



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS APLICADAS

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SCARA DE TRES
GRADOS DE LIBERTAD**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

JACKSON STEEVE HERAS ZAMBRANO

DIRECTOR: ING. MARIO CESÉN

Quito, Octubre 2015

DECLARACIÓN

Yo Jackson Steeve Heras Zambrano, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jackson Steeve Heras Zambrano

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jackson Steeve Heras Zambrano, bajo mi supervisión.

ING. MARIO CESÉN
DIRECTOR DE PROYECTO

DEDICATORIA

Al creador de todas las cosas, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado; por ello, con toda la humildad que de mi corazón, dedico primeramente mi trabajo a Dios.

De igual forma, dedico esta tesis a mis padres que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mis hermanas que siempre han estado junto a mí brindándome su apoyo. A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por acompañarme todos los días. A mis padres quienes me han consentido y apoyado en lo que me he propuesto y sobre todo han sabido corregir mis errores. A mis hermanas, sin ustedes no existiría hoy esta tesis.

A mis amigos, que durante estos años de carrera ha sabido apoyarme para continuar y nunca renunciar, gracias por su ayuda en mi proyecto.

Annabel quien me ha sabido apoyar en los proyectos importantes de mi vida, con amor y paciencia.

Los Ingenieros que supieron guiarme por el camino adecuado hasta llegar a la culminación de mi carrera. Gracias a todos los que me brindaron su ayuda en este proyecto.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 SISTEMAS MECATRÓNICOS	4
1.3 TRABAJOS PREVIOS.....	6
1.3.1 A NIVEL MUNDIAL.....	6
1.3.2 A NIVEL NACIONAL	7
1.3.3 A NIVEL LOCAL.....	8
1.4 CLASIFICACIÓN DE ROBOTS Y APLICACIONES.....	8
CAPÍTULO 2	11
INTRODUCCIÓN.....	11
2.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
2.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2.2 ESTRUCTURA DE UN ROBOT INDUSTRIAL	12
2.2.1 ESTRUCTURA MECÁNICA	12
2.2.2 ELEMENTOS TERMINALES	17
2.2.3 SISTEMA DE CONTROL	22
2.2.4 ARMARIO DE CONTROL	24
2.2.5 SISTEMA SENSORIAL	27
2.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	29
2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO	29
2.3.2 MÉTODO ORDINAL CORREGIDO DE CRITERIOS PONDERADOS.....	30
CAPÍTULO 3	38
3.1 CINEMÁTICA.....	38
3.1.1 CINEMÁTICA DIRECTA.....	38

3.1.2 CINEMÁTICA INVERSA.....	44
3.2 DINÁMICA	46
3.2.1 ECUACIONES DE EULER - LAGRANGE.....	46
3.2.2 MODELO DINÁMICO	48
3.3 CONTROL DE POSICIÓN.....	55
3.3.1 REGULACIÓN.....	55
3.3.2 CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO	56
3.4 SOFTWARE	57
3.5 DIAGRAMA DE FLUJO SCARA.....	57
3.6 DISEÑO MECATRÓNICO ROBOT SCARA	58
3.7 SOLUCIÓN MECÁNICA	59
3.7.1 BRAZO Y ANTEBRAZO.....	59
3.7.2 PISTÓN.....	66
3.7.3 GARRA (GRIPPER)	68
3.8 SOLUCIÓN ELECTRÓNICA.....	71
3.8.1 MOTORES BRAZO ANTEBRAZO	71
3.8.2 MOTORES GARRA Y PISTÓN.....	73
3.8.3 TARJETA DE COMUNICACIÓN PC-SERVO MOTORES	74
3.8.4 CABLES	75
3.8.5 REGULADORES DE VOLTAJE Y PROTECCION DE VOLTAJE	76
3.9 ENSAMBLAJE ROBOT SCARA.....	76
3.9.1 PRIMEROS ESLABONES.....	76
3.9.2 ROBOT SCARA	81
CAPÍTULO 4	83
INTRODUCCIÓN.....	83
4.1 PRUEBAS.....	83
4.2 COSTOS.....	89

4.2.1 COSTOS DIRECTOS.....	89
4.2.2 COSTOS INDIRECTOS	90
4.2.3 COSTO TOTAL ROBOT SCARA.....	90
CONCLUSIONES.....	91
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94

ANEXOS

ANEXO 1 SIMULADOR Y PROGRAMA GUIDE MATLAB

ANEXO 2 MANUAL DE USUARIO

ANEXO 3 MANUAL DE MANTENIMIENTO

ANEXO 4 CATÁLOGO DE ROBOT SCARA COMERCIAL

ANEXO 5 CATÁLOGOS DE COMPONENTES DEL ROBOT SCARA DE TRES
GRADOS DE LIBERTAD

ANEXO 6 PLANOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Comportamiento de un sistema mecatrónico general	6
Figura 1.2: Robot SCARA conformado por un manipulador serial de 4 grados de libertad	7
Figura 1.3: Robot Cartesiano	9
Figura 1.4: Robot Cilíndrico.....	9
Figura 1.5: Robot Polar	9
Figura 1.6: Robot SCARA	9
Figura 1.7: Robot Articulado.....	10
Figura 1.8: Robot Paralelo	10
Figura 2.1: Estructura de un brazo robótico [4]	11
Figura 2.2: Mecanismo de 2 grados de libertad	13
Figura 2.3: Mecanismo de 1 grados de libertad	13
Figura 2.4: Área de trabajo de un brazo robótico [5]	13
Figura 2.5: Articulación Prismática [4]	14
Figura 2.6: Articulación Rotacional [4].....	14
Figura 2.7: Articulación Cilíndrica [4]	14
Figura 2.8: Articulación Plana [4].....	14
Figura 2.9: Articulación Esférica [4]	15
Figura 2.10: Articulación Universal [4].....	15
Figura 2.11: Robot Cartesiano	15
Figura 2.12: Robot Articulado.....	15
Figura 2.13: Robot SCARA	16
Figura 2.14: Robot Cilíndrico.....	16
Figura 2.15: Robot Esférico o Polar	16
Figura 2.16: Elemento terminal tipo Muñeca[7].....	18
Figura 2.17: Elemento terminal, garra mecánica [4].....	19
Figura 2.18: Robot cristalero con elemento terminal tipo ventosa [8].....	19
Figura 2.19: Elemento terminal con sensor [4].....	20
Figura 2.20: Robot con lijadora como herramienta terminal [9].....	21
Figura 2.21: Robot con Intercambiador de Herramientas como elemento terminal [10]	21
Figura 2.22: Robot con Unidad de Giro como elemento terminal [7].....	22

Figura 2.23: Sistema en lazo abierto	22
Figura 2.24: Sistema en lazo cerrado.....	23
Figura 2.25: Sistema en lazo cerrado utilizado en el abastecimiento de agua del tanque de inodoro [11]	23
Figura 2.26: Armario de Control [12]	25
Figura 2.27: Dispositivos de entrada y/o salida [7]	26
Figura 2.28: Interfaz de Usuario de Robot Scara [7]	26
Figura 2.29: Sensor Interno de ángulo (posición) por medio de magnetos [13]	27
Figura 2.30: Sensor Externo, de distancia por cinta [13].....	27
Figura 2.31: Recipiente plástico a ser transportado.	30
Figura 3.1: Robot SCARA de dos juntas rotacionales y una junta prismática	38
Figura 3.2: Sistemas de referencia de articulaciones de robot [15].....	39
Figura 3.3: Parámetros de análisis en Matriz Denavit - Hartenberg [15].....	40
Figura 3.4: Cinemática de Robot SCARA	41
Figura 3.5: Diagrama del robot SCARA de tres grados de libertad	42
Figura 3.6: Diagrama del robot SCARA.	49
Figura 3.7: Diagrama de bloques control PD.....	56
Figura 3.8: Diagrama de flujo robot SCARA.....	57
Figura 3.9: Diseño mecatrónico robot SCARA	58
Figura 3.10: Diagrama de cuerpo libre eslabón.....	59
Figura 3.11: Sección transversal tipo C.....	59
Figura 3.12: Sección transversal de los indicadores de sección	60
Figura 3.13: Sección transversal de los indicadores de sección	61
Figura 3.14: Inercia en X'	61
Figura 3.15: Diagrama de cuerpo libre eslabón robot SCARA	62
Figura 3.16: Diagrama de deformaciones eslabón robot SCARA	64
Figura 3.17: Datos mecánicos del pistón [22].....	66
Figura 3.18: Diagrama de diseño	67
Figura 3.19: Gripper	68
Figura 3.20: Diagrama de cuerpo libre	69
Figura 3.21: Diagrama de diseño	69
Figura 3.22: Servo motor SPG5685A-45 [9].....	72
Figura 3.23: Servo motor diagrama SPG5685A-450 [9].....	73

Figura 3.24: Servo motor MG996R [9]	73
Figura 3.25: 8 servo controller [9].....	74
Figura 3.26: cables de izquierda a derecha: db9 hembra, 22awg, gemelo N 18 [9]	75
Figura 3.27: Regulador BEC-5-50 (IZQ), Power Supply 12V, 2.5A [9].....	76
Figura 3.28: Eslabón 1 prototipo 1.0	78
Figura 3.29: Prototipo 2.0.....	80
Figura 3.30: Prototipo 3.0.....	81
Figura 3.31: Robot SCARA	81
Figura 4.1: Robot SCARA	84
Figura 4.2: Movimiento sin controlador	85
Figura 4.3: Control proporcional derivativo.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Clasificación de Robots y sus Aplicaciones [3].....	9
Tabla 2.1: Configuraciones, Ventajas y Desventajas de los Robots Industriales [4]	15
Tabla 2.2: Combinación de los principios de funcionamiento y las variables físicas medidas por los sensores [3].....	28
Tabla 2.3: Análisis Comparativo de principios de funcionamiento vs. variables físicas [3].....	28
Tabla 2.4: Peso de criterios en la selección del robot SCARA.....	32
Tabla 2.5: Peso de criterio Instalaciones en la selección de robot SCARA.....	32
Tabla 2.6: Peso de criterio Accesibilidad en la selección de robot SCARA.....	32
Tabla 2.7: Peso de criterio Diseño en la selección de robot SCARA	33
Tabla 2.8: Peso de criterio Precio en la selección de robot SCARA	33
Tabla 2.9: Análisis de Alternativas en la selección de robot SCARA	33
Tabla 2.10: Peso de criterios en la selección de Efecto Final	35
Tabla 2.11: Peso de criterio Instalaciones en la selección de Efecto Final	35
Tabla 2.12: Peso de criterio Accesibilidad en la selección de Efecto Final	35
Tabla 2.13: Peso de criterio Precio en la selección de Efecto Final.....	36
Tabla 2.14: Peso de criterio Costo Adicional en la selección de Efecto Final	36
Tabla 2.15: Análisis de Alternativas en la selección del Efecto Final.....	36
Tabla 3.1: Matriz Denavit-Hartenberg de robot SCARA con tres grados de libertad	41
Tabla 3.2: Notación de parámetros robot SCARA de tres grados de libertad	42
Tabla 3.3: Matriz Denavit-Hartenberg, robot SCARA tres grados de libertad	43
Tabla 3.4: Parámetros de análisis dinámico del robot SCARA de tres grados de libertad	48
Tabla 3.5: Cálculos de centro de gravedad.....	60
Tabla 3.6: Simbología de magnitudes.....	67
Tabla 3.7: Cálculos en el tornillo de potencia.....	68
Tabla 3.8: Datos para el análisis de la garra	70
Tabla 3.9: Tabla de corrientes y voltajes.....	75
Tabla 3.10: Componentes del Prototipo 1.0.....	77
Tabla 3.11: Conclusiones prototipo 1.0.....	78

Tabla 3.12: Conclusiones prototipo 2.0	79
Tabla 3.13: Conclusiones del prototipo 3.0	80
Tabla 3.14: Conclusiones del robot SCARA.....	82
Tabla 4.1: Pruebas y resultados eslabón 1 y 2.....	84
Tabla 4.2: Resultados sin controlador de eslabón 1 y eslabón 2.	85
Tabla 4.3 Notación de parámetros sin controlador.....	85
Tabla 4.4: Resultados control PD de eslabón 1 y eslabón 2	88
Tabla 4.5: Notación de parámetros control PD.....	88
Tabla 4.6: Tabla de costos directos.....	89
Tabla 4.7: Tabla de costos indirectos.....	90

SIMBOLOGÍA

a_i :	Longitud del eslabón.
d_i :	Distancia entre articulaciones.
α_i :	Ángulo de desfase.
θ_i :	Ángulo de giro.
m_i :	Masa del eslabón.
I_i :	Inercia del eslabón.
l_{ci} :	Centro de masa.
q_i :	Posición articular.
g :	Gravedad.
$\text{sen}(i)$:	Seno del ángulo i .
$\text{cos}(i)$:	Coseno del ángulo i .
H_i^{i+1} :	Matriz homogénea.
$J(i)$:	Jacobiano i .
$\det(i)$:	Determinante de i .
K :	Energía cinética.
Q_k :	Energía generalizada.
P :	Energía potencial.
L :	Lagrangiano.
ϵ :	Hamiltoniano.
τ :	Par aplicado.
$M(i)$:	Momento i .
$C(i)$:	Fuerza Coriolis i .
f_f :	Fuerza de fricción.
v_i :	Velocidad i .
v_i^T :	Velocidad i transpuesta.
$d(i)$:	Derivada de i .
∂ :	Derivada parcial.
PD :	Control proporcional-derivativo.
W :	Peso.
E :	Módulo de elasticidad.
t :	Tiempo.
r :	Radio.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El uso de los robots en empresas surge por la necesidad de incrementar su volumen de producción, reducir costos de mano de obra y tiempos de producción, obtener mayor precisión en la fabricación de piezas y productos; factores que constituyen ventajas competitivas importantes para una organización.

Un robot es un manipulador programable y multifuncional que se diseña para realizar tareas específicas tales como mover materiales, partes, herramientas o dispositivos mediante movimientos programados. Consiste en una secuencia de cuerpos rígidos llamados eslabones, conectados mediante articulaciones prismáticas o de revolución, y en donde cada par articulación-eslabón constituye un grado de libertad.

Los robots industriales son ideales para trabajos peligrosos, indeseables o que requieren movimientos repetitivos y/o precisos. Uno de los rubros que debe cubrir una organización es el costo de la mano de obra; los seres humanos necesitan satisfacer necesidades fisiológicas tales como alimento, recreación, y descanso, además que se debe contar con espacio suficiente para desempeñar las labores con seguridad. Mientras que los robots carecen de estas necesidades fisiológicas, requieren de menos espacio para la ejecución de trabajo que los seres humanos, y minimizan la ocurrencia de accidentes causados por trabajos repetitivos.

El noventa por ciento de robots trabajan en fábricas, más de la mitad hacen automóviles. Y la mayoría de los seres humanos supervisan o mantienen los robots activos y funcionales. [1]

1.1 ANTECEDENTES

En la antigüedad, el hombre ha sentido fascinación por máquinas que imitan movimientos, acciones, funciones o actos de los seres vivos. La realización de mecanismos a través de dispositivos hidráulicos o mediante poleas, palancas, tornillos, engranajes, levas y resortes ha sido constante desde tiempos antiguos. Dédalo construyó estatuas que se movían solas. Arquímedes, descubrió su famoso principio e inventó la leva, el resorte y el tornillo sin fin.

En la Alta Edad Media fueron los artesanos, los del gremio de relojería, que construyeron autómatas de figuras humanas o de animales que tenían toda la semblanza de moverse como si estuvieran vivos y capaces de generar sonidos. En la época del Renacimiento, con la mejora del progreso tecnológico, derivado sobre todo en el campo de la relojería, fueron muy importantes y famosos el león animado y autómatas de funcionamiento cíclico gobernado por tambores de púas construidos por Leonardo da Vinci.

En el siglo XVIII, el francés Jacques de Vaucanson construyó una serie de célebres autómatas como músicos de tamaño humano o el pato expuesto en París en 1738, estos eran robots mecánicos diseñados para un propósito específico: la diversión, principalmente de la corte o, eventualmente, motivo de atracción de las ferias.

En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de hacer dibujos en donde una serie de levas se utilizaban como “el programa” para el dispositivo en el proceso de escribir y dibujar. Éstas creaciones mecánicas de forma humana deben considerarse como invenciones aisladas que reflejan el genio de hombres que se anticiparon a su época. Hubo otras invenciones mecánicas durante la Revolución Industrial, creadas por mentes de igual genio, muchas de las cuales estaban dirigidas al sector de la producción textil. Entre ellas se puede citar la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), la hiladora mecánica de Crompton (1779) y el telar de Jacquard (1801), entre otros.

Algunos de los primeros robots empleaban mecanismos de realimentación para

corregir errores, que actualmente siguen siendo empleados. Un ejemplo de control por realimentación es un tanque del inodoro que emplea un flotador para determinar el nivel del agua. Cuando el agua cae por debajo de un nivel determinado, el flotador baja, abre una válvula y deja entrar más agua en el tanque del inodoro. Al subir el agua, el flotador también sube, y al llegar a cierta altura se cierra la válvula y se corta el paso del agua, logrando un control por nivel.

El desarrollo del brazo artificial multiarticulado o manipulador marcó el inicio al moderno robot. El inventor estadounidense George Devol desarrolló en 1954 un brazo primitivo programable para realizar tareas específicas. En 1956 Devol conoció a Joseph Engelberger y juntos fundaron en 1960 la empresa Unimation dedicada a la fabricación de robots. En 1961 se realizaron pruebas de un robot Unimate accionado hidráulicamente para el proceso de fundición en molde en General Motors. Para 1968 Kawasaki se unió a Unimation y comenzó la fabricación y el empleo de robots industriales en Japón.

En este mismo año General Motors, empleó baterías de robots en el proceso de fabricación de las carrocerías de los coches. En 1973 la empresa sueca ASEA, fabricó el primer robot completamente eléctrico, es el tipo de accionamiento que ha acabado imponiéndose, debido a los avances registrados en el control de motores eléctricos. En 1974 se introdujo el primer robot industrial en España y también es el año en el que se comenzó a utilizar lenguaje de programación del cual se derivarían otros de uso posterior.

En 1975, el ingeniero mecánico estadounidense Victor Scheinman, mientras estudiaba en la Universidad de Stanford, en California, desarrolló un manipulador polivalente realmente flexible conocido como Brazo Manipulador Universal Programable (Programmable Universal Machine for Assembly). El PUMA era capaz de mover un objeto y colocarlo en cualquier orientación en un lugar deseado que estuviera a su alcance.

En 1978 comenzó a emplearse el robot PUMA, siendo uno de los modelos más usados, su diseño de "brazo" multiarticulado es la base de la mayoría de los robots

actuales. Para 1981 se inició la comercialización del robot tipo SCARA (Selective Compliance Arm for Robotic Assembly) en Japón. En 1987 se constituyó la Federación Internacional de Robótica (siglas en inglés "IFR") con sede en Estocolmo. Durante las cuatro últimas décadas se han construido las bases de la robótica industrial, que posteriormente han sido optimizadas gracias al mejoramiento de microprocesadores, informática y programación, lo que resulta evidente en la sofisticación de los robots.

Existe actualmente la necesidad de fabricar productos en altos volúmenes, o adaptados a las necesidades específicas de los clientes. Con la robótica y la automatización, se consiguen fabricar productos iguales en grandes volúmenes a bajo costo de mano de obra, o distintos con pocos o ningún cambio estructural en las líneas de producción, pues utilizan sistemas que se adaptan con programas a condiciones variables de fabricación.

El término mecatrónica fue concebido por primera vez por el ingeniero Tetsuro Moria miembro de una compañía japonesa, concebido como la combinación de mecanismos y electrónica. A través del tiempo el significado de este término se ha ido ampliando y ahora es utilizado en el lenguaje técnico para describir la filosofía de la ingeniería en tecnología más que para la tecnología en sí. Como resultado, el término mecatrónica puede encontrarse con numerosas definiciones en la literatura actual. La definición más utilizada enfatiza a la sinergia y sus estados: la mecatrónica es la integración sinérgica de ingeniería mecánica con electrónica y control inteligente por computadoras, para el diseño y manufactura de productos y procesos. Los sistemas mecatrónicos pueden ser implementados de formas muy diferentes para cubrir el inmenso rango desde robots industriales y maquinaria CNC, hasta sistemas automotrices de antibloqueo y anti-derrape.

1.2 SISTEMAS MECATRÓNICOS

Un típico sistema mecatrónico consiste de un esqueleto mecánico, actuadores, sensores, controladores, reconocimiento de señales, hardware y software,

sensores, estructuras de comunicación, dispositivos de interface y fuentes de poder; diferentes formas de usar sensores, transferencia y adquisición de información están envueltos entre todos estos tipos de componentes. Por ejemplo, un servomotor que es un motor con la capacidad de retroalimentarse por medio de sensores para generar movimientos complejos y precisos, se encuentra constituido por componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos.

En la figura 1.1 se explica el comportamiento de un sistema mecatrónico desde su modelado, análisis, diseño integral, pruebas y mejoras hasta las salidas o entradas de hardware de un sistema mecatrónico en general. Estos sistemas mecatrónicos abarcan los campos tradicionales de la ingeniería mecánica, ingeniería electrónica, ingeniería de control e ingeniería en sistemas.

Cada aspecto o tema dentro del sistema mecatrónico puede tomar un carácter de múltiple dominio. Un actuador (como un servomotor, descrito en el párrafo anterior), puede representarse como un dispositivo mecatrónico dentro de un sistema mecatrónico más grande.

Los controladores, o dispositivos de modificación de señales deberán integrarse al sistema a ser controlado, son parte esencial del sistema mecatrónico. Son componentes externos necesarios para el control de una adecuada operación de todo el sistema mecatrónico. Su función consiste en comparar datos generados por los sensores con los establecidos por el usuario como aceptables para obtener los resultados deseados de la operación ejecutada. Además, las señales registradas pueden ser utilizadas posteriormente para sistemas de monitoreo (control de realimentación).

