* Se configura un switch con el valor transmitido desde la
PC al micro es decir cada que el usuario teclee o escoja una
de las letras que se programan en la interface se dará
comienzo a la sentencia programada en dicho switch.*/

            Case 'D': /* Si el usuario escoge la letra D se activara la terminal RB0 y
se deshabilitaran el resto de las terminales del puerto B*/

                output_high(PIN_B0);
                output_low(PIN_B1);
                output_low(PIN_B2);
                output_low(PIN_B3);
                output_low(PIN_B4);
                output_low(PIN_B5);
                output_low(PIN_B6);
```

```
output_low(PIN_B7);

break;           // Espera a que suceda otro evento

Case 'I':       /* Si el usuario escoge la letra I se activara la terminal RB1 y
                se deshabilitaran el resto de las terminales del puerto B*/

output_high(PIN_B1);
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
output_low(PIN_B5);
output_low(PIN_B6);
output_low(PIN_B7);

break;           // Espera a que suceda otro evento

Case 'E':       /* Si el usuario escoge la letra E se activara la terminal RB2 y
                se deshabilitaran el resto de las terminales del puerto B*/

output_high(PIN_B2);
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B1);
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
output_low(PIN_B5);
output_low(PIN_B6);
output_low(PIN_B7);

break;           // Espera a que suceda otro evento

Case 'Z':       /* Si el usuario escoge la letra Z se activara la terminal RB3 y
                se deshabilitaran el resto de las terminales del puerto B*/

output_high(PIN_B3);
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B1);
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B4);
```

```
output_low(PIN_B5);
output_low(PIN_B6);
output_low(PIN_B7);

break;           // Espera a que suceda otro evento

Case 'A':       /* Si el usuario escoge la letra A se activara la terminal RB4 y
                se deshabilitaran el resto de las terminales del puerto B*/

output_high(PIN_B4);
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B1);
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B5);
output_low(PIN_B6);
output_low(PIN_B7);

break;           // Espera a que suceda otro evento

Case 'B':       /* Si el usuario escoge la letra B se activara la terminal RB5 y
                se deshabilitaran el resto de las terminales del puerto B*/

output_high(PIN_B5);
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B1);
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
output_low(PIN_B6);
output_low(PIN_B7);

break;           // Espera a que suceda otro evento

Case 'H':       /* Si el usuario escoge la letra H se activara la terminal RB6 y
                se deshabilitaran el resto de las terminales del puerto B*/

output_high(PIN_B6);
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B1);
output_low(PIN_B2);
```

```
    output_low(PIN_B3);
    output_low(PIN_B4);
    output_low(PIN_B5);
    output_low(PIN_B7);

    break;           // Espera a que suceda otro evento

    Case 'N':       /* Si el usuario escoge la letra N se activara la terminal RB7 y
                    se deshabilitaran el resto de las terminales del puerto B*/

        output_high(PIN_B7);
        output_low(PIN_B0);
        output_low(PIN_B1);
        output_low(PIN_B2);
        output_low(PIN_B3);
        output_low(PIN_B4);
        output_low(PIN_B5);
        output_low(PIN_B6);

    break;           // Espera a que suceda otro evento

    Case 'P':       /* Cuando el usuario deje de presionar cualquiera de las
                    letras se deshabilitaran por completo el puerto B
                    ocasionando el paro de los motores*/

        output_low(PIN_B0);
        output_low(PIN_B1);
        output_low(PIN_B2);
        output_low(PIN_B3);
        output_low(PIN_B4);
        output_low(PIN_B5);
        output_low(PIN_B6);
        output_low(PIN_B7);

    break;}         // Espera a que suceda otro evento

}
}
```