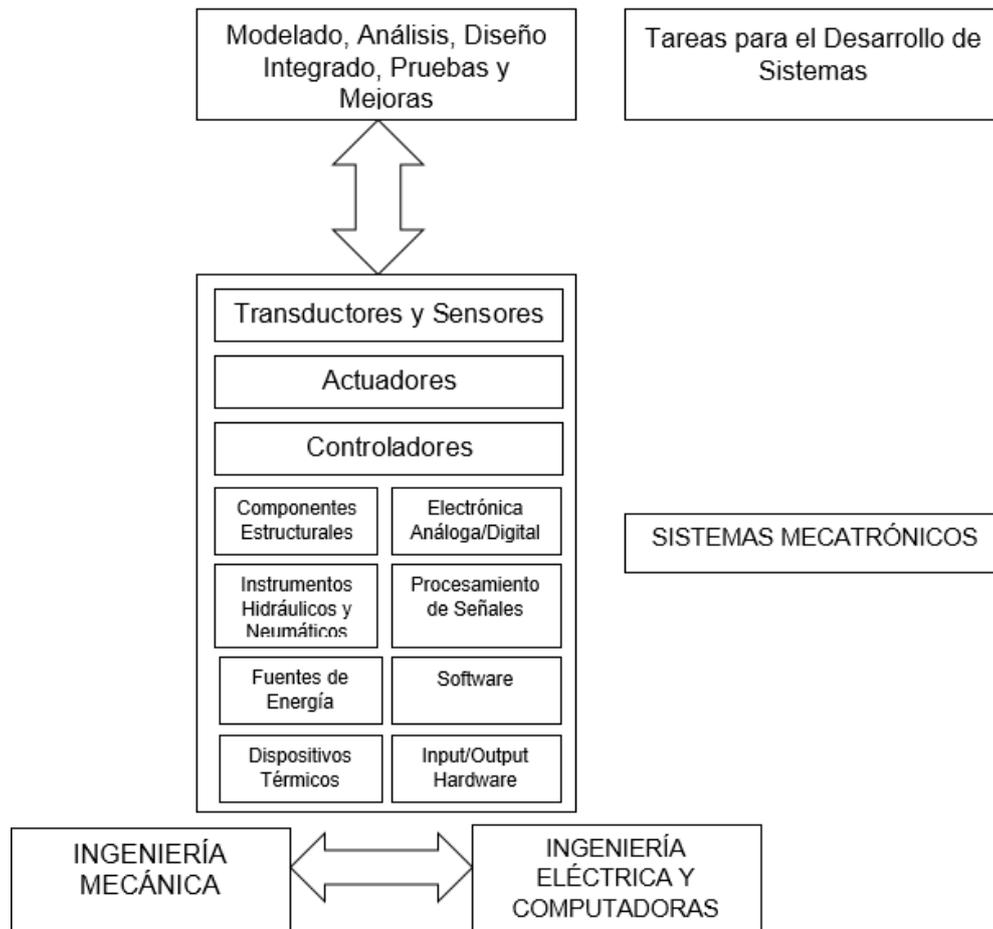


Figura 1.1: Comportamiento de un sistema mecatrónico general

1.3 TRABAJOS PREVIOS

En el ámbito de la robótica y específicamente de los robots SCARA existen trabajos realizados a nivel mundial y nacional. El presente proyecto es el primero de su tipo en realizarse en la Universidad Internacional del Ecuador.

1.3.1 A NIVEL MUNDIAL

En Colombia se desarrolló en la Universidad del Cauca, el proyecto denominado “Simulador de un Robot SCARA de 4 grados de libertad basado en realidad virtual”, sus autores: Diego Checa, Diana Luna y Víctor Mosquera (figura 1.2). [2]

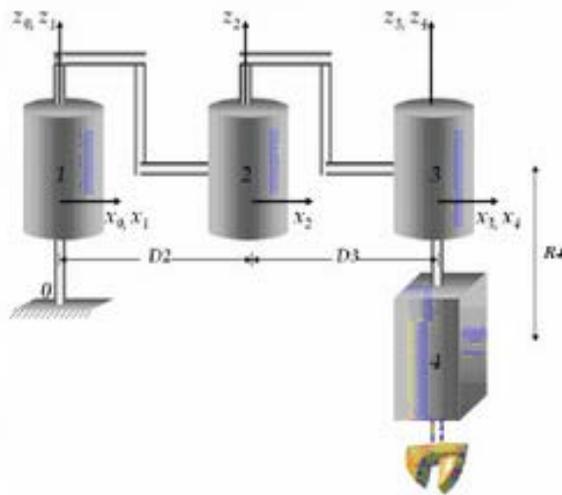


Figura 1.2: Robot SCARA conformado por un manipulador serial de 4 grados de libertad

En la figura 1.2 se distinguen los ejes de rotación de las articulaciones, distancias entre articulaciones (eslabones) y la articulación prismática que se desplaza verticalmente (pistón). El robot tiene como principales características: un sistema dinámico y comportamiento variable respecto a la carga útil a ser desplazada. Su modelo geométrico directo permite determinar la posición cartesiana del eslabón terminal en relación con las posiciones de las otras articulaciones. Para conocer la posición del eslabón terminal del robot en referencia con la del manipulador, se utiliza la matriz de transformación T_0^4 (se refiere a la matriz de transformación del eslabón cero hasta el eslabón cuatro).

Las técnicas de control utilizadas son: controlador PID (Proporcional, Derivativo, Integral) y CTC (Control por Par Calculado). El programa simulador empleado es Easy Java y la simulación del robot SCARA se basó en la programación estructurada; mientras que el programa MATLAB se adoptó para efectuar las distintas operaciones requeridas.

1.3.2 A NIVEL NACIONAL

En Ecuador, el proyecto denominado “Diseño y Construcción de un robot SCARA de tres grados de libertad con un efector final electromagnético, para el paletizado de recipientes metálicos”, fue desarrollado en la Escuela Politécnica del Ejército por los ingenieros Andrés Guzmán y Edison Sevillano, el 20 de agosto del 2012.

El sistema eléctrico/electrónico del mencionado proyecto consta de: módulo de alimentación, módulo de adquisición y envío de datos, módulo de control y potencia y sensores de realimentación (posición y fuerza de par aplicados).

El sistema de control se desarrolla utilizando las herramientas de cálculo tales como matrices homogéneas y matriz jacobiana; todo regido por un modelo cinemático directo y traducido por un controlador PID.

1.3.3 A NIVEL LOCAL

En la Universidad Internacional del Ecuador se tiene el proyecto del ingeniero Galo Maldonado, con el título “Diseño, construcción y programación de una Máquina de control numérico aplicada al prototipado rápido de modelado por deposición fundida de material para el laboratorio de mecatrónica de la Universidad Internacional del Ecuador”, que consiste en un robot cartesiano que cumple la función de prototipado rápido.

El presente proyecto “Diseño y construcción de un robot SCARA de tres grados de libertad”, es el primero en su clase para la Universidad Internacional del Ecuador.

1.4 CLASIFICACIÓN DE ROBOTS Y APLICACIONES

Las categorías más importantes de robots están en la tabla 1.1, clasificados por su estructura.

Tabla 1.1: Clasificación de Robots y sus Aplicaciones [3]

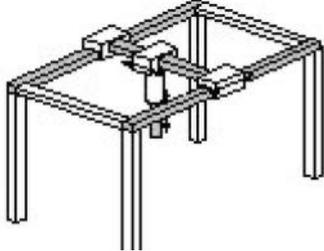
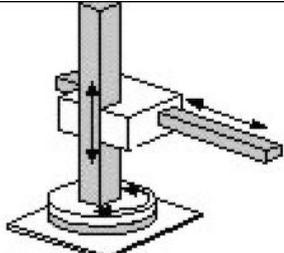
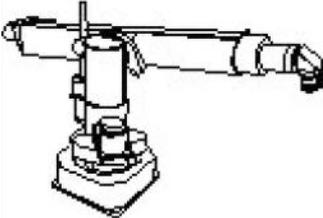
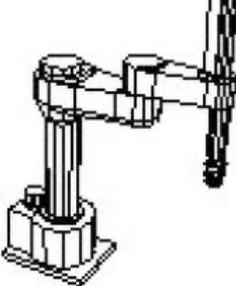
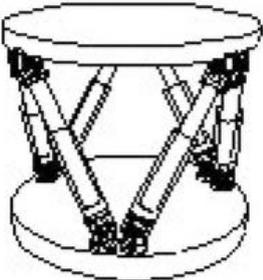
Robot	Descripción	Aplicación
 <p data-bbox="268 663 616 689">Figura 1.3: Robot Cartesiano</p>	<p data-bbox="651 394 1015 539">Robot Cartesiano: Es un robot que tiene tres articulaciones prismáticas y sus ejes coinciden con el plano cartesiano.</p>	<p data-bbox="1043 394 1407 539">Utilizados para colocación de piezas, aplicación de sellador, operaciones de manufactura, manejo de herramientas y soldadura de arco.</p>
 <p data-bbox="277 1010 606 1037">Figura 1.4: Robot Cilíndrico</p>	<p data-bbox="651 741 1015 824">Robot Cilíndrico: Es un robot que sus ejes forman un sistema coordenado cilíndrico.</p>	<p data-bbox="1043 741 1407 801">Usado en operaciones de montaje, soldadura y fundición.</p>
 <p data-bbox="301 1350 582 1377">Figura 1.5: Robot Polar</p>	<p data-bbox="651 1088 1015 1171">Robot Polar: Es un robot que sus ejes forman un sistema coordenado polar.</p>	<p data-bbox="1043 1088 1407 1171">Usado en manejo de maquinaria, soldadura y fundición.</p>
 <p data-bbox="287 1733 596 1760">Figura 1.6: Robot SCARA</p>	<p data-bbox="651 1435 1015 1547">Robot SCARA: Es un robot que tiene dos articulaciones rotativas y paralelas y una articulación prismática.</p>	<p data-bbox="1043 1435 1407 1581">Utilizado en labores de colocación de piezas, aplicación de selladores, operaciones de montaje y manejo de maquinaria.</p>

Tabla 1.1: Clasificación de Robots y sus Aplicaciones [3]

Robot	Descripción	Aplicación
 <p data-bbox="272 674 611 707">Figura 1.7: Robot Articulado</p>	<p data-bbox="647 389 1015 517">Robot Articulado: Es un robot que su brazo tiene por lo menos tres articulaciones rotativas.</p>	<p data-bbox="1040 389 1407 456">Usado en montajes, fundición, soldadura, y pintura.</p>
 <p data-bbox="284 1050 600 1084">Figura 1.8: Robot Paralelo</p>	<p data-bbox="647 752 1015 880">Robot Paralelo: Es un robot que sus brazos tienen articulaciones rotativas prismáticas concurrentes</p>	<p data-bbox="1040 752 1407 880">Se usa para desarrollar simuladores de vuelo con plataformas móviles como cabina de mando.</p>

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN

Los robots de uso industrial están conformados por eslabones, articulaciones, sensores, accionadores y un circuito de control. Un robot tiene características similares al cuerpo humano. A continuación, en la figura 2.1 se indica algunas similitudes del brazo de un robot industrial con el brazo del ser humano.

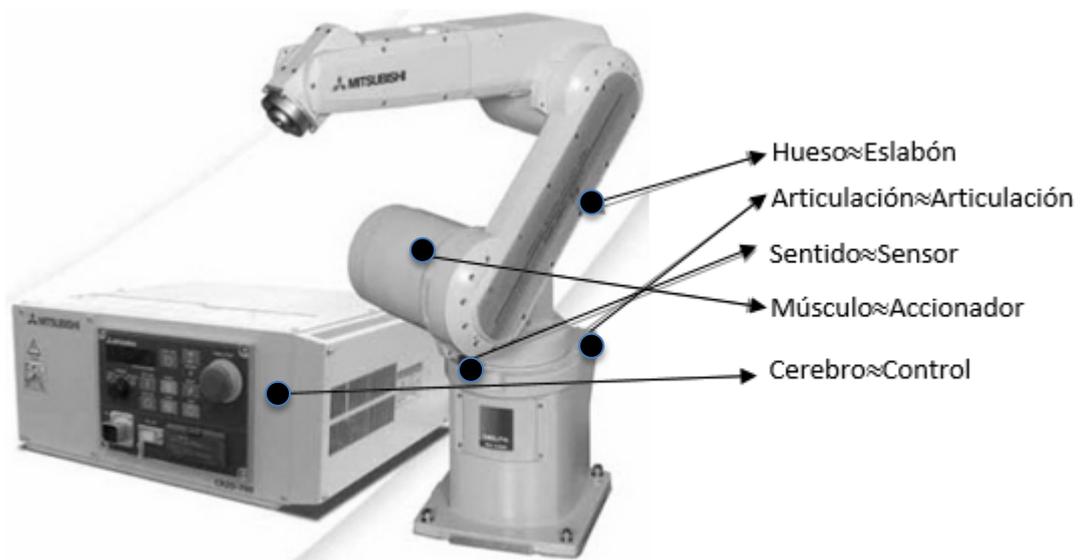


Figura 2.1: Estructura de un brazo robótico [4]

El presente capítulo estudia las alternativas a utilizar para el “Diseño y construcción de un robot SCARA de tres grados de libertad”. Inicia con la identificación de los componentes y mecanismos de un robot SCARA.

Posteriormente se analizan las posibles alternativas de componentes y mecanismos identificados, empezando con el análisis del efector final hasta llegar a la estructura inicial (caja de control), obteniendo así, la mejor opción en cada elemento constitutivo del robot SCARA.

2.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseño y construcción de un robot SCARA de tres grados de libertad.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar robots existentes en el mercado
- Realizar el modelamiento matemático de un robot SCARA
- Generar el algoritmo de control del robot SCARA
- Diseñar un robot SCARA para una carga útil de 1kg
- Diseñar interfaz: robot – pc –usuario
- Realizar planos: mecánicos, electrónicos y eléctricos
- Realizar manuales de: usuario y mantenimiento
- Construir prototipo robot SCARA

2.2 ESTRUCTURA DE UN ROBOT INDUSTRIAL

Un robot industrial se encuentra compuesto de:

1. Estructura mecánica
2. Elementos terminales
3. Sistema de control
4. Armario de control
5. Sistema sensorial

Cada uno de estos elementos se detallan a continuación.

2.2.1 ESTRUCTURA MECÁNICA

En mecánica se consideran los siguientes parámetros:

- Grados de libertad
- Espacio de trabajo
- Articulaciones

- Configuraciones cinemáticas
- Accionadores

2.2.1.1 Grados de libertad

Se entiende como grados de libertad de un mecanismo al número de componentes de movimiento simple, planos x, y, o z, que concurren para generar movimiento en el mencionado mecanismo. En la figura 2.2 se observa un mecanismo compuesto por una corredera, un dado y un eslabón, que cuenta con dos grados de libertad, pues se puede desplazar en los planos x, y, mientras que, la figura 2.3 muestra un mecanismo con un eslabón empotrado en el dado, que se desliza únicamente a lo largo de la corredera (plano "Y") y por lo tanto tiene solamente un grado de libertad.

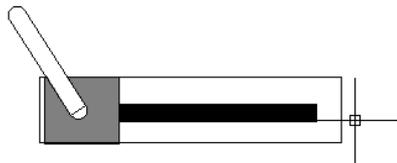


Figura 2.2: Mecanismo de 2 grados de libertad

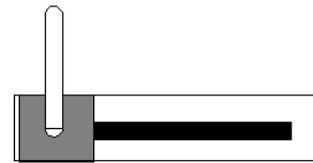


Figura 2.3: Mecanismo de 1 grados de libertad

2.2.1.2 Espacio de trabajo

Conocido también como volumen de trabajo o región de acceso, se refiere al conjunto de posiciones dentro del espacio que son potencialmente alcanzables por el robot. La figura 2.4 muestra el espacio de trabajo de tres tipos de brazos robóticos, siendo único y distinto para cada uno de ellos.

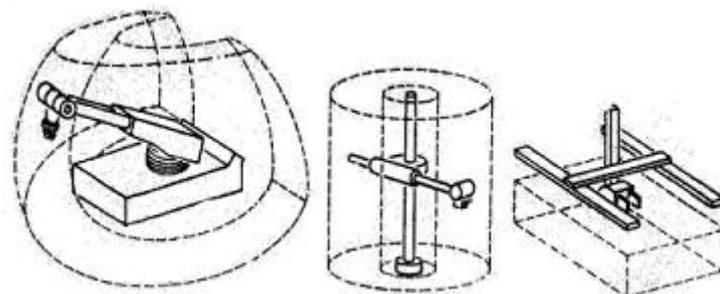


Figura 2.4: Área de trabajo de un brazo robótico [5]

2.2.1.3 Articulaciones

Una articulación es la zona o región encargada de transformar la energía (eléctrica, en el caso de un robot) que llega a un punto, en un movimiento de un eslabón que conforma el robot. Una articulación puede producir movimiento de traslación y/o rotación, y se componen de servomotores – u otro tipo de motores - que permiten la conexión y movimiento relativo entre eslabones consecutivos del robot.

A continuación, las figuras 2.5 y 2.6 presentan mecanismos de un grado de libertad, las figuras 2.7 y 2.8 presentan mecanismos de dos grados de libertad, mientras que las figuras 2.9 y 2.10 mecanismos de tres grados de libertad, para los distintos tipos de articulación.

- Articulaciones Prismática y Rotacional, de un grado de libertad

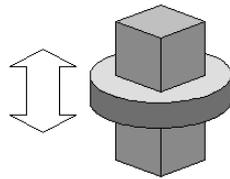


Figura 2.5: Articulación Prismática [4]

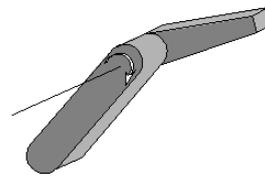


Figura 2.6: Articulación Rotacional [4]

- Articulaciones Cilíndrica y Plana, de dos grados de libertad

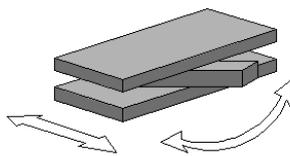


Figura 2.7: Articulación Cilíndrica [4]

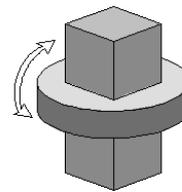


Figura 2.8: Articulación Plana [4]

- Articulaciones Esférica y Universal, de tres grados de libertad

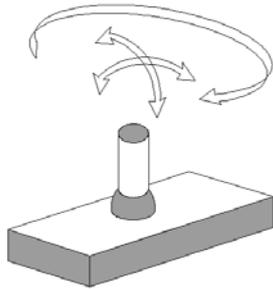


Figura 2.9: Articulación Esférica [4]

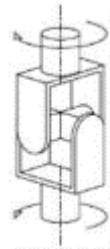


Figura 2.10: Articulación Universal [4]

2.2.1.4 Configuraciones cinemáticas

Se entiende como configuración cinemática (cadena cinemática) la “formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, en donde, se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia” [2]. Por ejemplo, tres eslabones unidos por dos articulaciones de un grado de libertad dan lugar a una cadena cinemática.

A continuación, en la tabla 2.1 se presentan las configuraciones comercialmente más utilizadas en la elaboración de robots, con ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 2.1: Configuraciones, Ventajas y Desventajas de los Robots Industriales [4]

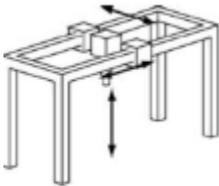
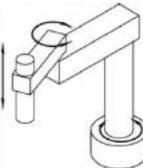
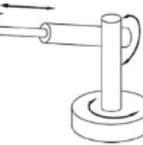
Robot	Configuración	Ventajas	Desventajas
 Figura 2.11: Robot Cartesiano	PPP Cintura: Prismático. Hombro: Prismático. Codo: Prismático.	Movimiento lineal en 3 dimensiones. Modelo cinemático sencillo. Estructura rígida. Permite usar accionadores neumáticos. Cubre grandes volúmenes.	Volumen de trabajo menor que el volumen del robot. Solo permite realizar tareas superficiales. Sensible a la suciedad del ambiente.
 Figura 2.12: Robot Articulado	RRR Cintura: Rotacional. Hombro: Rotacional. Codo: Rotacional.	Máxima flexibilidad. Volumen de trabajo mayor que el volumen del robot. Apto para entornos corrosivos. Permite accionadores eléctricos.	Modelo cinemático complejo

Tabla 2.1: Configuraciones, Ventajas y Desventajas de los Robots Industriales [4]

Robot	Configuración	Ventajas	Desventajas
 <p>Figura 2.13: Robot SCARA</p>	RRP Cintura: Rotacional. Hombro: Rotacional. Codo: Prismática.	Volumen de trabajo mayor que volumen del robot. Apto para tareas de montaje. Permite accionadores eléctricos. Velocidad. Fuerza.	Modelo cinemático complejo Solo permite tareas superficiales. Sensible a la suciedad del ambiente.
 <p>Figura 2.14: Robot Cilíndrico</p>	RPP Cintura: Rotacional. Hombro: Prismático. Codo: Prismático.	Modelo cinemático sencillo. Volumen de trabajo mayor que volumen del robot. Permite accionadores hidráulicos.	Región de acceso limitada. Sensible a la suciedad del ambiente.
 <p>Figura 2.15: Robot Esférico o Polar</p>	RRP Cintura: Rotacional. Hombro: Rotacional. Codo: Prismática.	Volumen de trabajo mayor que volumen del robot.	Modelo cinemático complejo Región de acceso limitada. Sensible a la suciedad del ambiente.

2.2.1.5 Accionadores

Sistema responsable de transformar energía produciendo movimiento en un robot; convierte las señales de control, posición y velocidad en un movimiento para cada una de las articulaciones de un robot. Dependiendo de la fuente de energía pueden ser de tipo eléctrico, neumático o hidráulico.

2.2.1.5.1 Accionamiento eléctrico

Un accionamiento eléctrico es un sistema capaz de transformar, de forma útil, la energía eléctrica en mecánica; además de controlar los parámetros implicados, tales como: velocidad, posición o par. Se tiene accionadores eléctricos en:

- Motores de corriente continua con escobillas o sin escobillas.
- Motores paso a paso.
- Motores de corriente alterna.

2.2.1.5.2 Accionamiento neumático

Dispositivo cuya fuente de energía es aire a presión. El aire comprimido es enviado por medio de mangueras a cilindros para obtener, a través de un pistón, energía mecánica. Como ejemplo se tiene:

- Motores neumáticos
- Cilindros neumáticos
- Válvulas neumáticas y electro neumáticas

2.2.1.5.3 Accionamiento hidráulico

Dispositivo que utiliza un fluido, de baja compresión, como fuente de energía. El fluido se envía a través de pistones o cilindros, permite una mayor capacidad de esfuerzos y una más fácil regulación. Existen accionadores hidráulicos en:

- Motores hidráulicos
- Cilindros hidráulicos
- Válvulas hidráulicas y electro hidráulicas

2.2.2 ELEMENTOS TERMINALES

El elemento terminal representa la herramienta especial que permite al robot, de uso general, realizar una labor específica para la cual ha sido particularmente diseñado. Se puede tener como elemento terminal:

- Muñeca
- Garra mecánica
- Ventosa
- Sensores
- Herramientas

- Intercambiador de herramientas
- Unidades de giro

2.2.2.1 Muñeca

Se refiere a una articulación esférica de tres ejes que se cortan. Tiene como características:

- Tamaño reducido.
- Modelo matemático sencillo.
- Conexión del elemento terminal cercano a los ejes.
- Potencia adecuada para la tarea a realizar.

La figura 2.16 muestra un elemento terminal tipo muñeca.

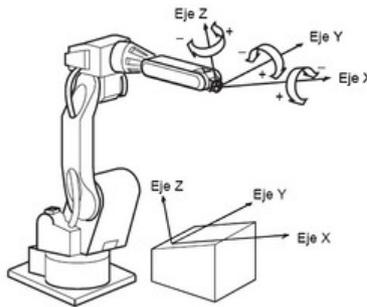


Figura 2.16: Elemento terminal tipo Muñeca[7]

2.2.2.2 Garra mecánica

Elemento que se utiliza para tomar un objeto (usualmente la pieza de trabajo) entre dos o más dedos, sujetándolo durante el ciclo de trabajo del robot como se observa en la figura 2.17.

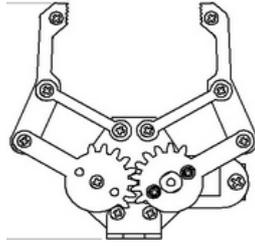


Figura 2.17: Elemento terminal, garra mecánica [4]

2.2.2.3 Ventosa

Componente que utiliza la presión negativa del aire (denominada vacío y generada por un eyector o bomba de vacío) para adherirse a superficies preferentemente poco porosas (en la figura 2.18 se observa un robot con ventosa) y crear un vacío parcial que se traduce en una fuerza de succión. La diferencia de presión entre la atmósfera en el exterior de la ventosa y la cavidad de baja presión en el interior de la misma es lo que la mantiene adherida a la superficie.



Figura 2.18: Robot cristallero con elemento terminal tipo ventosa [8]

2.2.2.4 Sensores

Los sensores son dispositivos que permiten recolectar información acerca del estado del entorno o de la aplicación a ser utilizado. Existe una amplia variedad de sensores, como por ejemplo:

- Sensores de Temperatura: NTC, PTC, termorresistencia, termopar, bimetálico.
- Sensores de Posición: Final de carrera, de ángulo, etc.
- Sensores de Proximidad y Movimiento: Transductores inductivos, capacitivos, resistivos, ultrasonidos, etc
- Sensores de Velocidad: Tacómetros
- Sensores de Presión: Manómetros, galgas extensiométricas, etc
- Sensores de Iluminación: LDR, fotodiodos, fototransistores, etc
- Sensores de Contacto
- Etc

A continuación, la figura 2.19 muestra un sensor de presión tipo galga extensiométrica.

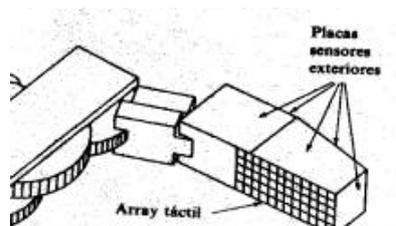


Figura 2.19: Elemento terminal con sensor [4]

2.2.2.5 Herramientas

Se emplean herramientas como elemento terminal para los casos en donde el robot realiza operaciones sobre la pieza de trabajo (como la figura 2.20 lijadora). Algunas de las herramientas comúnmente utilizadas son:

- Pinzas de soldadura
- Pistola de pintura
- Herramientas de corte (Bisturí, Láser, Agua, Mecánica, etc.)
- Atornillador
- Lijadora
- Fresadora



Figura 2.20: Robot con lijadora como herramienta terminal [9]

2.2.2.6 Intercambiador de herramientas

En tareas que requieren el uso de varias herramientas o diferentes procesos se aplica el uso del brazo robótico industrial. Éste puede operar distintas herramientas, utilizando un sistema automático para el intercambio del instrumento necesario. Ocurre este caso en la ejecución de trabajos de solda con diferentes métodos (MIG/MAG, TIG, Plasma) durante el proceso de trabajo o inclusive con el uso de otro tipo de herramientas, como se muestra en la figura 2.21.

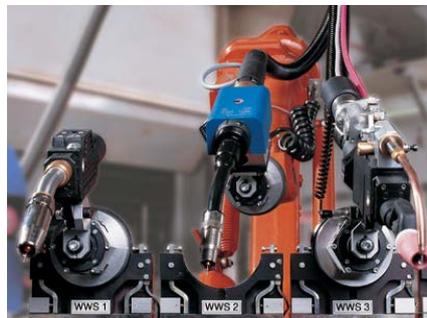


Figura 2.21: Robot con Intercambiador de Herramientas como elemento terminal [10]

2.2.2.7 Unidades de giro

Elemento terminal que permite un cambio de giro en la aplicación a ser utilizada como en la figura 2.22 se muestran dos robots con unidad de giro.

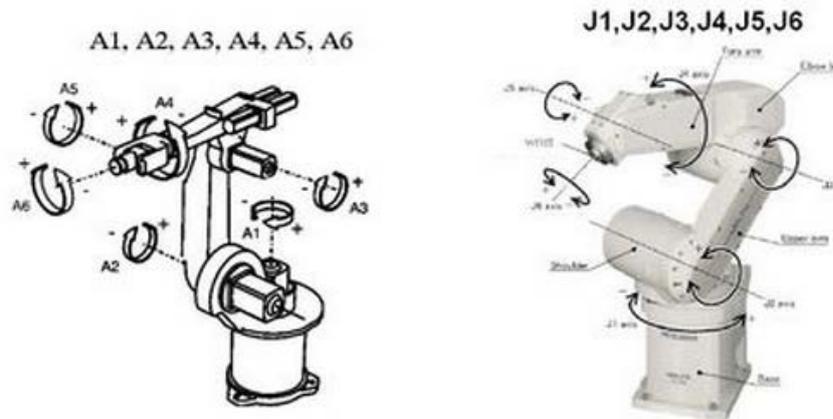


Figura 2.22: Robot con Unidad de Giro como elemento terminal [7]

2.2.3 SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control es la combinación de componentes que interactúan juntos para realizar el control de un proceso. Este control puede ser de forma continua (en todo momento) o de forma discreta (cada cierto tiempo). Cuando el sistema es continuo, el control se realiza con elementos continuos. Y si el sistema es discreto, el control se realiza con elementos digitales (tales como el computador) que permitan digitalizar valores antes de su procesamiento y volver a convertirlos tras el procesamiento. Existen dos tipos de sistemas de control: sistemas en lazo abierto y sistemas en lazo cerrado.

2.2.3.1 Sistema en lazo abierto

Es aquel en donde la señal de salida no tiene influencia sobre la señal de entrada, como es el caso del amplificador de sonido. En la figura 2.23 se muestra un sistema en lazo abierto.



Figura 2.23: Sistema en lazo abierto

2.2.3.2 Sistema en lazo cerrado

El sistema de lazo cerrado es uno de los más utilizados. Es aquel en donde la señal de salida influye en la señal de entrada (figura 2.24). Se obtiene por medio de sensores, localizados en la salida del sistema, una respuesta a la acción misma que influye en la señal de entrada, constituyéndose así, el sistema de lazo cerrado. Este es el caso del sistema de abastecimiento de agua de un inodoro. (Figura 2.25).

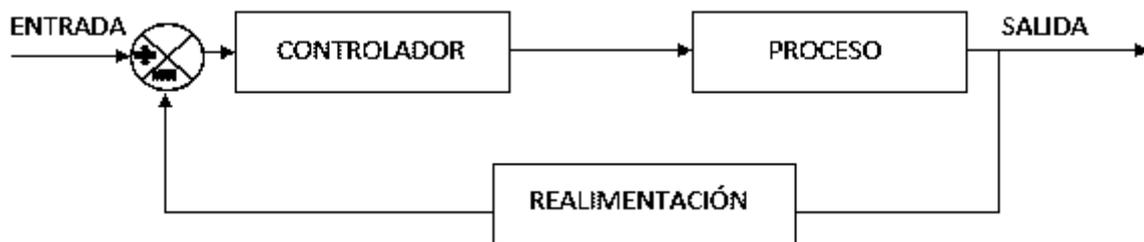


Figura 2.24: Sistema en lazo cerrado

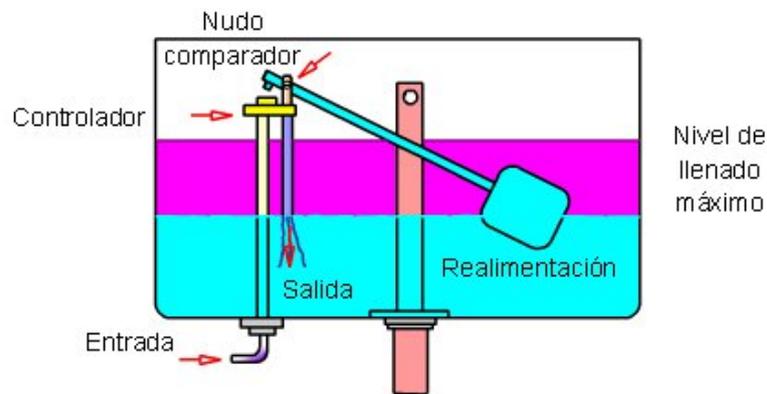


Figura 2.25: Sistema en lazo cerrado utilizado en el abastecimiento de agua del tanque de inodoro [11]

Como ilustra la figura 2.25, el control se realiza sobre el nivel de agua que debe contener la cisterna del inodoro. Cuando se jala del tirador de salida, la cisterna queda vacía. En ese momento, el flotador baja y comienza a entrar agua en la cisterna. Cuando el flotador sube lo suficiente, la varilla que contiene en un extremo al flotador y en el otro el pivote el cual presiona sobre la válvula de agua mientras la cisterna se llena, y hace que disminuya la entrada de agua. Cuanto más cerca

está del nivel deseado más presiona y menor cantidad de agua entra, hasta estrangular totalmente la entrada de agua en la cisterna.

Descrito el sistema se tiene: entrada de agua, controlador (válvula), nudo comparador (lo realiza tanto la válvula como el pivote y la palanca de la varilla), la realimentación (el flotador junto con la varilla y la palanca) y la salida de agua (que hace subir el nivel del agua).

2.2.3.3 Sistemas discretos

Los sistemas discretos son aquellos que realizan el control con cierta periodicidad de tiempo. En la actualidad se utilizan sistemas digitales para el control, siendo el computador el más utilizado, por su fácil programación y versatilidad.

El control en los robots generalmente corresponde a sistemas discretos en lazo cerrado, realizado por computador; el mismo que recibe y procesa datos de los sensores en función de los cuales se activa los actuadores en intervalos lo más cortos posibles del orden de milisegundos o de acuerdo a la necesidad de la aplicación a ser requerida.

2.2.4 ARMARIO DE CONTROL

También llamado gabinete, es el espacio físico que contiene toda la circuitería, mayormente de tipo electrónico, para el control del robot. Se conforma de los siguientes elementos:

- Computador (es)
- Memoria EPROM
- Servo controladores de motores (y amplificadores)
- Unidad de Entradas y Salidas (E/S) digitales y analógicas
- Dispositivos de Entrada
- Interfaz de Operación

A continuación, la figura 2.26 ilustra un Armario de Control.

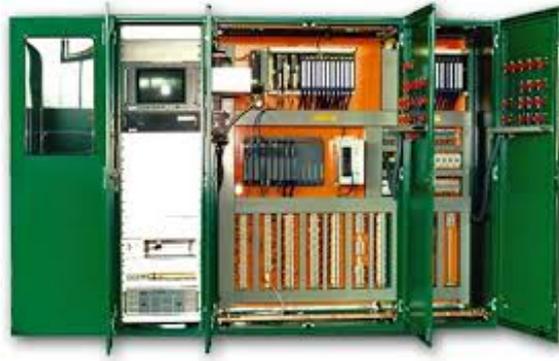


Figura 2.26: Armario de Control [12]

2.2.4.1 Computador o computadores

Es el procesador de datos del robot; permiten la creación, ejecución y almacenamiento de programas.

2.2.4.2 Memoria EPROM (Erasable Programmable Read-Only Memory)

Almacena el programa de control del robot; es una memoria no volátil la cual puede almacenar y borrar varias veces la programación de un robot.

2.2.4.3 Servo controladores de motores (y amplificadores)

Son controladores que cuentan con PWM (Modulación por ancho de pulsos) utilizados para los servomotores. Regulan cada uno de los movimientos del Robot Scara. Estos elementos varían en función del número de ejes del robot y características de los motores que se incorporen en la estructura del brazo robótico.

2.2.4.4 Unidad de E/S (Entradas/Salidas) digitales y análogas

Las unidades de entrada (UE) pueden ser sensores y/o controladores externos o pertenecientes a otro sistema (en los casos de cadenas de producción o trabajo), los cuales envían información hacia el controlador acerca del entorno en que se desenvuelve el proceso. Estas señales son traducidas por el controlador, que compara los datos recibidos y los requerimientos, previamente establecidos por el

usuario, en su programación; tomando así decisiones que a su vez son transmitidas (Unidades de Salida) hacia los actuadores (motores, bombillas, diodos, timbres, zumbadores, relés, electroválvulas, cilindros neumáticos, etc.).

La figura 2.27 ilustra dispositivos de entrada y salida, digitales y análogas interactuando en un sistema.

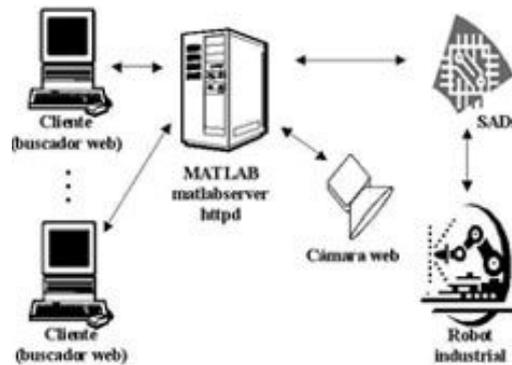


Figura 2.27: Dispositivos de entrada y/o salida [7]

2.2.4.5 Interfaz de operación

Se conoce como interfaz de operación a la conexión física y funcional entre dos aparatos o sistemas independientes. Diseñada para el uso de un mismo conjunto de controles, botones y pantallas sea cual fuera la finalidad de la aplicación, por medio de la cual se establece la comunicación entre el operador (usuario figura 2.28) y el robot.

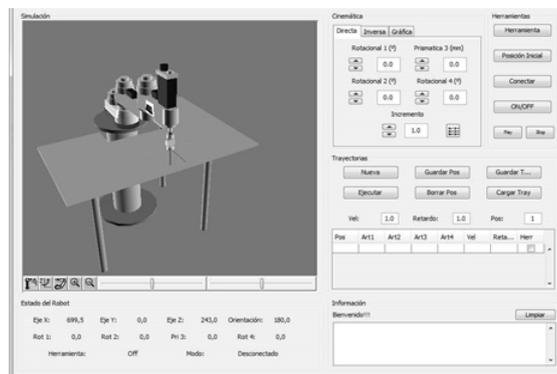


Figura 2.28: Interfaz de Usuario de Robot Scara [7]

2.2.5 SISTEMA SENSORIAL

El sistema sensorial es el que permite captar las variables de entorno de trabajo o aplicación de trabajo a ser utilizada. Puede estar conformado por uno o más sensores: internos o externos.

2.2.5.1 Sensores internos

Localizados en la estructura del robot, estos permiten obtener datos en tiempo real de: posición, velocidad, etc., durante la ejecución del proceso a continuación la figura 2.29 muestra este sensor.



Figura 2.29: Sensor Interno de ángulo (posición) por medio de magnetos [13]

2.2.5.2 Sensores externos

Localizados fuera de la estructura del robot, recolectan información de su entorno. Usualmente se los utiliza para obtener datos de: posición, velocidad relativa, fuerza y torque en la muñeca del robot. En la figura 2.30 se muestra el sensor externo de distancia.



Figura 2.30: Sensor Externo, de distancia por cinta [13]

Existe una amplia gama de sensores en el mercado; en las tablas 2.2 y 2.3 se muestra un análisis comparativo de los mismos.

Tabla 2.2: Combinación de los principios de funcionamiento y las variables físicas medidas por los sensores [3]

Sensores	Magnitudes					
	Velocidad	Aceleración Vibración	Temperatura	Presión	Fuerza	Humedad
Resistivos	-	Galgas + masa-resor	RTD Termistores	Potenciómetros + tubo de Bourd	Galgas	Humistor
Capacitivos	-	-	-	Condensador variable + diafragma	Galgas capacitivas	Dielectrico variable
Inductivos y electromagnéticos	Ley Faraday LVT Efecto Hall Corrientes de Foucault	LVDT + masa-resorte	-	LVDT+diafragma Reluctancia variable + diafragma	Magnetoelástico LVDT + célula carga	-
Generadores	-	Piezoeléctrico + masa-resor	Termopares Piroeléctricos	Piezoeléctricos	Piezoeléctricos	-
Digitales	Codificadores incrementales	-	Osciladores de cuarzo	Codificador + tubo de Bourd	-	SAW
Uniones P-N	-	-	Diodo Transistor Convertidores T	-	-	-
Ultrasonidos	Efecto Dopple	-	-	-	-	-

Tabla 2.3: Análisis Comparativo de principios de funcionamiento vs. variables físicas [3]

COMBINACIÓN DE LOS PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y LAS VARIABLES FÍSICAS

		Variable física medida										
		POSICIÓN	DESPLAZAMIENTO	VELOCIDAD	ACELERACIÓN	TAMAÑO	NIVEL	PRESIÓN	FUERZA	PROXIMIDAD	TEMPERATURA	RADIACIÓN LUMINOSA
Principio de funcionamiento	MICRORRUPTORES	X										
	FINALES CARRERA	X				X						
	EXTENSIOMÉTRICOS	X	X	X	X			X	X			
	TERMORRESISTIVOS										X	
	MAGNETORRESISTIVOS	X	X	X								
	CAPACITIVOS	X	X		X		X	X	X	X		
	INDUCTIVOS	X	X	X	X			X	X	X		
	OPTOELECTRÓNICOS	X	X	X						X		
	PIEZOELÉCTRICOS		X	X	X			X	X			
	FOTOVOLTAICOS											X
ULTRASÓNICOS	X					X						

2.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Los robots SCARA al ser robots con cuatro grados de libertad pueden cumplir múltiples tareas que lo hacen un instrumento de versátil utilidad. Es así que, por ejemplo, se lo emplea para el traslado o manipulación de productos, en las industrias alimenticia, farmacéutica, química, y cosmética, entre otras.

En el presente trabajo, la función específica del robot SCARA será el traslado de doce recipientes plásticos que contienen una sustancia líquida (perfume, loción, esmalte, etc.) desde una jaba de doce recipientes, hacia otra vacía de iguales características; lo que simularía una operación en el proceso de empaque del producto para su venta.

El diseño del robot SCARA responderá a la solicitud de este trabajo y su ejecución de forma óptima.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

El producto a ser transportado es una sustancia líquida perfumada.

Sustancia: Líquido perfumado

Recipiente: Rociador plástico de uso cosmético.

Material de recipiente: Plástico pet

Peso de recipiente vacío: 9.8 g.

Peso de recipiente lleno: 39.8 g.

Dimensiones de recipiente: Altura: 2.6 cm. Diámetro: 6.6 cm.

Volumen líquido: 30 ml.

La figura 2.33 muestra el recipiente plástico a ser transportado.

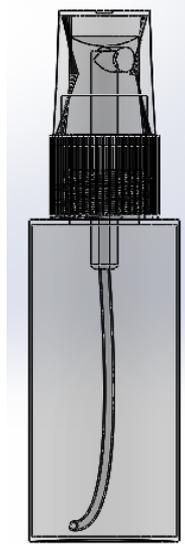


Figura 2.31: Recipiente plástico a ser transportado.

2.3.2 MÉTODO ORDINAL CORREGIDO DE CRITERIOS PONDERADOS

Una vez definidos los requerimientos de servicio, se emplea el Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados para evaluar la conveniencia de las alternativas del modelo a ser planteadas.

Con este método se asigna una valoración a cada alternativa planteada, la misma que es comparada y tabulada con la valoración de las otras alternativas.

En el presente caso, para la toma de decisiones, se evalúan las siguientes alternativas:

- Alternativa A: Robot SCARA con accionamiento hidráulico
- Alternativa B: Robot SCARA con accionamiento eléctrico
- Alternativa C: Robot SCARA con accionamiento neumático

Los criterios de valoración considerados son:

1. Instalaciones.- Instalaciones físicas: Espacio físico disponible para el correcto funcionamiento del robot en su sitio de trabajo.

2. Accesibilidad.- Accesibilidad de los componentes: Disponibilidad física de los elementos (partes, piezas) necesarios para la construcción y mantenimiento del robot.
3. Diseño: Diseño y construcción amigables al usuario, que brinde facilidades de mantenimiento y transporte.
4. Precio: Costo económico de los elementos necesarios para la construcción del robot.

La valoración correspondiente a cada criterio es:

Valoración	Criterio de Valoración
1,0	Si la alternativa de las filas es superior (o mejor; >) que la alternativa de las columnas.
0,5	Si la alternativa de las filas es equivalente (igual =) a la alternativa de las columnas.
0,0	Si la alternativa de las filas es inferior (o peor; <) que la alternativa de las columnas.

Para evitar que la alternativa de solución menos favorable tenga una valoración nula, se suman a los valores asignados en relación a las alternativas restantes una unidad. Y después, en otra columna, se calcula los valores ponderados para cada criterio. Se escoge como mejor alternativa de solución la que obtenga la mayor suma de valoración.

2.3.2.1 Selección de robot SCARA

Utilizando el Método de Ordinal Corregido de Criterios Ponderados se inicia con la evaluación de cada criterio de acuerdo a su importancia, considerando que:

Instalaciones > Diseño > Accesibilidad = Precio.

Tabla 2.4: Peso de criterios en la selección del robot SCARA

Criterio	Instalaciones	Accesibilidad	Diseño	Precio	$\Sigma+1$	Ponderación
Instalaciones		1,00	1,00	0,50	3,50	0,333
Accesibilidad	0,50		1,00	0,00	2,50	0,238
Diseño	0,00	0,50		0,00	1,50	0,143
Precio	0,50	0,50	1,00		3,00	0,286
SUMA					10,50	1,000

Con estos resultados se concluye que el orden de importancia de criterios, de mayor a menor es: instalaciones, precio, accesibilidad y diseño.

A continuación se evalúa el peso de:

1. Criterio Instalaciones físicas, considerando que:

Alternativa B > Alternativa A = Alternativa B > Alternativa C.

Tabla 2.5: Peso de criterio Instalaciones en la selección de robot SCARA

INSTALACIONES	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		0,00	0,50	1,50	0,250
Alternativa B	1,00		1,00	3,00	0,500
Alternativa C	0,50	0,00		1,50	0,250
SUMA				6,00	1,000

2. Criterio Accesibilidad, considerando que:

Alternativa B > Alternativa A > Alternativa C = Alternativa B

Tabla 2.6: Peso de criterio Accesibilidad en la selección de robot SCARA

ACCESIBILIDAD	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		0,00	0,50	1,50	0,250
Alternativa B	1,00		1,00	3,00	0,500
Alternativa C	0,50	0,00		1,50	0,250
SUMA				6,00	1,000

3. Criterio Diseño, considerando que:

Alternativa A > Alternativa B = Alternativa C > Alternativa B.

Tabla 2.7: Peso de criterio Diseño en la selección de robot SCARA

DISEÑO	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		1,00	0,50	2,50	0,417
Alternativa B	0,00		0,00	1,00	0,167
Alternativa C	0,50	1,00		2,50	0,417
SUMA				6,00	1,000

4. Criterio Precio, considerando que:

Alternativa B > Alternativa A = Alternativa B > Alternativa C.

Tabla 2.8: Peso de criterio Precio en la selección de robot SCARA

PRECIO	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		0,00	0,50	1,50	0,250
Alternativa B	1,00		1,00	3,00	0,500
Alternativa C	0,50	0,00		1,50	0,250
SUMA				6,00	1,000

5. Tabulación de resultados obtenidos:

Tabla 2.9: Análisis de Alternativas en la selección de robot SCARA

	Instalaciones	Accesibilidad	Diseño	Precio	Σ	Prioridad
Alternativa A	0,333x0,250	0,238x0,250	0,143x0,417	0,286x0,250	0,202	
Alternativa B	0,333x0,500	0,238x0,500	0,143x0,167	0,286x0,500	0,310	Mejor Alternativa
Alternativa C	0,333x0,250	0,238x0,250	0,143x0,417	0,286x0,250	0,202	

Del análisis de resultados se concluye que las alternativas A y C reflejan una igualdad de evaluación, la misma que es inferior a la evaluación de la alternativa B. Por lo tanto, la alternativa B es la mejor y, se decide realizar un robot SCARA con accionamiento eléctrico.

2.3.2.2 Selección de efector final

Para la selección del efector final se considera que el robot SCARA debe ser capaz de manipular y transportar sin complicaciones, el producto ya descrito en la sección 2.3.1, del presente trabajo.

Se consideran tres alternativas para su evaluación.

- Alternativa A: Efector final garra (gripper)
- Alternativa B: Efector final electroimán
- Alternativa C: Efector final ventosa

Los criterios de valoración considerados son:

1. Accesibilidad.- Disponibilidad física del efector final en almacenes de electrónica del país.
2. Instalaciones.- Espacio físico necesario para la instalación de complementos (accesorios de funcionamiento) del efector final.
3. Precio.- Costo del efector final.
4. Costo adicional (C.A.).- Costo de complementos adicionales necesarios para el correcto funcionamiento del efector final.

Utilizando el Método de Ordinal Corregido de Criterios Ponderados, ya descrito, se realiza la evaluación de cada criterio de acuerdo a su importancia, considerando que:

Costo Adicional > Accesibilidad > Instalaciones = Precio

Tabla 2.10: Peso de criterios en la selección de Efecto Final

CRITERIO	Instalaciones	Accesibilidad	Precio	C.A.	$\Sigma+1$	Ponderación
Instalaciones		0,00	0,00	0,00	1,00	0,111
Accesibilidad	1,00		0,50	0,00	2,50	0,278
Precio	1,00	0,50		0,00	2,50	0,278
Costo Adicional	0.50	0,50	1,00		3,00	0,333
SUMA					9,00	1,000

A continuación se evalúa el peso de:

1. Criterio Instalaciones, considerando que:

Alternativa A = Alternativa B = Alternativa A > Alternativa C

Tabla 2.11: Peso de criterio Instalaciones en la selección de Efecto Final

INSTALACIONES	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		0,50	1,00	2,50	0,385
Alternativa B	0,50		1,00	2,50	0,385
Alternativa C	0,00	0,50		1,50	0,231
SUMA				6,50	1,000

2. Criterio Accesibilidad, considerando que:

Alternativa A > Alternativa B > Alternativa C = Alternativa A

Tabla 2.12: Peso de criterio Accesibilidad en la selección de Efecto Final

ACCESIBILIDAD	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		1,00	0,00	2,00	0,444
Alternativa B	0,50		0,00	1,50	0,333
Alternativa C	0,00	0,00		1,00	0,222
SUMA				4,50	1,000

3. Criterio Precio, considerando que:

Alternativa A > Alternativa B = Alternativa A > Alternativa C

Tabla 2.13: Peso de criterio Precio en la selección de Efector Final

PRECIO	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		1,00	1,00	3,00	0,462
Alternativa B	0,00		0,50	1,50	0,231
Alternativa C	0,00	1,00		2,00	0,308
SUMA				6,50	1,000

4. Criterio Costo Adicional, considerando que:

Alternativa B > Alternativa A = Alternativa B > Alternativa C

Tabla 2.14: Peso de criterio Costo Adicional en la selección de Efector Final

COSTO ADICIONAL	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		1,00	0,00	2,00	0,364
Alternativa B	0,50		1,00	2,50	0,455
Alternativa C	0,00	0,00		1,00	0,182
SUMA				5,50	1,000

5. Tabulación de resultados obtenidos:

Tabla 2.15: Análisis de Alternativas en la selección del Efector Final

CONCLUSIÓN	Instalaciones	Accesibilidad	Precio	Costo Adicional	Σ	Prioridad
Alternativa A	0,111x0,385	0,278x0,444	0,278x0,462	0,333x0,364	0,294	Mejor Alternativa
Alternativa B	0,111x0,385	0,278x0,333	0,278x0,231	0,333x0,455	0,199	
Alternativa C	0,111x0,231	0,278x0,222	0,278x0,308	0,333x0,182	0,173	

Del análisis se concluye que la alternativa A es la mejor, seguida por las alternativas B y C. Entonces se utiliza un efector final garra (gripper).

Finalmente, las especificaciones del robot SCARA son: robot de accionamiento eléctrico, con tres grados de libertad y elemento efector tipo garra (gripper). Al que, considerando el mayoritario y frecuente uso industrial de los robots SCARA, se le adaptará una cobertura tipo industrial.

CAPÍTULO 3

3.1 CINEMÁTICA

Se entiende por cinemática a la rama de la ciencia física que estudia el movimiento de un sistema, prescindiendo de las fuerzas que lo producen. El análisis cinemático permite obtener información de posición, velocidad y aceleración de un sistema y sus elementos.

En un robot SCARA el análisis cinemático se divide en dos partes: el análisis cinemático directo y el análisis cinemático inverso.

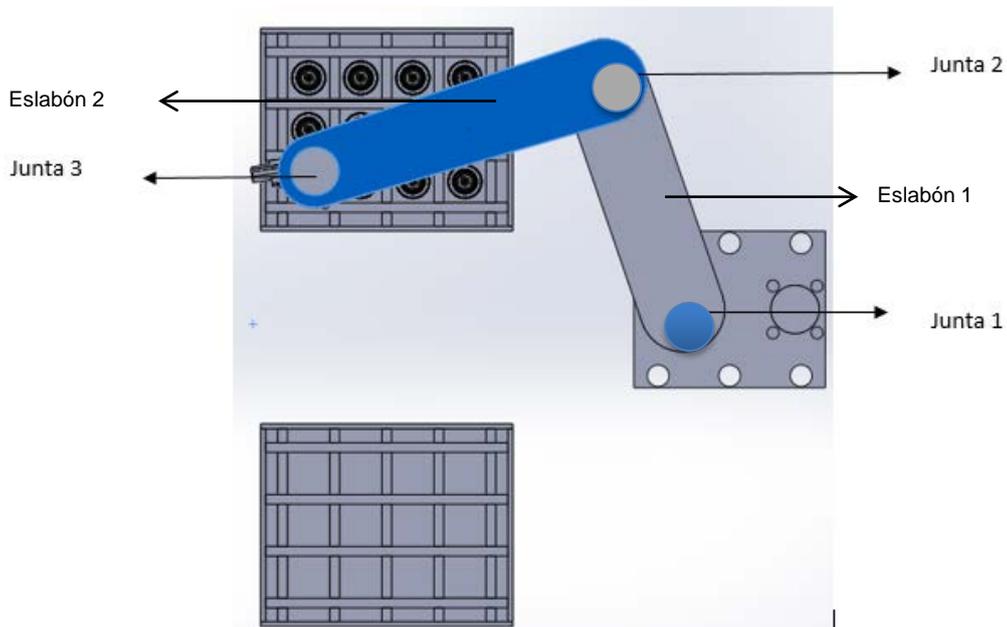


Figura 3.1: Robot SCARA de dos juntas rotacionales y una junta prismática

3.1.1 CINEMÁTICA DIRECTA

El análisis cinemático directo es el que estudia la posición y velocidad del elemento final, garra en este caso, teniendo como conocidos los datos de posición y velocidad de las articulaciones del sistema.

Para realizar el análisis de cinemática directa se utiliza el algoritmo de Denavit – Hartenberg en cada una de las juntas (articulaciones), que utiliza cuatro parámetros

implícitos en la geometría del robot; con estos parámetros se conforma la matriz de transformación homogénea para representar el movimiento de cada eslabón como indica la matriz (1).

$$A_i^{i-1}(q_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \text{sen}(\theta_i) \cos(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \text{sen}(\alpha_i) & a_i \text{sen}(\theta_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Entendiendo que:

a_i : Longitud del eslabón "i"

d_i : Distancia entre articulaciones. Existe este caso cuando el eslabón no está unido exactamente a la base del motor.

α_i : Ángulo de desfase en la unión del eslabón con la base del motor.

θ_i : Ángulo de giro de la articulación; ángulo de giro del motor en referencia al eslabón "i".

3.1.1.1 Parámetros Denavit-Hartenberg

Las figuras 3.2 y 3.3, describen gráficamente los sistemas de referencia para las articulaciones de un robot y parámetros de movimiento del algoritmo de Denavit - Hartenberg.

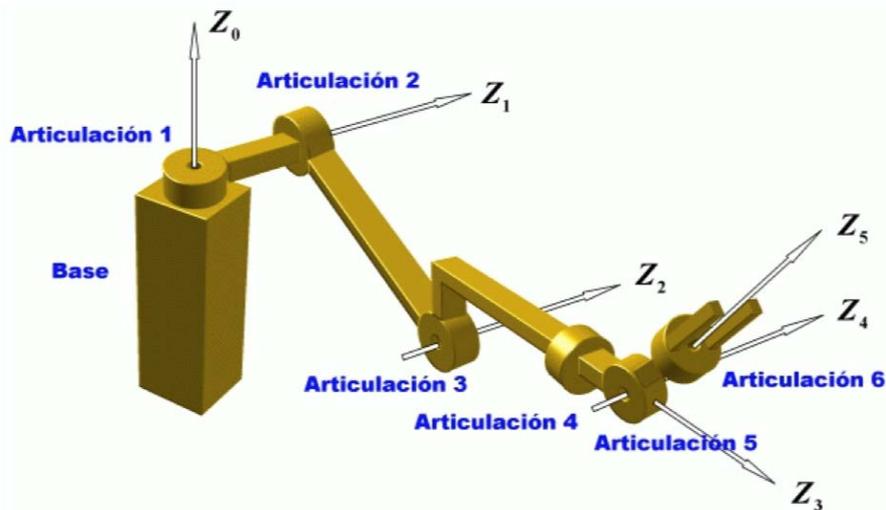


Figura 3.2: Sistemas de referencia de articulaciones de robot [15]

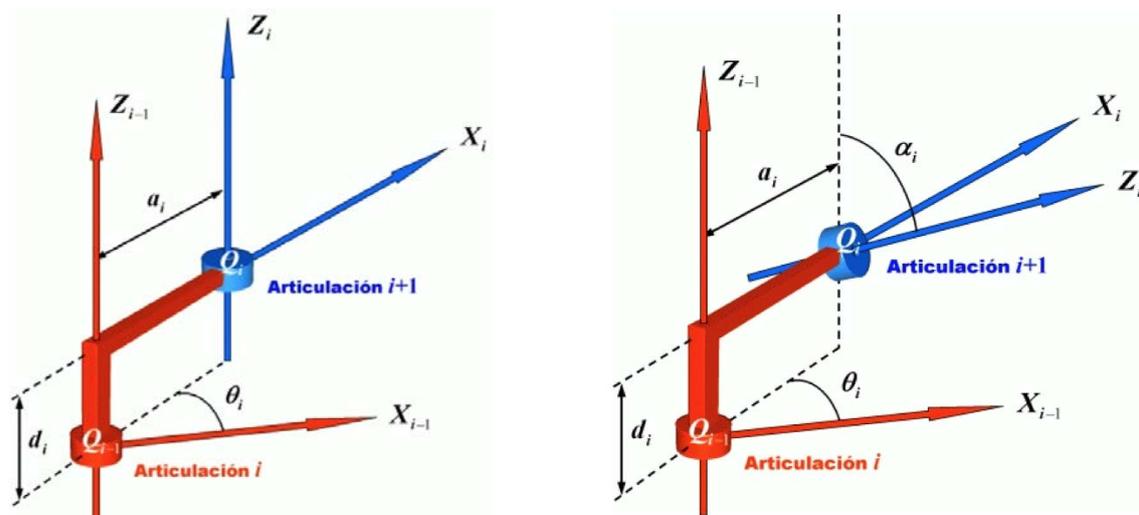


Figura 3.3: Parámetros de análisis en Matriz Denavit - Hartenberg [15]

En el presente trabajo, el robot SCARA (figura 3.1), está compuesto por los eslabones 1 y 2 que conectan las juntas 1, 2 y 3. Y, que en razón del movimiento que permiten sus juntas, el robot es de tipo: rotacional (junta 1), rotacional (junta 2), prismático (junta 3), es decir “RRP”.

Las acciones (movimientos) que realice el robot SCARA deben responder a requerimientos de trabajo específicos, solicitados por el usuario. La ubicación del efector final del robot (garra) depende de la ubicación y coordinación de los actuadores (eslabones y tornillo de potencia) que lo componen, por ello es necesario conocer, por cada elemento que conforma el robot, sus características de movimiento. A continuación en la figura 3.4 se muestra, para cada junta (articulación), el diagrama de fuerzas y movimientos a presentarse en el robot SCARA, sin considerar pesos, fuerzas y perturbaciones del robot. Se tiene:

- Z₁: Eje z de Junta 1 (J1)
- X₁: Eje x de Junta 1
- Z₂: Eje z de Junta 2 (J2)
- X₂: Eje x de Junta 2
- Z₃: Eje z de Junta 3 (J3)
- X₃: Eje de la junta 3
- L₁: Longitud del eslabón 1

L_2 : Longitud del eslabón 2

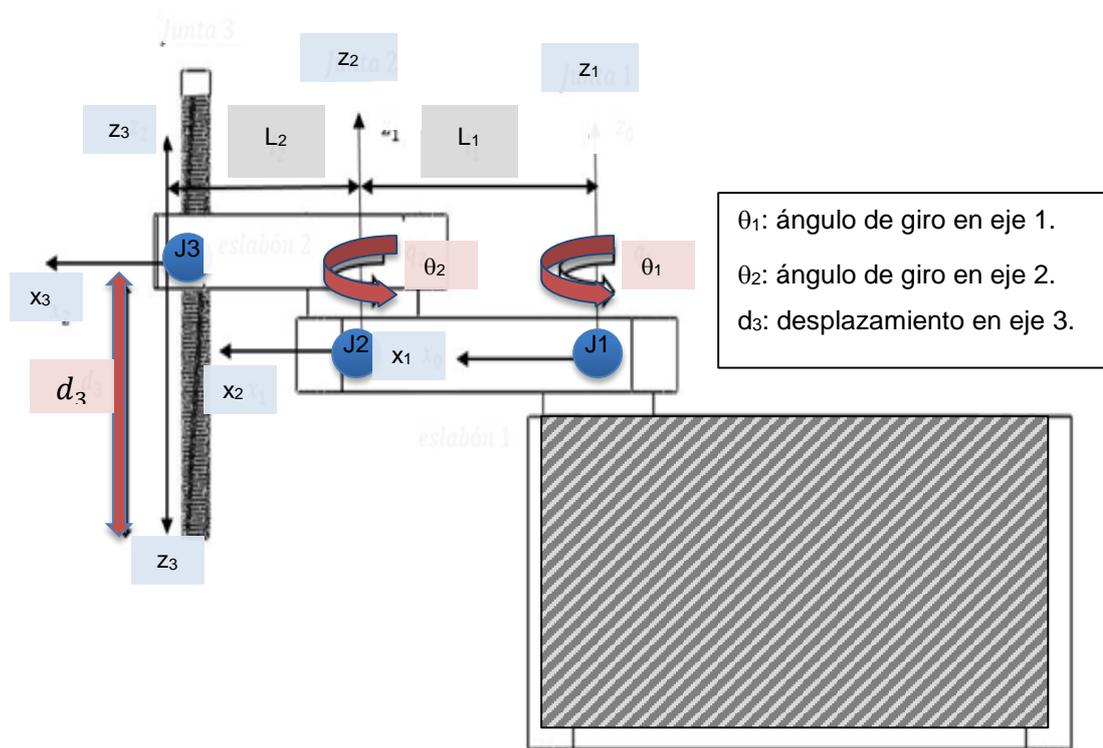


Figura 3.4: Cinemática de Robot SCARA

Se tiene entonces para el presente diagrama:

Tabla 3.1: Matriz Denavit-Hartenberg de robot SCARA con tres grados de libertad

Articulación (Junta)	L_i en $f(x)$	α_i en $f(z)$	d_i en $f(z)$	θ_i en $f(x)$
1	L_1	0	0	θ_1
2	L_2	0	0	θ_2
3	0	0	d_3	0

La representación de posicionamiento para el robot SCARA involucra sistemas coordenados cartesianos que especifican posición y orientación del extremo final del robot.

Se utiliza la transformación homogénea como herramienta que involucra operaciones de rotación y traslación se ingresa valores numéricos de dichas operaciones dentro de una matriz, se representa su estructura en el modelo de cinemática directa. Como se muestra en las matrices 2, 3, 4.

Por convención general, la posición de casa (el origen del sistema de referencia fijo) para un robot de 3 grados de libertad se selecciona sobre el eje “ $x_1 (+)$ ”, midiendo el ángulo “ θ_1 ” en sentido positivo (contrario a las manecillas del reloj). Es decir del eje eje “ $x_1 (+)$ ”, hacia el eje eje “ $z_1 (+)$ ”.

En este caso, se asigna los sistemas de referencia mostrados en la figura 3.5 y descritos en la tabla 3.2.

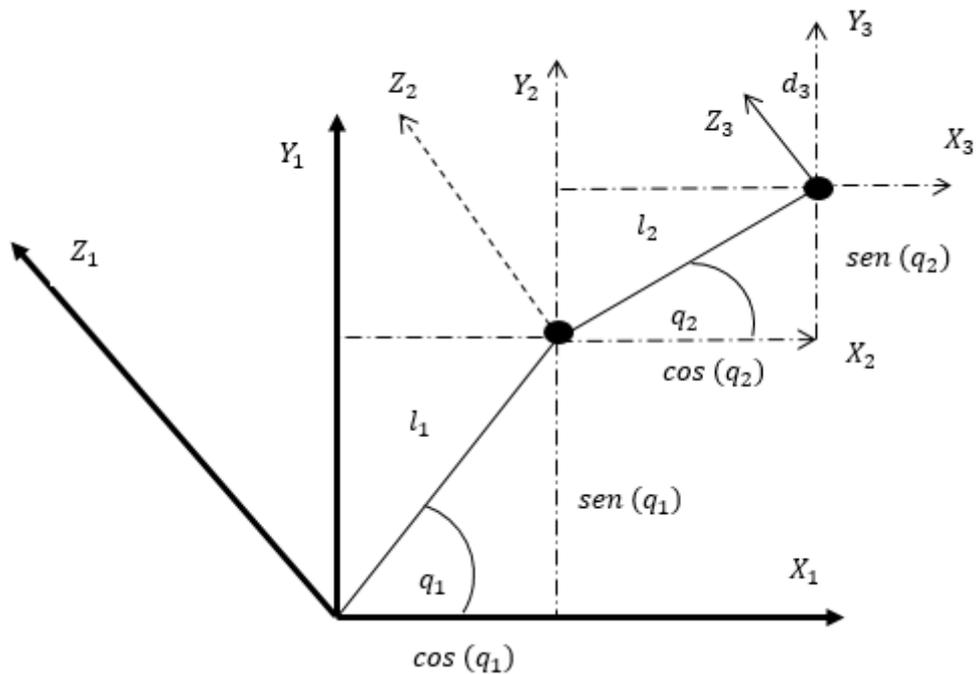


Figura 3.5: Diagrama del robot SCARA de tres grados de libertad

Tabla 3.2: Notación de parámetros robot SCARA de tres grados de libertad

Notación	Significado	Eslabón
m_1	Masa Eslabón 1	1 Hombro
l_1	Longitud Eslabón 1	
I_1	Inercia 1	
l_{c1}	Centro de masa 1	2 Codo
q_1	Posición articular 1	
m_2	Masa Eslabón 2	
l_2	Longitud Eslabón 2	
I_2	Inercia 2	
l_{c2}	Centro de masa 2	3 Mano
q_2	Posición articular 2	
m_3	Masa 3	
I_3	Inercia 3	
g	Aceleración debido a la gravedad	

De este diagrama se obtiene la matriz de Denavit – Hartenberg, de transformación homogénea:

Tabla 3.3: Matriz Denavit-Hartenberg, robot SCARA tres grados de libertad

<i>Eslabón</i>	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	q_1
2	l_2	180	0	q_2
3	0	0	d_3	0

Con los parámetros del robot SCARA de tres grados de libertad (tabla 3.3) se configuran las matrices (2), (3) y (4), de posición y orientación del efector final del robot, respecto al sistema de referencia fijo (casa):

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} \cos(q_1), -\text{sen}(q_1), 0, l_1 \cos(q_1) \\ \text{sen}(q_1), \cos(q_1), 0, l_1 \text{sen}(q_1) \\ 0, 0, 1, 0 \\ 0, 0, 0, 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} \cos(q_2), \text{sen}(q_2), 0, l_2 \cos(q_2) \\ \text{sen}(q_2), -\cos(q_2), 0, l_2 \text{sen}(q_2) \\ 0, 0, -1, 0 \\ 0, 0, 0, 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$H_3^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Una vez obtenidas las matrices homogéneas para cada eslabón, la teoría de Denavit – Hartenberg indica que la cinemática directa para todo el sistema se obtiene de la multiplicación de las matrices (2), (3) y (4), esto es:

$$H_1^4 = H_1^2 * H_2^3 * H_3^4 \quad (5)$$

Operación, con resultado preliminar:

$$H_1^4 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2), & \text{sen}(q_1 + q_2), & 0, & l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1) \\ \text{sen}(q_1 + q_2), & -\cos(q_1 + q_2), & 0, & l_2 \text{sen}(q_1 + q_2) + l_1 \text{sen}(q_1) \\ 0, & 0, & -1, & -d_3 \\ 0, & 0, & 0, & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Y, finalmente, la cinemática directa del robot SCARA con 3 grados de libertad es:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = f_R(q) = \begin{bmatrix} l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1) \\ l_2 \text{sen}(q_1 + q_2) + l_1 \text{sen}(q_1) \\ -d_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.1.2 CINEMÁTICA INVERSA

El análisis cinemático inverso, llamado también cinemática diferencial, realiza el proceso contrario al análisis cinemático directo, esto es, relacionar las velocidades angular y lineal del efector final con las velocidades articulares.

Matemáticamente, la cinemática diferencial, es la derivada con respecto al tiempo de la cinemática directa [16]. Esto es:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{\partial f_R(q)}{\partial q} \dot{q} \quad (8)$$

3.1.2.1 Jacobiano analítico

El Jacobiano analítico es un modelo matemático que relaciona la velocidad articular con la velocidad lineal y la velocidad angular del efector final. La matriz Jacobiana es una herramienta útil para la caracterización del robot; ayuda a encontrar el mapeo entre las fuerzas aplicadas por el efector final y torques resultantes en las articulaciones, así como las ecuaciones de movimiento del manipulador, entre otras aplicaciones. Por ello es utilizado para el análisis y diseño de los algoritmos de control del robot.

Para el jacobiano analítico, la velocidad traslacional del sistema de coordenadas del efector final (garra) se expresa como la derivada con respecto al tiempo del vector de cinemática directa, representando el origen del sistema del efector final con respecto al sistema de la base:

$$J(q) = \frac{\partial f_R(q)}{\partial q} \quad (9)$$

El resultado de esta operación en la matriz (7) es:

$$J(q) = \begin{bmatrix} -l_1 \operatorname{sen}(q_1) - l_2 \operatorname{sen}(q_1 + q_2) & -l_2 \operatorname{sen}(q_1 + q_2) & 0 \\ l_1 \operatorname{cos}(q_1) + l_2 \operatorname{cos}(q_1 + q_2) & l_2 \operatorname{cos}(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.1.2.2 Determinante del Jacobiano

De la matriz jacobiana (matriz 7), al ser cuadrada, se puede encontrar su determinante, conocido como el determinante jacobiano, que también proporciona información importante sobre el comportamiento del efector final.

Se pueden presentar singularidades en el cálculo; una de ellas es que el determinante del jacobiano sea cero. En este caso se dice que no es de rango completo y se presentan problemas de configuraciones singulares.

Singularidad significa que no es posible indicarle un movimiento arbitrario al extremo final del robot, es decir que, para una velocidad lineal y velocidad angular finitas pueden corresponder una velocidad articular infinita.

El determinante jacobiano para el robot SCARA es:

$$\det[J(q)] = l_1 l_2 \operatorname{sen}(q_1 + q_2) \operatorname{cos}(q_1) - l_1 l_2 \operatorname{cos}(q_1 + q_2) \operatorname{sen}(q_1) \quad (11)$$

Así es que, el determinante jacobiano es diferente de cero, y por lo tanto se concluye que para una velocidad lineal y angular finitas puede corresponder una velocidad angular finita, siempre que, para que no exista singularidad, los valores de q_1 y q_2 sean diferentes de cero.

3.2 DINÁMICA

La dinámica del robot relaciona el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo. El modelo dinámico establece relaciones matemáticas entre las coordenadas articulares (o las coordenadas del extremo del robot), sus derivadas (velocidad y aceleración), las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones (o en el extremo) y los parámetros del robot (masas de los eslabones, inercias, etc.) [3].

Así, el modelo dinámico es fundamental para propósitos de simulación, diseño y construcción del sistema mecánico. Además, contribuye con el análisis y diseño de algoritmos de control.

Existen dos formulaciones que ayudan al análisis dinámico:

- Formulación Lagrange – Euler
- Formulación Newton – Euler

La selección de una de ellas (para el análisis dinámico) depende de sus características, que hacen más apropiada a una de otra. De cualquiera de ellas se pueden obtener ecuaciones que describen la conducta dinámica del robot.

3.2.1 ECUACIONES DE EULER - LAGRANGE

Las ecuaciones de Euler - Lagrange presentan un modelo simple del que resultan una serie de ecuaciones diferenciales no lineales de 2º grado acopladas, útiles para el estudio de estrategias de control en el espacio de estados de las variables articulares del robot. Este método ha sido seleccionado, para el análisis dinámico del robot SCARA por ser el más didáctico.

Las ecuaciones Euler - Lagrange, adoptan la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_k} = Q_k + \frac{\partial K}{\partial q_k} \quad (12)$$

$$Q_k = \frac{\partial P}{\partial q_k} + \tau_k \quad (13)$$

En donde:

K: Energía cinética del sistema

Q_k : Fuerza generalizada. Suma de pares para una junta de revolución o de fuerzas para una junta prismática con los efectos del campo potencial

P: Energía potencial del sistema

De aquí, que la función Lagrangiana (L) es:

$$L = K * P \quad (14)$$

Por otro lado, la energía total del robot Scara es:

$$\varepsilon(q, \dot{q}) = \mathcal{K}(q, \dot{q}) + \mathcal{U}(q). \quad (15)$$

En donde:

ε = Hamiltoniano: Energía total del sistema

$\mathcal{K}(q, \dot{q})$: Energía cinética del sistema

$\mathcal{U}(q)$: Energía potencial del sistema

q : Vector posición articular

\dot{q} : Vector velocidad articular

Y, la energía potencial del sistema " $\mathcal{U}(q)$ " está relacionada con el campo conservativo de la gravedad y por lo tanto depende únicamente de la posición " q ".

3.2.2 MODELO DINÁMICO

El modelo dinámico para el robot SCARA de “n” grados de libertad está dado por la ecuación 16.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + g(q) + C(q, \dot{q})\dot{q} + f_f(\dot{q}, f_e) \quad (16)$$

La ecuación 16 que describe la dinámica no lineal del robot es válida para una estructura en cadena cinemática abierta que considera eslabones rígidos, es decir, no incluye fenómeno de elasticidad. Esta estructura se debe a la metodología de la ecuación de movimiento de Euler-Lagrange (ecuación 15). Como consecuencia se desprenden importantes propiedades matemáticas que facilitan el diseño y desarrollo de los algoritmos de control.

Para el desarrollo del modelo dinámico se consideran los parámetros de la tabla 3.4:

Tabla 3.4: Parámetros de análisis dinámico del robot SCARA de tres grados de libertad

Notación	Significado	Eslabón
m_1	Masa Eslabón 1	1 Hombro
l_1	Longitud Eslabón 1	
I_1	Inercia 1	
l_{c1}	Centro de masa 1	2 Codo
q_1	Posición articular 1	
m_2	Masa Eslabón 2	
l_2	Longitud Eslabón 2	
I_2	Inercia 2	
l_{c2}	Centro de masa 2	
q_2	Posición articular 2	3 Mano
m_3	Masa 3	
I_3	Inercia 3	
g	Aceleración debido a la gravedad	

Análogamente a lo planteado en la figura 3.4, el sistema está compuesto por los eslabones 1 y 2; se tienen tres sistemas de referencia, uno para cada junta, tal como se describe en la figura 3.6. Se obtienen entonces los vectores de posición y velocidad, así se tiene:

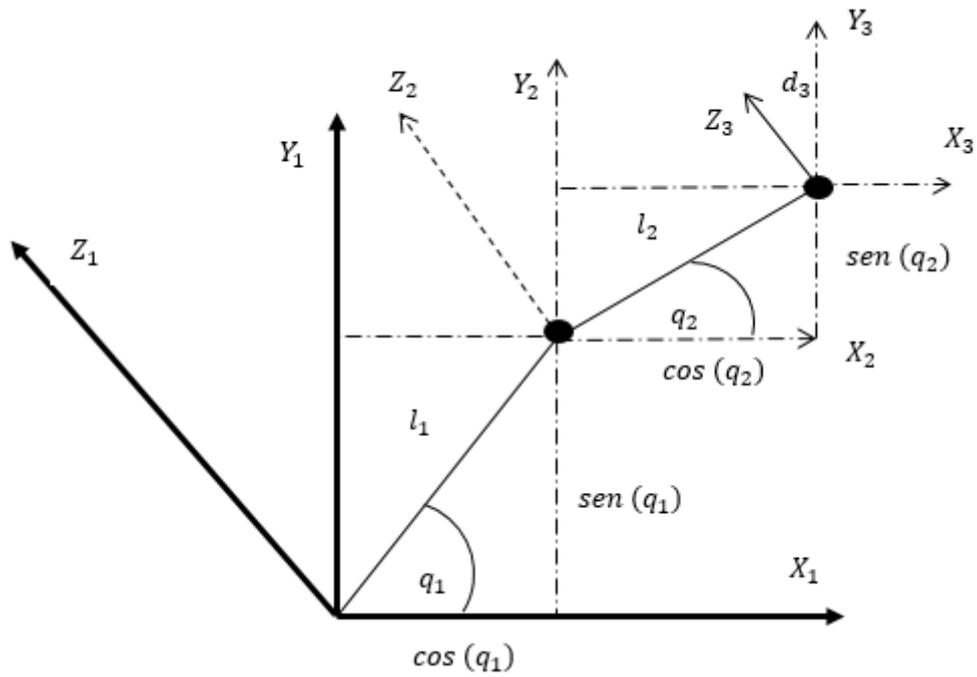


Figura 3.6: Diagrama del robot SCARA.

Modelo cinemático directo valor de las coordenadas articulares que guía a la posición y orientación del extremo del robot.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1} \cos(q_1) \\ l_{c1} \text{sen}(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c2} \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1) \\ l_{c2} \text{sen}(q_1 + q_2) + l_1 \text{sen}(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1) \\ l_2 \text{sen}(q_1 + q_2) + l_1 \text{sen}(q_1) \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A continuación se procede a derivar las matrices respecto al tiempo de la posición en cada eslabón para obtener su velocidad lineal, y se tiene:

$$v_1 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{c1} \cos(q_1) \\ l_{c1} \text{sen}(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{c1} \text{sen}(q_1) \\ l_{c1} \cos(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{q}_1 \quad (20)$$

$$v_2 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{c2} \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1) \\ l_{c2} \text{sen}(q_1 + q_2) + l_1 \text{sen}(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$v_3 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1) \\ l_2 \text{sen}(q_1 + q_2) + l_1 \text{sen}(q_1) \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

La velocidad lineal del eslabón 3 obtenida es (matriz 23):

$$= \begin{bmatrix} -l_2 \text{sen}(q_1 + q_2) - l_1 \text{sen}(q_1), & -l_2 \text{sen}(q_1 + q_2), & 0 \\ l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1), & l_2 \cos(q_1 + q_2), & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

A continuación, utilizando las identidades:

$$\cos^2(x) + \text{sen}^2(x) = 1$$

$$\cos(x \pm y) = \cos(x)\cos(y) \mp \text{sen}(x)\text{sen}(y)$$

Se multiplica la matriz velocidad de cada eslabón para su transpuesta y se obtiene:

$$v_1^T v_1 = [-\dot{q}_1 l_{c1} \text{sen}(q_1)]^2 + [\dot{q}_1 l_{c1} \cos(q_1)]^2 + 0 = l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 \quad (24)$$

$$v_2^T v_2 = \{[-l_{c2} \dot{q}_1 \text{sen}(q_1 + q_2) - l_1 \dot{q}_1 \text{sen}(q_1)] + [-l_{c2} \dot{q}_2 \text{sen}(q_1 + q_2)]\}^2 + \{[l_{c2} \dot{q}_1 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \dot{q}_1 \cos(q_1)] + [l_{c2} \dot{q}_2 \cos(q_1 + q_2)]\}^2 + 0 \quad (25)$$

$$= l_1^2 \dot{q}_1^2 + 2l_1 l_{c2} \dot{q}_1^2 \cos(q_2) + 2l_1 l_{c2} \dot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 \dot{q}_1^2 + 2l_{c2}^2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + l_{c2}^2 \dot{q}_2^2 \quad (26)$$

$$v_3^T v_3 = \{[-l_2 \dot{q}_1 \text{sen}(q_1 + q_2) - l_1 \dot{q}_1 \text{sen}(q_1)] + [-l_2 \dot{q}_2 \text{sen}(q_1 + q_2)]\}^2 + \{[l_2 \dot{q}_1 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \dot{q}_1 \cos(q_1)] + [l_2 \dot{q}_2 \cos(q_1 + q_2)]\}^2 + [\dot{q}_3]^2 \quad (27)$$

$$= l_1^2 \dot{q}_1^2 + 2l_1 l_2 \dot{q}_1^2 \cos(q_2) + 2l_1 l_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q_2) + l_2^2 \dot{q}_1^2 + 2l_2^2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + l_2^2 \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2 \quad (28)$$

Ya obtenidos los vectores posición, velocidad, se desarrolla la ecuación de Euler – Lagrange (ecuación 15). Empezando por la energía cinética $\mathcal{K}(q, \dot{q})$ del robot SCARA de tres grados de libertad la cual está dada por la siguiente expresión:

$$\mathcal{K}(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 v_1^T v_1 + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^T v_2 + \frac{1}{2} I_2 [\dot{q}_1 + \dot{q}_2]^2 + \frac{1}{2} m_3 v_3^T v_3 + \frac{1}{2} I_3 [\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3]^2 \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2}m_1l_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}I_1\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}[m_2l_1^2 + 2l_1l_{c2}m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2m_2]\dot{q}_1^2 + \\
&\frac{1}{2}[2l_1l_{c2}m_2 \cos(q_2) + 2l_{c2}^2m_2]\dot{q}_1\dot{q}_2 + \frac{1}{2}m_2l_{c2}^2\dot{q}_2^2 + \frac{1}{2}I_2[\dot{q}_1 + \dot{q}_2]^2 + \frac{1}{2}[m_3l_1^2 + \\
&2l_1l_2m_3 \cos(q_2) + l_2^2m_2]\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}[2l_1l_2m_3 \cos(q_2) + 2l_2^2m_3]\dot{q}_1\dot{q}_2 + \\
&\frac{1}{2}m_3l_2^2\dot{q}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{q}_3^2 + \frac{1}{2}I_3[\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3]^2
\end{aligned} \quad (30)$$

De la ecuación 29 se integran los términos de masa e inercia, y términos ya desarrollados en las ecuaciones 24,26 y 28 respectivamente para cada eslabón [4].

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2}[m_1l_{c1}^2 + I_1 + m_2l_1^2 + 2l_1l_{c2}m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2m_2 + I_2 + m_3l_1^2 \\
&\quad + 2l_1l_2m_3 \cos(q_2) + l_2^2m_2 + I_3]\dot{q}_1^2 \\
&\quad + [l_1l_{c2}m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2m_2 + I_2 + l_1l_2m_3 \cos(q_2) + l_2^2m_3 \\
&\quad + I_3]\dot{q}_1\dot{q}_2 + I_3\dot{q}_1\dot{q}_3 + I_3\dot{q}_2\dot{q}_3 + \frac{1}{2}[m_2l_{c2}^2 + I_2 + m_3l_2^2 + I_3]\dot{q}_2^2 \\
&\quad + \frac{1}{2}[m_3 + I_3]\dot{q}_3^2
\end{aligned} \quad (31)$$

Continuando, el siguiente término de la ecuación 15 es la energía potencial $\mathcal{U}(q)$ del centro de masa para los eslabones del robot SCARA de tres grados de libertad, que es nula en los eslabones 1 y 2 por cuanto se desplaza en forma horizontal, y se tiene entonces que $\mathcal{U}(q) = 0$ [5]; mientras que para el eslabón final se tiene energía potencial $\mathcal{U}(q_3) = mgd_3$.

Siguiendo en la conformación de la ecuación Euler – Lagrange para el sistema del robot SCARA de tres grados de libertad, el siguiente paso es obtener el lagrangiano, expresado en la ecuación 32.

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \mathcal{K}(q, \dot{q}) - \mathcal{U}(q) \quad (32)$$

Empleando las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange se obtiene las derivadas parciales para cada eslabón respecto a su articulación (ecuaciones 33, 34 y 35):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1} = & [m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2 + 2l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + m_3 l_1^2 \\ & + 2l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_2 + I_3] \dot{q}_1 \\ & + [l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 \\ & + I_3] \dot{q}_2 + I_3 \dot{q}_3 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_2} = & [m_2 l_{c2}^2 + I_2 + m_3 l_2^2 + I_3] \dot{q}_2 \\ & + [l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 \\ & + I_3] \dot{q}_1 + I_3 \dot{q}_3 \end{aligned} \quad (34)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_3} = [m_3 + I_3] \dot{q}_3 + I_3 \dot{q}_1 + I_3 \dot{q}_2 \quad (35)$$

Se deriva respecto al tiempo el lagrangiano de cada eslabón, obteniendo las ecuaciones 36, 37 y 38:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1} \right] = & [m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2 + 2l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + m_3 l_1^2 \\ & + 2l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_2 + I_3] \ddot{q}_1 \\ & + [l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 \\ & + I_3] \ddot{q}_2 + I_3 \ddot{q}_3 + [-2l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - 2l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ & + [-l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_2^2 \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_2} \right] = & [m_2 l_{c2}^2 + I_2 + m_3 l_2^2 + I_3] \ddot{q}_2 \\ & + [l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 \\ & + I_3] \ddot{q}_1 + I_3 \ddot{q}_3 + [-l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_1 \dot{q}_2 \end{aligned} \quad (37)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_3} \right] = [m_3 + I_3] \ddot{q}_3 + I_3 \ddot{q}_1 + I_3 \ddot{q}_2 \quad (38)$$

Así también se obtiene el lagrangiano de la energía potencial del tercer eslabón el cual se desarrolla en la ecuación 39.

$$\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial d_3} = 1 \quad (39)$$

Los pares aplicados del robot SCARA de tres grados de libertad incluyendo el fenómeno de fricción son fuerzas que actúan sobre cada eslabón, desarrollados en las ecuaciones 40, 41 y 42:

$$\tau_1 = [m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2 + 2l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + m_3 l_1^2 + 2l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 + l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \ddot{q}_2 + b_1 \dot{q}_1 + f_{c1} \text{signo}(\dot{q}_1) + [1 - |\text{signo}(\dot{q}_1)|] \text{sat}(\tau_1; \bar{f}_1) \quad (40)$$

$$\tau_2 = [m_2 l_{c2}^2 + I_2 + m_3 l_2^2 + I_3] \ddot{q}_2 + [l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 + I_3] \ddot{q}_1 + I_3 \ddot{q}_3 + [-l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_1 \dot{q}_2 + b_2 \dot{q}_2 + f_{c2} \text{signo}(\dot{q}_2) + [1 - |\text{signo}(\dot{q}_2)|] \text{sat}(\tau_2; \bar{f}_2) \quad (41)$$

$$\tau_3 = [m_3 + I_3] \ddot{q}_3 + I_3 \ddot{q}_1 + I_3 \ddot{q}_2 + b_3 \dot{q}_3 + f_{c3} \text{signo}(\dot{q}_3) + [1 - |\text{signo}(\dot{q}_3)|] \text{sat}(\tau_3; \bar{f}_3) \quad (42)$$

De los pares aplicados, agrupando en términos de aceleración ($\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{q}_3$) y velocidades ($\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3$), la matriz 43 esta conformada por la aceleración de los eslabones en sus respectivos términos está dada por:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (43)$$

De la descomposición de la matriz 43 se obtiene los parámetros de las ecuaciones 44 al 52:

$$m_{11} = m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2 + 2l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + m_3 l_1^2 + 2l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 + I_3 \quad (44)$$

$$m_{12} = l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 + I_3 \quad (45)$$

$$m_{13} = I_3 \quad (46)$$

$$m_{21} = l_1 l_{c2} m_2 \cos(q_2) + l_{c2}^2 m_2 + I_2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2^2 m_3 + I_3 \quad (47)$$

$$m_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2 + m_3 l_2^2 + I_3 \quad (48)$$

$$m_{23} = I_3 \quad (49)$$

$$m_{31} = I_3 \quad (50)$$

$$m_{32} = I_3 \quad (51)$$

$$m_{33} = m_3 + I_3 \quad (52)$$

La matriz 53 de fuerzas centrípetas y de Coriolis son las velocidades de las articulaciones de las ecuaciones 40, 41 y 42 respectivamente se desarrolla en las ecuaciones 54, 55, 56:

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} [-2l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - 2l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_2 & [-l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_2 & 0 \\ [-l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Los componentes diferentes de cero están en las ecuaciones 54, 55 y 56, que son:

$$C_{11} = [-2l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - 2l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_2 \quad (54)$$

$$C_{12} = [-l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_2 \quad (55)$$

$$C_{21} = [-l_1 l_{c2} m_2 \sin(q_2) - l_1 l_2 m_3 \sin(q_2)] \dot{q}_2 \quad (56)$$

El vector de pares gravitacionales del robot es nulo, ya que el robot SCARA de tres grados de libertad se desplaza en el plano horizontal. Mientras que la fricción presente en el robot SCARA de tres grados de libertad está dado por la combinación de fricciones viscosas, Coulomb y estática [6], en la matriz 57 se representa:

$$f_f(\dot{q}, \tau) = \begin{bmatrix} b_1 \dot{q}_1 + f_{c1} \text{signo}(\dot{q}_1) + [1 - |\text{signo}(\dot{q}_1)|] \text{sat}(\tau_1; \bar{f}_1) \\ b_2 \dot{q}_2 + f_{c2} \text{signo}(\dot{q}_2) + [1 - |\text{signo}(\dot{q}_2)|] \text{sat}(\tau_2; \bar{f}_2) \\ b_3 \dot{q}_3 + f_{c3} \text{signo}(\dot{q}_3) + [1 - |\text{signo}(\dot{q}_3)|] \text{sat}(\tau_3; \bar{f}_3) \end{bmatrix} \quad (57)$$

Donde $b_1, b_2, b_3, f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}, \bar{f}_1, \bar{f}_2$ y \bar{f}_3 son los coeficientes de fricción viscosa de Coulomb y fricción estática de la articulación q_1, q_2, q_3 . $\text{sat}(x; \mu)$ la cual se representa en la matriz 58 con los siguientes valores:

$$\text{sat}(x; \mu) = \begin{cases} \mu & \text{si } x > \mu \\ x & \text{si } -\mu \leq x \leq \mu \\ -\mu & \text{si } x < -\mu \end{cases} \quad (58)$$

3.3 CONTROL DE POSICIÓN

El control de posición es un conjunto de operaciones matemáticas como lo son: la cinemática y la dinámica, además involucra la conexión de sensores los cuales permite obtener datos del medio exterior en el que está el robot. Como primer dato ingresado se tiene la posición de casa o posición inicial.

El objetivo es posicionar el extremo final del robot en un punto hasta recibir una nueva instrucción u orden.

3.3.1 REGULACIÓN

La regulación se refiere al control de movimiento del extremo final del robot desde cualquier posición inicial hacia la posición deseada.

3.3.2 CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO

El algoritmo de control proporcional-derivativo (PD) es un esquema sencillo utilizado en robots manipuladores, este es el caso del robot SCARA de tres grados de libertad. El control proporcional derivativo más la compensación por gravedad está dado por la ecuación 59:

$$\tau = k_p \tilde{q} - k_v \dot{q} + g(q) \quad (59)$$

Para el robot SCARA motivo del presente estudio, se realiza la simulación del control PD ilustrada en el anexo 1, a continuación en la figura 3.7 se encuentra el diagrama de bloques control PD con compensación de gravedad.

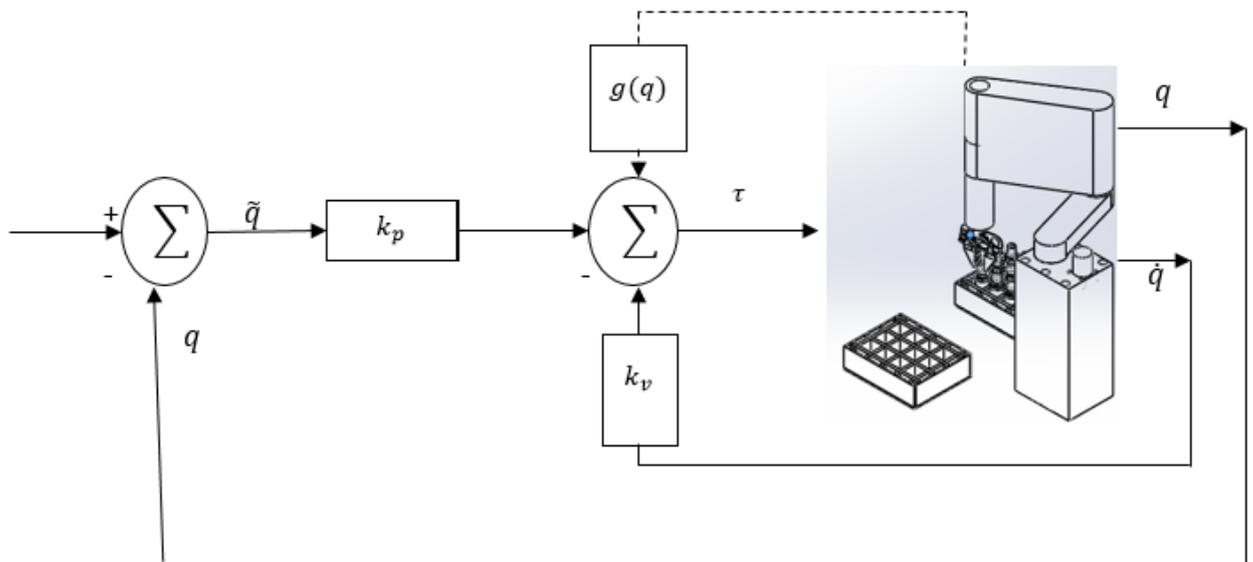


Figura 3.7: Diagrama de bloques control PD

La posición articular \mathbf{q} se alimenta para generar la señal de error de posición $\tilde{q} = q_d - q$. Para inyección de amortiguamiento se emplea \dot{q} . Se contrarresta la energía al control proporcional con el signo menos en la acción derivativa. El término de compensación de gravedad es nulo, puesto que el robot SCARA se desplaza en el plano horizontal [7].

La herramienta de cálculo matemático utilizado para representar los parámetros Denavit-Hartenberg es realizado en MATLAB.

3.6 DISEÑO MECATRÓNICO ROBOT SCARA

El diseño mecatrónico del robot SCARA comprende las siguientes ramas de investigación de las cuales se deriva la creación del robot SCARA de tres grados de libertad.

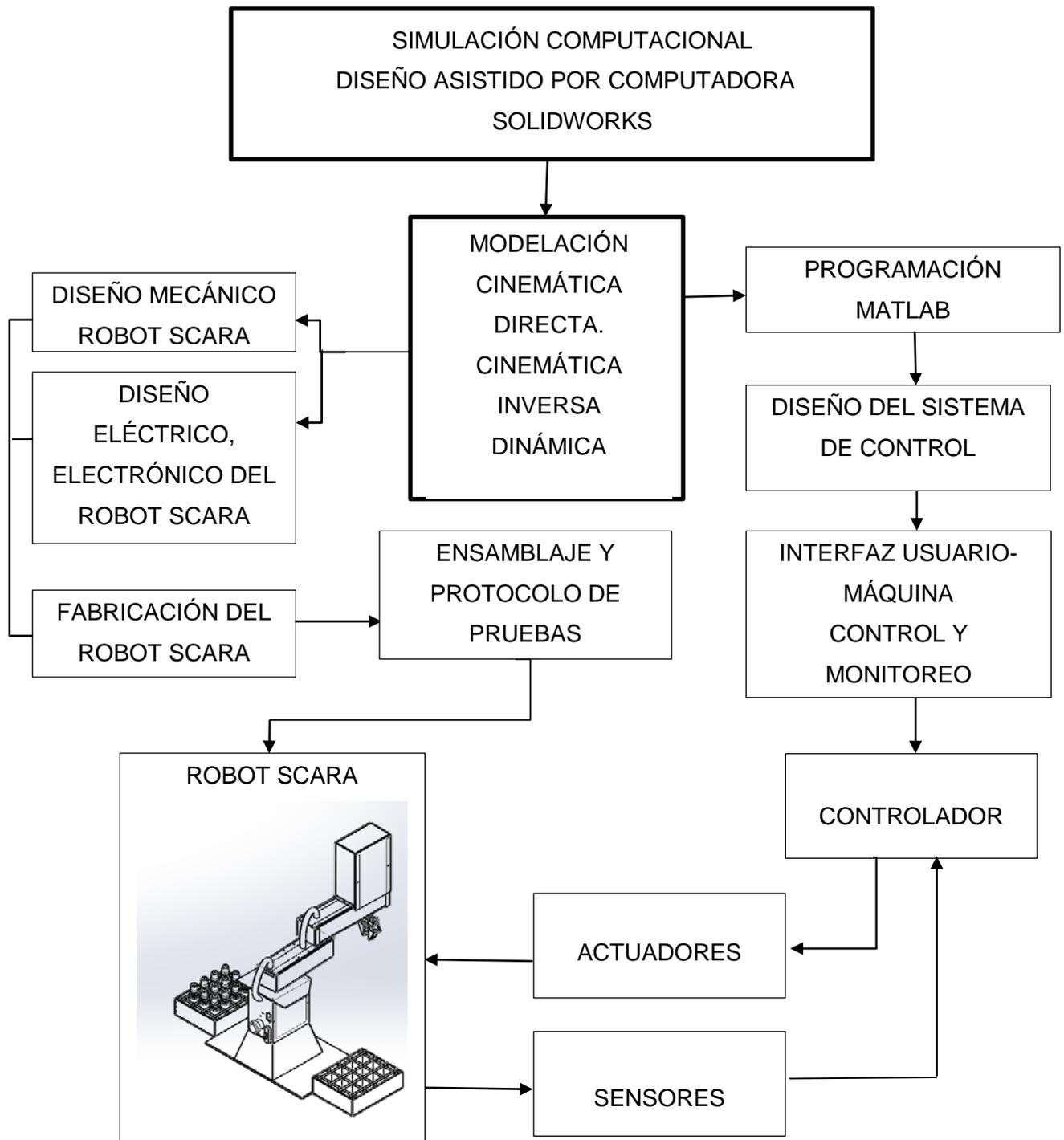


Figura 3.9: Diseño mecatrónico robot SCARA

3.7 SOLUCIÓN MECÁNICA

Para la solución mecánica del robot SCARA de tres grados de libertad, se analiza los elementos rígidos que lo componen y, a continuación, se realiza el diagrama de cuerpo libre encontrando así las fuerzas que actúan en ellos. Los elementos analizados son: brazo, antebrazo, pistón y garra (gripper).

3.7.1 BRAZO Y ANTEBRAZO

A continuación en la figura 3.10 se presenta el diagrama de cuerpo libre para el brazo y antebrazo del robot. Se considera que los dos eslabones (brazo y antebrazo) son rígidos, de iguales dimensiones y están compuestos del mismo material. Se tiene:

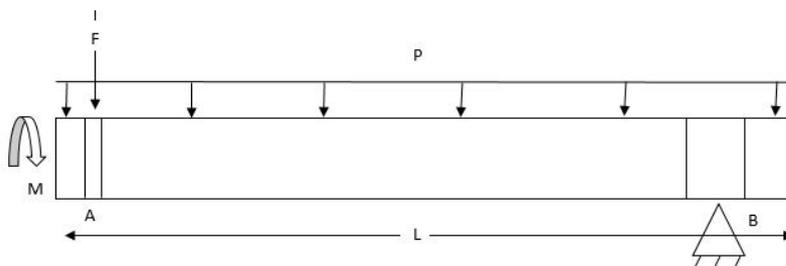


Figura 3.10: Diagrama de cuerpo libre eslabón

En donde:

$$F = 10 \text{ N}$$

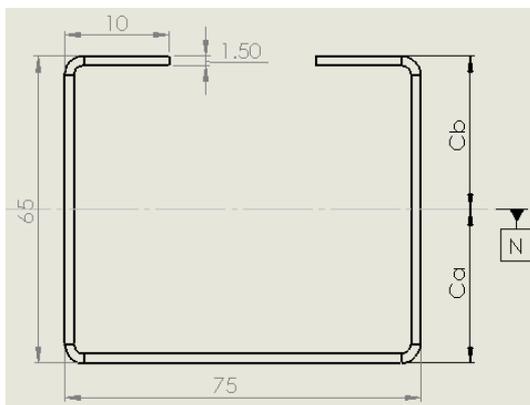
$$P = 5 \text{ N}$$

$$L = 300 \text{ mm}$$

M = Momento flector

$$W = \text{Peso} = 8 \text{ kg}$$

La geometría de la sección transversal del brazo y antebrazo es la indicada a continuación en la figura 3.11.



En donde:

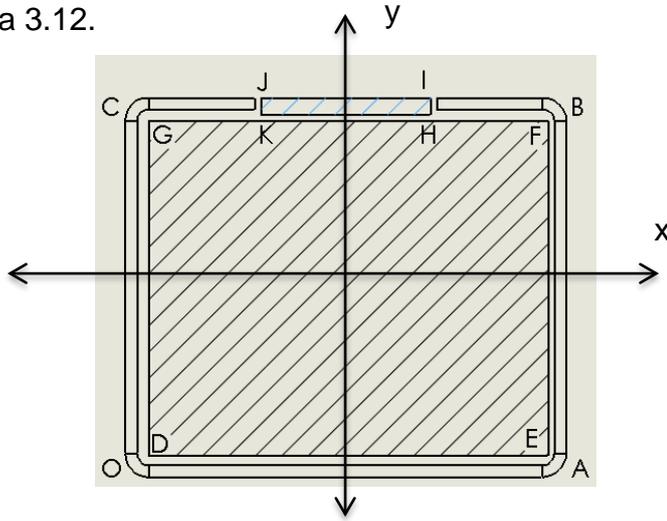
N = Eje neutro

c_a = Distancia perpendicular desde N hacia la fibra más alejada de la sección que soporta tracción

c_b = Distancia perpendicular desde N hacia la fibra más alejada de la sección que soporta compresión

Figura 3.11: Sección transversal tipo C

A continuación se determina la ubicación del centro de gravedad de la sección (brazo y antebrazo), área y momento de inercia. Se considera para el análisis la figura 3.12.



En donde:

σ_t = Esfuerzo a la tracción

σ_c = Esfuerzo a la compresión

E = Modulo de elasticidad

I_x = Inercia de la sección respecto al eje x

I_y = Inercia de la sección respecto al eje y

Figura 3.12: Sección transversal de los indicadores de sección

De la geometría de la sección se tienen los datos de posición e inercia con respecto al eje neutro de la pieza. Se tabulan los datos y cálculos en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Cálculos de centro de gravedad

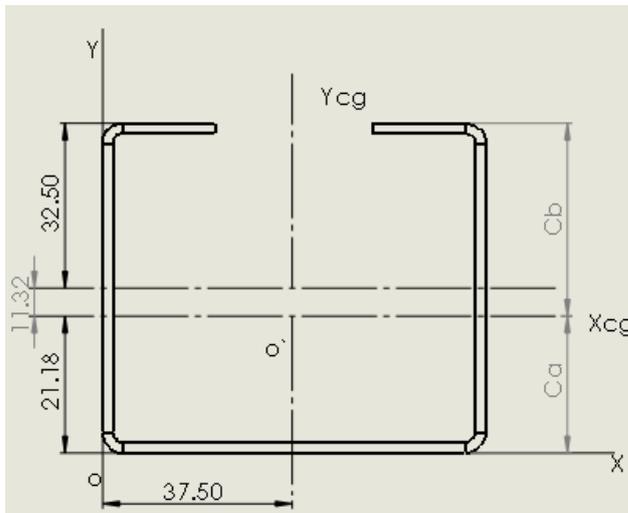
Figura	Área mm^2	\bar{x}_i	\bar{y}_i	$\Delta\bar{x}_i$	$\Delta\bar{y}_i$	I_{x_o}	I_{y_o}
■ OABC	$75 \times 65 = 4875$	$\frac{75}{2} = 37,5$	$\frac{65}{2} = 32,5$	182812,5	158437,5	$\frac{75 \times 65^3}{12} = 1716406,25$	$\frac{65 \times 75^3}{12} = 2285156,3$
■ DEFG	$-[(75-2 \times 1,5) \times (65-2 \times 1,5)] = -4464$	$\frac{75}{2} = 37,5$	$\frac{65}{2} = 32,5$	-167400	-145080	$\frac{72 \times 62^3}{12} = -1500282$	$\frac{62 \times 72^3}{12} = -1928448$
■ HIJK	$-(75-2 \times 10) \times (1,5) = -108$	$\frac{75}{2} = 37,5$	$65 - \frac{1,5}{2} = 64,25$	-4050	-6939	$\frac{55 \times 1,5^3}{12} = 15,5$	$\frac{1,5 \times 55^3}{12} = -20796,8$
TOTAL	303						

Con estos resultados se obtiene la posición del centro de gravedad de la sección de brazo y antebrazo del robot SCARA, dada por las coordenadas:

$$\bar{x} = \frac{\sum \Delta_i x_i}{\sum \Delta} = \frac{182812,5 - 167400 - 4050}{303} = 37,5 \text{ mm} \quad (60)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum \Delta_i y_i}{\sum \Delta} = \frac{158437,5 - 145080 - 6939}{303} = 21,183 \text{ mm} \quad (61)$$

Se ubican, en la figura 3.13, las coordenadas del centro de gravedad de la secciones de brazo y antebrazo del robot SCARA.



En donde:

Y_{cg} = Eje Y del centro de gravedad de la sección transversal

X_{cg} = Eje X del centro de gravedad de la sección transversal

c_a = Distancia perpendicular desde centro de gravedad hacia la fibra más alejada de la sección que soporta tracción

c_b = Distancia perpendicular desde centro de gravedad hacia la fibra más alejada de la sección que soporta compresión

Figura 3.13: Sección transversal de los indicadores de sección

A continuación se obtienen las distancias C_a y C_b , de la sección:

$$C_a = 21.183 \text{ mm.}$$

$$C_b = 65.00 - 21.183 \text{ (mm)} = 43.817 \text{ mm.}$$

Los parámetros para el cálculo de la inercia en "x" se grafican en las figuras 3.13 y 3.14, y se calcula considerando que la sección contiene vacíos que no contribuyen a su inercia:

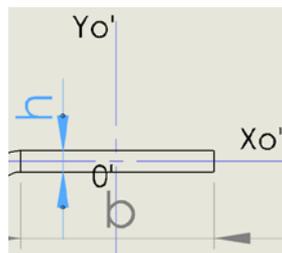


Figura 3.14: Inercia en X'

$$I_{x'} = \frac{bh^3}{12} \quad (62)$$

$$I_{xx} = \frac{75 \times 65^3}{12} - \frac{72 \times 62^3}{12} - \frac{55 \times 1.5^3}{12} + 48.75 \times (11.317)^2 - 44.64 \times (11.317)^2 - 108 \times (43.067)^2 \quad (63)$$

$$I_{xx} = 138746.6154 \text{ mm}^4 \quad (64)$$

Para realizar el análisis de fuerza, en brazo y antebrazo del robot SCARA, se considera los diagramas de cuerpo libre mostrados en la figura 3.15, ya que se tiene el caso de dos cargas y momentos.

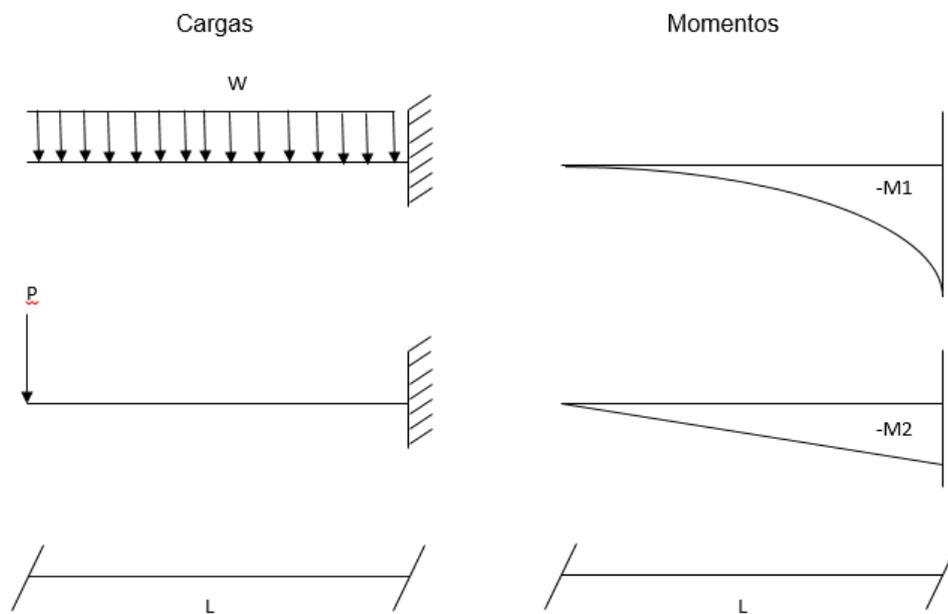


Figura 3.15: Diagrama de cuerpo libre eslabón robot SCARA

Se tiene entonces que los momentos actuantes en el sistema son:

$$M_1 = -\frac{WL^2}{2} \quad (65)$$

$$M_2 = -PL \quad (66)$$

$$M_{max} = M_1 + M_2 \quad (67)$$

$$M_{max} = -\left(\frac{WL^2}{2} + PL\right) \quad (68)$$

$$M_{max} = -\frac{L}{2}(WL + 2P) \quad (69)$$

$$M_{max} = -\frac{0.3}{2}((8 \times 0.3) + (2 \times 5)) \quad (70)$$

$$M_{max} = -1.86 \text{ Nm} \quad (71)$$

Conociendo los momentos máximos del sistema se obtienen los esfuerzos a los que se encuentran expuestos el brazo (eslabón 1) y antebrazo (eslabón 2) del sistema, estos son:

$$\sigma = \frac{M_{max}C}{I} \quad (72)$$

$$\sigma_t = \frac{M_{max}C_b}{I_{xx}} \quad (73)$$

$$\sigma_c = \frac{M_{max}C_a}{I_{xx}} \quad (74)$$

$$\sigma_t = \frac{-1.86 \times 0.043817}{1.38 \times 10^{-7}} \quad (75)$$

$$\sigma_t = -590577 \text{ Pa} \quad (76)$$

$$\sigma_c = \frac{-1.86 \times 0.021183}{1.38 \times 10^{-7}} \quad (77)$$

$$\sigma_c = -285510 \text{ Pa} \quad (78)$$

Además, las deflexiones (deformaciones) que presentarán los eslabones por acción de las fuerzas y momentos se muestran en la figura 3.16.

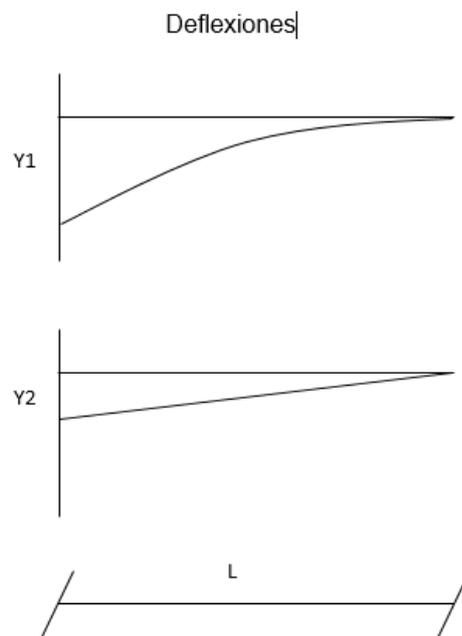


Figura 3.16: Diagrama de deformaciones eslabón robot SCARA

Conociendo por el fabricante, las propiedades del material a utilizarse en brazo y antebrazo (anexo 5), el valor del módulo de elasticidad “E”, se continúa con el cálculo de las deflexiones:

Módulo de elasticidad = $E = 69000 \text{ N/mm}^2$

$$y_1 = -\frac{WL^4}{8EI} \quad (79)$$

$$y_2 = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (80)$$

$$y_{max} = y_1 + y_2 \quad (81)$$

$$y_{max} = -\frac{L^3}{EI_{xx}} \left(\frac{WL}{8} + \frac{P}{3} \right) \quad (82)$$

$$y_{max} = -\frac{0.3^3}{69000 \times 10^6 \times 1.38 \times 10^{-7}} \left(\frac{8 \times 0.3}{8} + \frac{5}{3} \right) \quad (83)$$

$$y_{max} = -1.8588 \times 10^{-5} \text{ m} \quad (84)$$

La deformación “ y_{max} ”, por su magnitud calculada, no compromete de ninguna forma el buen desenvolvimiento del sistema para el robot SCARA de tres grados de libertad y la prestación de sus servicios al usuario (deformación máxima permitida en robots de precisión moderada está en el rango de: $y_{max} = 0.00001$ a 0.0005 [8]). Se concluye entonces que el material, de tipo metálico utilizado, es apto para conformar la estructura de brazo y antebrazo del robot SCARA de tres grados de libertad.

3.7.2 PISTÓN

Se utiliza como tercer eslabón del robot SCARA de tres grados de libertad un pistón (tornillo de potencia) en el mercado se puede adquirir este artículo, se busca un actuador lineal con características mecánicas que satisfagan los parámetros de funcionamiento. El objetivo es disminuir las piezas maquinadas o creadas en un torno. A continuación en la figura 3.17 se describen los parámetros del actuador lineal (datos proporcionados por fabricante).



Figura 3.17: Datos mecánicos del pistón [22]

El diagrama de diseño del pistón se muestra en la figura 3.18

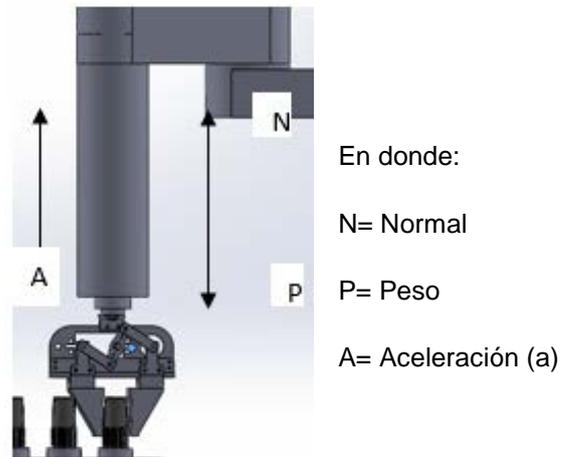


Figura 3.18: Diagrama de diseño

En la figura 3.18, las fuerzas que actúan sobre el tornillo de potencia son :

Tabla 3.6: Simbología de magnitudes

Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo
Normal:	N	Aceleración:	a
Peso:	P	Masa:	m
Gravedad:	G	Tiempo:	t
Velocidad inicial:	V_o	Velocidad final:	V_f

Además, del diagrama (figura 46) se conoce que:

$$N - P = m * a \quad (85)$$

$$N = m * (g + a) \quad (86)$$

$$v = v_o + at \quad (87)$$

$$a = \frac{v - v_o}{t} \quad (88)$$

A continuación se registra, en la tabla 3.7, los datos obtenidos del tornillo de potencia necesarios para su control al servicio del usuario.

Tabla 3.7: Cálculos en el tornillo de potencia

Datos.	Valor.	Unidad.
N:	2.001158	<i>Kgf</i>
m:	0.204	<i>Kg</i>
g:	9.8	<i>m/s²</i>
a:	9.60×10^{-3}	<i>m/s²</i>
t:	1.25	S
V_0 :	0	<i>m/s</i>
V_f :	12	<i>m/s</i>

La fuerza normal calculada (2,001 kgf), es menor 51 veces a la admisible para la solicitud del trabajo que realizará el robot (102,3 kgf, anexo 5), por lo tanto es aceptado el pistón analizado para su uso en la configuración del robot SCARA de tres grados de libertad.

3.7.3 GARRA (GRIPPER)

En la parte final del pistón se colocará una garra que realice las tareas que requiera el usuario. En el presente caso se utiliza una garra plástica mostrada en la figura 3.19.

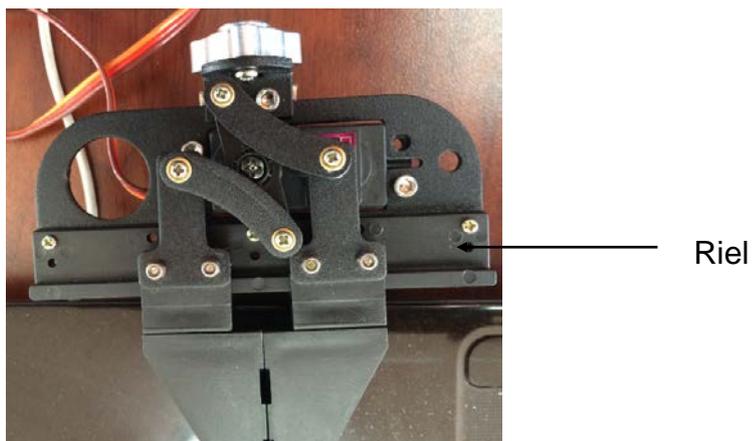


Figura 3.19: Gripper

Los movimientos que realizará la garra son cuasi estáticos, y corresponden al modelo de trabajo mostrado en la figura 3.20.

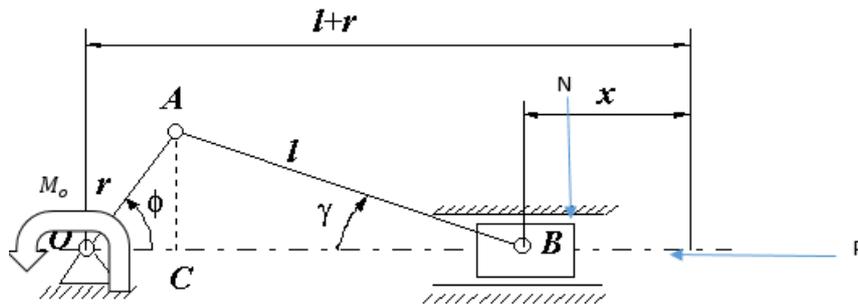


Figura 3.20: Diagrama de cuerpo libre

Los apoyos son:

O= Apoyo simple. Origen (punto conectado al servomotor)

A= Rótula de libre movimientos de traslación en los planos "x" y "y"

B= Apoyo que permite movimientos de traslación en el eje "x"; en el eje "y" mantiene una trayectoria limitada por un riel (figura 3.19)

Análogamente a la figura 3.19, se puede ubicar en la garra del robot SCARA los puntos A,O y C, tal como se muestra en la figura 3.21.

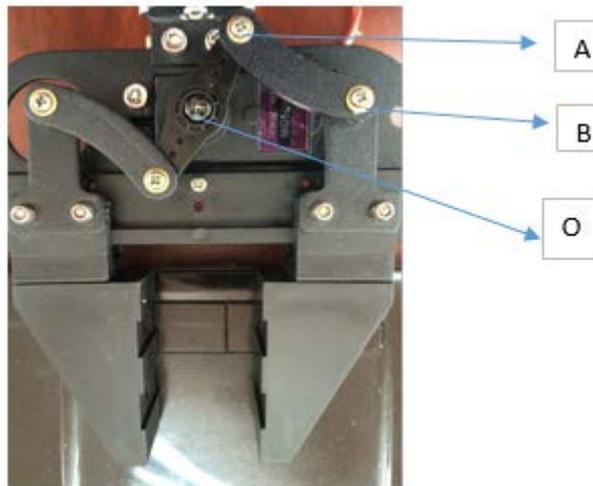


Figura 3.21: Diagrama de diseño

Del diagrama de cuerpo libre (figura 3.20), se obtiene la siguiente identidad:

$$l * \text{sen}(\gamma) = r * \text{sen}(\phi) \quad (89)$$

De la ecuación 91, se despeja “ γ ” y se tiene:

$$\gamma = \text{sen}^{-1}\left(\frac{r}{l}\text{sen}(\phi)\right) \quad (90)$$

Las fuerzas concurrentes que actúan son:

$$N = N(0) \quad P = P \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad T_l = T_l \begin{pmatrix} \text{cos} \\ -\text{sen} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (91)$$

Resolviendo las dos ecuaciones, se obtiene el valor de N:

$$N = P * \tan(\gamma) \quad (92)$$

Y los momentos alrededor del punto ‘O’ son:

$$M_o - (l * \cos(\gamma) + r * \cos(\phi)) * N = 0 \quad (93)$$

$$M_o = (l * \cos(\gamma) + r * \cos(\phi)) * P * \tan(\gamma) \quad (94)$$

$$P = 0,204 \text{ kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.9992 \text{ N} \quad (95)$$

Se tienen entonces, a continuación, los datos para el análisis de la garra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Datos para el análisis de la garra

Datos.	Valor.	Unidades.	Descripción.
l:	0.026	m	26 mm
r:	0.017	m	17 mm
ϕ :	71.56	°	Grados
γ :	35.54	°	Grados

P:	1.9992	N	
M_o :	-0.08232	N*m	Ecuación M_o
m:	0.204	Kg	Masa

De los resultados se concluye que el motor adquirido para el funcionamiento de la garra se encuentra sobre dimensionado; su capacidad es de 0.9215 (N*m), mientras que la solicitud para el servicio del robot es de 0.08232 N*m. (tabla 3.8).

3.8 SOLUCIÓN ELECTRÓNICA

La solución electrónica del robot SCARA de tres grados de libertad comprende: motores de brazo y antebrazo, motores de garra y pistón, tarjeta de comunicación PC- servo motores, cables, reguladores de voltaje, protección de voltaje y ensamble del robot SCARA.

3.8.1 MOTORES BRAZO ANTEBRAZO

El sistema de movimiento de la garra consta de un servomotor; el sistema debe ser homogéneo para facilidad de instalación y sencilla programación. Se elige un servomotor que satisfaga las necesidades de los elementos ya calculados.

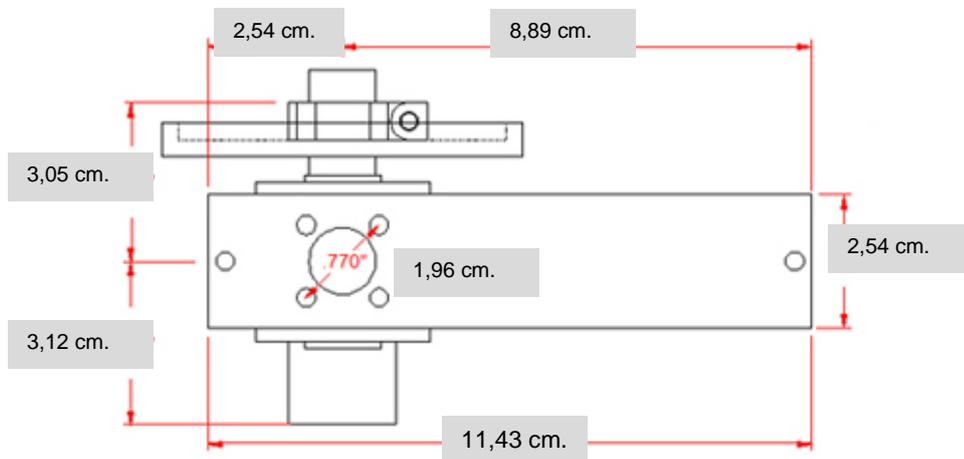
Con un factor de seguridad de dos, se obtiene un valor de torque de 8 (N.m), este sirve de referencia para la búsqueda de las características de servicio necesarias en el servomotor.

El servomotor adquirido es el SPG5685A-45, con factor de seguridad de dos, el cual cumple satisfactoriamente el valor de torque admisible de 8.848 N*m. (valores proporcionados por fabricante [9]). Se emplean dos servomotores, para el brazo y antebrazo respectivamente. Las características del servo motor adquirido son las mostradas en la figura 3.22.

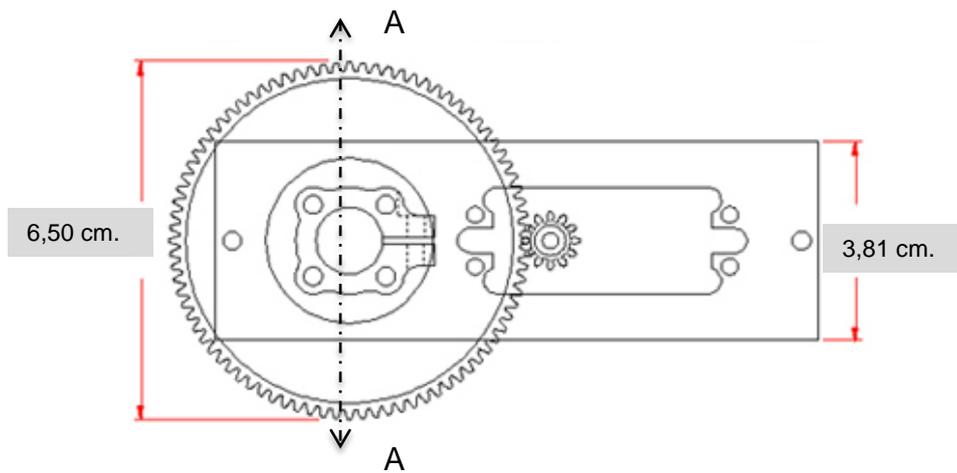
SPG5685A-45	Maximum Rotation	Weight (with Servo)	6.0V Power (ounce-inch)	7.4V Power (ounce-inch)	6.0V Speed (sec/60°)	7.4V Speed (sec/60°)
-------------	------------------	---------------------	-------------------------	-------------------------	----------------------	----------------------



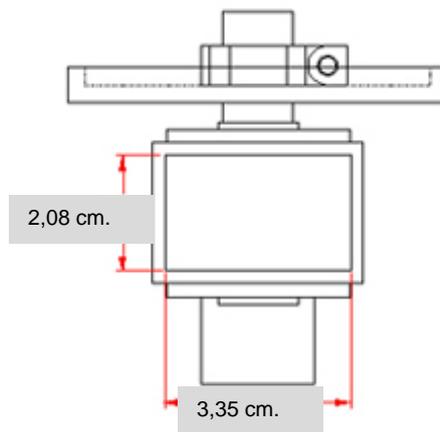
Figura 3.22: Servo motor SPG5685A-45 [



VISTA LATERAL DE SERVOMOTOR



VISTA SUPERIOR DE SERVOMOTOR



CORTE A-A DE SERVOMOTOR

Figura 3.23: Servo motor diagrama SPG5685A-450 [9]

Las características geométricas del servomotor, se encuentran descritas en la figura 3.23. Se nota que las secciones del brazo y antebrazo podrán contener en su altura (6,5 cm) los servomotores, pues su geometría lo permite (altura de servomotor 6,17 cm).

3.8.2 MOTORES GARRA Y PISTÓN

El motor a utilizar en la garra es un servomotor; este es designado por el fabricante de la garra. A su vez para mantener un sistema homogéneo se elige los motores de garra y pistón. Se adquiere dos servomotores del modelo towardpro MG996R, presentados gráficamente en la figura 3.24.



Figura 3.24: Servo motor MG996R [9]

3.8.3 TARJETA DE COMUNICACIÓN PC-SERVO MOTORES

La tarjeta de comunicación debe ser compatible con los servomotores y el computador para obtener un sistema homogéneo. Además se consideran factores importantes como: precio, tamaño, tiempo de respuesta, eficacia de trabajo, entre otros. La tarjeta de comunicación se escogió entre muchas como: las tarjetas arduino y la "PMAC2 UMAC CPU" que para la aplicación están a dimensionadas, la primera tiene una plataforma de programación amplia y funciones que no se utilizan en el presente proyecto, la segunda es para control de motores DC y servomotores. Con la utilización de servomotores se escogió la tarjeta: 8 servo-PC controller, la cual dispone de: entradas para ocho servomotores a controlar, posee una comunicación al computador serial, trabaja con corriente continua de 6-7.2 voltios, capacidad de control de hasta 180°. La tarjeta 8 servo-PC se muestra en la figura 3.25.

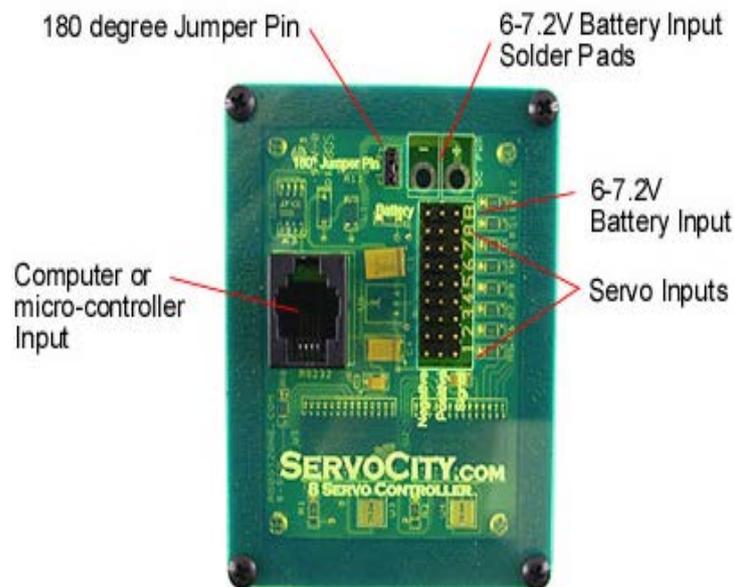


Figura 3.25: 8 servo controller [9]

3.8.4 CABLES

La demanda de corriente del sistema en parada (máxima demanda), es en total de seis amperios (tabla 3.9). Se decide, por satisfacer los requerimientos de corriente (anexo 5), costo y amplia disponibilidad en el mercado, utilizar para la alimentación del sistema el cable 22awg - alambre trenzado. El análisis comparativo se presenta en la tabla 3.9. Se adquieren dos metros de este material.

Tabla 3.9: Tabla de corrientes y voltajes

COMPONENTE ELECTRONICO.	CORRIENTE DE PARADA [A]	CORRIENTE DE TRABAJO [mA]	VOLTAJE [V]
Motor Eslabón 1	2	240	7
Motor Eslabón 2	2	240	7
Motor Eslabón 3	1	200	7
Motor Garra	1	200	7
Circuito de Control	-----	50	7
Total:	6	930	

Para la comunicación PC-8 servo-PC controller se utiliza el cable estándar DB9 macho a USB estándar por ser el único posible para la conexión entre la tarjeta controladora y el computador (PC). Para las conexiones de 24V se utiliza el cable SJEOW número 18, de 2 amperios de resistencia a 24 V y un factor de seguridad mayor a 2, los cuales son los recomendados por el fabricante de tarjeta de control y servomotores para las conexiones de tipo servomotor – tarjeta controladora. Los materiales descritos se ilustran en la figura 3.36.



Figura 3.26: cables de izquierda a derecha: db9 hembra, 22awg, gemelo N 18 [9]

3.8.5 REGULADORES DE VOLTAJE Y PROTECCION DE VOLTAJE

Es importante garantizar la seguridad eléctrica sobre el voltaje utilizado, y permitir un suministro constante. Por ello se emplean dos reguladores de voltaje de 5 voltios, los seleccionados son: Regulador: BEC-5-50 y Power Supply: 12V, 2.5A. (figura 3.27).



Figura 3.27: Regulador BEC-5-50 (IZQ), Power Supply 12V, 2.5A [9]

3.9 ENSAMBLAJE ROBOT SCARA

El proceso de ensamble final-inicio, es importante realizarlo para saber los posibles problemas durante el ensamblaje de cada pieza del robot. Los niveles de tolerancia de medidas son bajos, alrededor de $\pm 1 \text{ mm}$, así también en los diferentes acoples y piezas para evitar dificultades en mantenimiento y ensamblaje. Los prototipos, en su mayoría, utilizan materiales y componentes de ensayo que ayudan en el proceso de mejoras continuas de un prototipo a otro pero con bajos costos.

3.9.1 PRIMEROS ESLABONES

Los prototipos de eslabones previos al diseño definitivo, se fabrican en materiales de: madera laurel, aluminio 6006 y aluminio AISI-430 2mm.

3.9.1.1 Prototipo 1.0: eslabón madera laurel 20 mm

En este prototipo se crea eslabones de madera los que ayudan a percibir problemas de un robot SCARA, pues la falta de experiencia no evidencia los factores críticos de diseño que influyen en el funcionamiento del robot, obteniéndose los resultados mostrados en la figura 3.28. A continuación la tabla 3.10 muestra los componentes utilizados para el prototipo 1.0.

Tabla 3.10: Componentes del Prototipo 1.0

Elemento	Motor/Tarjeta	Material	Observaciones
Base principal	---	Laurel 20 mm de espesor	Soporte limitado a poco espacio, sencillo acople de componentes, mantenimiento correctivo de poca confiabilidad.
Brazo	HITEC HS-422	Laurel 20 mm de espesor	Difícil acople de rodamientos, precisión limitada.
Antebrazo	---	---	No se fabrica por presentarse dificultades de instalación en brazo.
Garra	TOWERPRO MG 996R	Plástico PET	---
Tornillo de potencia	TOWERPRO MG 996R	Aluminio 1050	---
Tarjeta de control	ARDUINO UNO	---	Limitadas funciones de entrada y salida de datos. Programación confiable.
Rueda dentada	---	Aluminio 1050	Paso de 4 mm
Cadena	---	Plástico PET	Confiabilidad en los pasos.

Las conclusiones de la utilización del material madera y demás elementos del sistema se presentan en la tabla 3.11.

Tabla 3.11: Conclusiones prototipo 1.0

Elemento	Ventajas	Desventajas	Se sugiere cambio de diseño (Si/ No)
Base principal	Material moldeable de fácil utilización	Poco espacio para equipo de control. Material altamente inflamable. Dificultad para mantenimiento de componentes de base.	Si
Garra	Material resistente y liviano.	---	No
Tornillo de potencia	Elemento de alto desempeño.	Tamaño excesivo para el tamaño de eslabón 2	No
Antebrazo	Material liviano y moldeable.	Difícil acople de motor – eslabón.	Si
Brazo	Fácil de ensamblar	Cadena de amplio paso, sujeción débil: eslabón-motor-cadena.	Si
Tarjeta de control.	Arduino, fácil de programar	Limitadas funciones. Pocos puertos para sensores	Si
Rueda dentada	Confiable en paso	4 mm cada paso	No
Cadena	Fácil adquisición	---	No

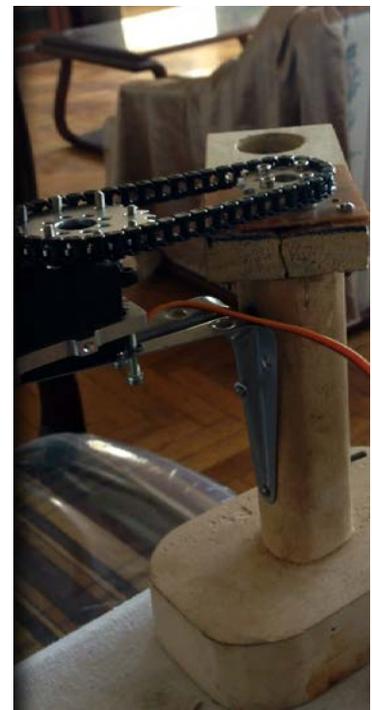
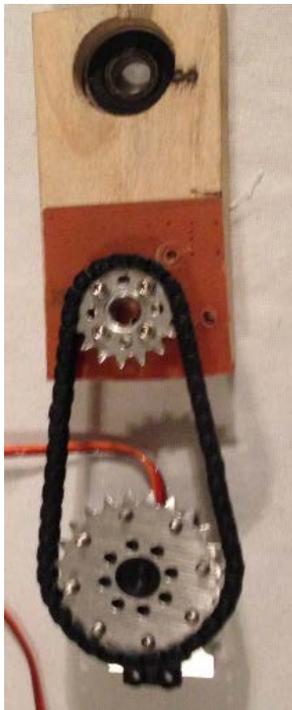


Figura 3.28: Eslabón 1 prototipo 1.0

En las gráficas se ilustran problemas en los rodamientos, los que no brindan la seguridad necesaria de sujeción rodamiento-eslabón, además el paso de precisión es considerable, alrededor de 4 mm por paso.

Por facilidad constructiva, precisión y velocidad, se realiza el diseño de nuevos modelos de sujeción, además que sea de cómoda adquisición en el mercado.

3.9.1.2 Prototipo 2.0: eslabón aluminio 6006

El prototipo fue mejorado en lo referente a los problemas del prototipo 1.0. El resultado fue muy satisfactorio; sin embargo, se presentaron problemas en las juntas eslabón motor. A continuación la tabla 3.12 describe los componentes utilizados.

Tabla 3.12: Conclusiones prototipo 2.0

Elemento	Ventajas	Desventajas	Se sugiere cambio de diseño (Si/No)
Motor Brazo	Estructura completa: rodamiento, engrane 7:1, paso de 1 mm a 0.5 mm.	---	No
Motor Antebrazo	Estructura completa: rodamiento, engrane 7:1, paso de 1 mm a 0.5 mm.	---	No
Motor Tornillo de potencia	Velocidad de 0.4 segundos/60°	Calentamiento de motor altas velocidades	Si
Motor Garra	Velocidad de 0.6 segundos/60°	---	No
Brazo	Perfil de aluminio, resistente, liviano.	Poco espacio montaje de motores.	Si
Antebrazo	Perfil de aluminio, resistente, liviano.	Poco espacio montaje de motores.	Si
Base principal	Resistente, liviana, espacio para circuitos de control y motor.	---	No



Figura 3.29: Prototipo 2.0

El prototipo 2.0 tuvo excelentes mejoras tales como: caja de control (Base principal), rodamientos fijos a la estructura motor-rodamiento-eslabón, paso más pequeño (1 mm), estructura con mayor resistencia a la tracción y menos masa de eslabón.

Aunque el prototipo 2.0 consigue mejoras considerables respecto al prototipo 1.0, aún se tienen problemas, tales como: sujeción débil entre junta eslabón-motor, sujeción débil pistón de elevación y estética del robot.

3.9.1.3 Prototipo 3.0: eslabón madera laurel 6 mm

El prototipo 3.0 se realizó en madera, para resolver los problemas de junta débil en los eslabones respectivamente se tenía un mejor acceso para reparación y ensamblaje. El resultado se muestra en la figura 3.30. A continuación la tabla 3.13 de conclusiones del prototipo 3.0.

Tabla 3.13: Conclusiones del prototipo 3.0

Elemento	Ventajas	Desventajas	Se sugiere cambio de diseño (Si/No)
Motor Tornillo de potencia	Velocidad de 0.8 segundos/60°	---	No
Brazo	Madera laurel de 6 mm de espesor, fácil de ensamblar, estética mejorada.	Pandeo del material.	Si
Antebrazo	Madera laurel de 6 mm de espesor, fácil de ensamblar, estética mejorada.	Pandeo del material.	Si



Figura 3.30: Prototipo 3.0

Al realizar los primeros ensamblajes de los eslabones se evidencia una resistencia muy baja a la tracción del material, lo que produce un ángulo de pandeo considerablemente elevado, pero se consigue corregir errores de juntas y estética del robot.

3.9.2 ROBOT SCARA

La experiencia en los prototipos 1.0, 2.0 y 3.0 fue necesaria para obtener el resultado final que es el siguiente:

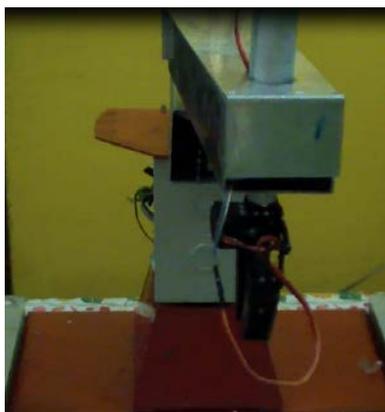


Figura 3.31: Robot SCARA

La construcción del robot SCARA se realiza con los mejores diseños cuidando la estética y funcionalidad del robot. Su estructura se conforma de material metálico,

descrito anteriormente en las secciones: 3.6, 3.7 y 3.8. A continuación la tabla de conclusiones del robot SCARA de tres grados de libertad.

Tabla 3.14: Conclusiones del robot SCARA

Elemento	Ventajas	Desventajas	Se sugiere cambio de diseño (Si/ No)
Base principal	Resistente, liviana, espacio para circuitos de control y motor	---	No
Garra	Material resistente y liviano	---	No
Tornillo de potencia	Elemento de alto desempeño	---	No
Antebrazo	Material: aluminio 1050, liviano y moldeable. Estética mejorada	---	No
Brazo	Fácil de ensamblar	---	No
Tarjeta de control	PC-8 servo-PC controller, 8 puertos de control para motores, controlador de confiable programación	---	No
Motor Tornillo de potencia	Velocidad de 0.8 segundos/60°	---	No
Motor Garra	Velocidad de 0.6 segundos/60°	---	No
Motor Brazo	Estructura completa: rodamiento, engrane 7:1, paso de 1 mm a 0.5 mm	---	No
Motor Antebrazo	Estructura completa: rodamiento, engrane 7:1, paso de 1 mm a 0.5 mm	---	No

CAPÍTULO 4

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas del diseño definitivo del robot SCARA de tres grados de libertad. Se realiza un protocolo de verificación de:

- Análisis comparativo del ángulo solicitado por el usuario y ángulo real ejecutado por el robot SCARA.
- Consumo de corriente en motores
- Voltaje estable.
- Planta sin controlador.
- Planta con controlador PD.

4.1 PRUEBAS

Los resultados de las pruebas realizadas al robot SCARA se presentan en la tabla 4.1.

ESLABÓN 1 Y 2					
ÁNGULO PROGRAMA [°]	ÁNGULO MEDIDO [°]	ERROR	% ERROR ABSOLUTO	CORRIENTE NOMINAL DE TRABAJO [mA]	VOLTAJE NOMINAL DE TRABAJO [V]
-90	-90,00	0,00	0	220	4,98
-80	-80,12	0,12	0,15	210	5
-70	-70,24	0,24	0,34	215	4,99
-60	-59,65	-0,35	0,59	205	5
-50	-49,76	-0,24	0,47	209	5
-40	-39,88	-0,12	0,29	219	5
-30	-30,00	0,00	0,00	212	4,99
-20	-20,12	0,12	0,59	218	4,98
-10	-10,24	0,24	2,35	200	5
0	0,00	0,00	0,00	215	5
10	10,24	-0,24	2,35	215	5
20	20,12	-0,12	0,59	201	5
30	30,00	0,00	0,00	202	5
40	39,88	0,12	0,29	200	5
50	49,76	0,24	0,47	202	5
60	60,35	-0,35	0,59	203	5

70	70,24	-0,24	0,34	213	4,99
80	80,12	-0,12	0,15	212	4,99
90	90,00	0,00	0,00	215	4,99
% ERROR PROMEDIO			9,55		

Tabla 4.1: Pruebas y resultados eslabón 1 y 2



Figura 4.1: Robot SCARA

Se realizó el ensayo (tabla 4.1), en el cual tuvo errores de posición como se observa en la figura 4.1. La posición del robot es errónea con 2 mm en el motor del antebrazo.

Además se corroboró la velocidad de los motores es óptima (0.5 seg/60°).

En los demás ensayos se corrigió con satisfacción los errores del ensayo 1. Todos los demás ensayos se encuentran en el anexo audiovisual.

La siguiente prueba es el Comportamiento de la planta (sistema que controla al robot SCARA) sin controlador. En el simulador se plantea las condiciones iniciales

de la prueba: set point igual a 90 grados, posición deseada 0 grados. El resultado mostrado en la figura 4.2 y las tablas 4.2 y 4.3:

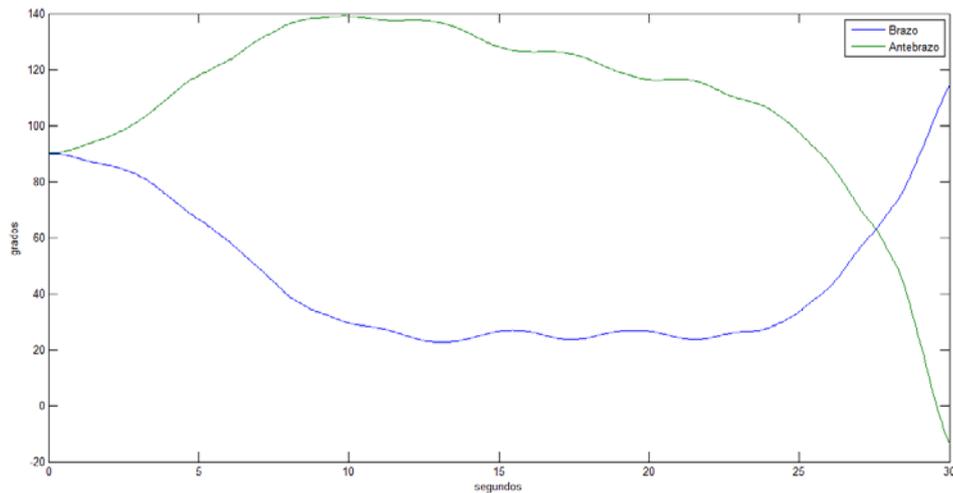


Figura 4.2: Movimiento sin controlador

Tabla 4.2: Resultados sin controlador de eslabón 1 y eslabón 2.

Q1 (grados)	Tiempo (segundos)	Q2 (grados)
90	0	90
88	1	92
86	2	96
82	3	102
75	4	110
66	5	118
59	6	123
49	7	131
39	8	136
33	9	138
29	10	139
28	11	138
25	12	138
23	13	137
24	14	133
27	15	128
50	28	-14

Tabla 4.3 Notación de parámetros sin controlador

Estado	Unidad	Q1	Q2
Sobreoscilación	Grados	---	-14
Tiempo de subida	Segundos	---	27
Tiempo de pico	Segundos	---	10
Tiempo de establecimiento	Segundos	---	---

Donde:

Tiempo de subida:

Es el tiempo necesario para que la salida del sistema alcance el valor deseado.

Sobreoscilación:

Se define como la amplitud de la primera oscilación sobre el valor deseado.

Tiempo de pico:

Es el instante de tiempo en el que se produce la primera sobreoscilación.

Tiempo de establecimiento:

Se define como el tiempo que tarda la salida del sistema en establecerse.

Los cuatro términos deben de ser lo menor posible para que el sistema sea más eficiente.

El movimiento del robot SCARA sin controlador no permite que llegue a la posición deseada. El robot no garantiza que se encuentre en la posición que se establece y se moverá en cualquier posición en cualquier momento, se mantiene así hasta que se agregue un controlador.

A continuación los resultados del prototipo final del robot SCARA se presentan en la tabla 4.4 y 4.5.

Además se obtiene el gráfico de la posición de la articulación en el tiempo con la posición inicial 90 grados y una posición deseada de 0 grados. Se analiza el funcionamiento del controlador PD (proporcional- derivativo) mostrado en la figura 4.3.

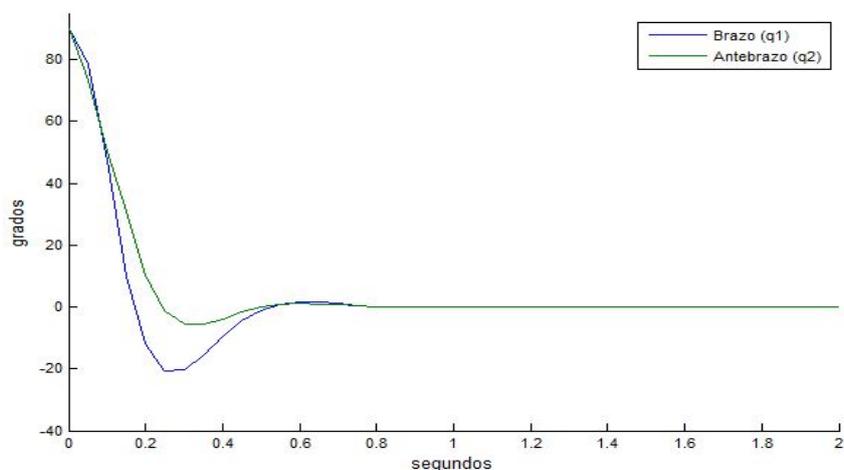


Figura 4.3: Control proporcional derivativo

Tabla 4.4: Resultados control PD de eslabón 1 y eslabón 2

Q1 (grados)	Tiempo (segundos)	Q2 (grados)
90	0	90
79	0.05	73
47	0.1	50
10	0.15	31
-12	0.2	10
-21	0.25	-1
-20	0.3	-6
-16	0.35	-6
-9	0.4	-4
-4	0.45	-2
-1	0.5	0
1	0.55	1
2	0.6	1
1	0.65	1
1	0.7	1
1	0.75	0
0	0.8	0
0	0.85	0
0	0.9	0
0	0.95	0
0	1	0
0	1.05	0
0	1.1	0
0	1.15	0
0	1.2	0

Tabla 4.5: Notación de parámetros control PD

Estado	Unidad	Q1	Q2
Sobreoscilación	Grados	-21	-6
Tiempo de subida	Segundos	0.18	0.24
Tiempo de pico	Segundos	0.25	0.3
Tiempo de establecimiento	Segundos	0.80	0.75

Para obtener un movimiento suave se deben atenuar los impulsos, esto se logra usando un control derivativo. Mediante el control derivativo la articulación del brazo tiene un pequeño sobre impulso, esto se debe a la inercia que soporta el antebrazo lo que provoca un aumento en el offset (error real). Se corrige el error mediante el controlador que recibe las posiciones reales en el tiempo, con el control derivativo se llega a la posición deseada con un offset constante mucho menor al control

proporcional (0.1-0.9). La ecuación de control (ecuación. 59), es de primer orden, aunque el control proporcional es efectivo provoca sobre impulsos y los motores no llegan a la posición deseada en el tiempo esperado; eso se corrige con el control derivativo el cual disminuye los sobre impulsos y permite un amortiguamiento en la llegada de la posición deseada con la derivada aproximándose a cero. Cuando se llega a la posición deseada el control derivativo se convierte en una constante, sin embargo, si se somete a alguna perturbación el control derivativo actúa inmediatamente.

4.2 COSTOS

Se obtiene el costo total del robot SCARA que incluye costos directos e indirectos.

4.2.1 COSTOS DIRECTOS

Son los siguientes: materia prima de construcción y costos de torno descritos en la tabla 4.2.

Tabla 4.6: Tabla de costos directos

Cantidad	Material	Costo [USD]
1	Plancha 2000x2000x2 [mm] Aluminio 1050 H14	200,00
1	Caja de conexión TPE-664 EP	15,00
1	Botón de emergencia	6,00
2	Motores SPG5685A-45	400,00
1	Actuador lineal	50,00
1	Gripper	30,00
1	Metro manguera de gas	6,00
1	Plancha 400x300x6 [mm] Acero A36	20,00
1	Plancha 800x800x3 [mm] Acero A36	10,00
40	Perno Allen DIN 912 mm Completo	15,00
30	Tornillo Galvanizado 5/32	10,00
2	Jabas de Madera para cosméticos	60,00
12	Atomizador R2x8 [cm]	10,00
1	8 servo controller	30,00

Cantidad	Material	Costo [USD]
2	Metros cable 22awg	15,00
1	Metro cable gemelo N18	1,00
2	Servo motor 996	60,00
2	Cable DB9 hembra, macho	30,00
1	Costo de torno, corte, taladrado	100,00
	TOTAL	1068,00

4.2.2 COSTOS INDIRECTOS

Comprende los costos relacionados a materiales secundarios, costos de ingeniería, costos de imprevistos. En la tabla 4.3.

Tabla 4.7: Tabla de costos indirectos

Cantidad	Material	Costo [USD]
3	Paquetes de disco x 20 de corte dremel 430	30,00
3	Brocas de 3 mm acero	3,00
2	Llaves N7	2,00
1	Juego de alicates Trupper	8,00
1	Grasa Multipurpose 13 oz	5,00
1	Pintura en spray plata brillante	2,00
1	Pasta para soldar estaño	2,00
1	Aceite 3 en 1 130ml	1,00
1	Cinta aislante eléctrica color rojo	1,00
1	Juego de desarmadores STANLEY	15,00
100	Horas de diseño de robot SCARA	2000,00
	Imprevistos	100,00
	COSTO TOTAL (dólares americanos)	2169,00

4.2.3 COSTO TOTAL ROBOT SCARA

El costo total fue de \$3237 USD, esto incluye costos directos y costos indirectos.

CONCLUSIONES

- De la investigación de robots existentes en el mercado de uso industrial, detallada en la sección 1.1, se conoce que existen varios tipos de robots que se han adaptado a los requerimientos del usuario, siendo una herramienta versátil, útil para la producción que requiere de mínima incursión de mano de obra y minimiza la ocurrencia de accidentes en trabajos peligrosos o repetitivos.
- En la generación del algoritmo del robot SCARA se concluye que el mejor programa de simulación es el MATLAB por su potente desarrollo en ecuaciones matemáticas, y rápida conexión de interfaz entre el computador y robot. Por ello la gran mayoría de sistemas utilizan esta herramienta de desarrollo de software.
- Los acoples entre brazo y antebrazo (articulaciones) son los elementos que requieren mayor atención por cuanto, en este caso, manejan elementos de tamaño pequeño, difíciles de adquirir y de instalar por las limitaciones de espacio.
- El diseño del robot SCARA del presente trabajo se encuentra sobre estimado al menos con un 50% respecto a robots SCARA comerciales, por cuanto no se encuentran en el mercado motores (servomotores) de menor capacidades de carga a 1 kg.
- La interfaz usuario-pc-robot, ha sido uno de los mayores retos. El diseño responde a un entorno amigable al usuario, y a su vez realiza el control de motores. Las perturbaciones del sistema y las inercias a las que se sometieron los motores fueron las mayores dificultades. Se realizaron cambios en estructura y acople de rodamientos (sección 3.7 y 3.9) para vencer este problema.

- Los planos mecánicos que describen los mecanismos que actúan sobre cada eslabón y su conformación, elementos electrónicos y eléctricos del presente proyecto se presentan siguiendo la norma INEN.
- El desarrollo de manuales de mantenimiento y de usuario es empírico, por cuanto para su adecuada elaboración se debe tener el registro de parámetros de evaluación (desgastes, errores en programación, fallas en circuitos, eficiencia de servicio, dificultades presentadas por usuario, observaciones etc.) por un mínimo de tiempo, de tal forma que se puedan evaluar, por ejemplo, los desgastes producidos en piezas y posteriormente su remplazo, dificultades en la manipulación del robot SCARA, entre otras.
- La inversión que representa la construcción de un robot SCARA con tres grados de libertad, del presente estudio, es justificada ampliamente si comparamos tan solo el costo de la mano de obra de un año laboral en donde actualmente el salario básico unificado es de 354,00 dólares (4248,00 dólares anuales, sin beneficios de ley). Representa un ahorro anual del 24%. Se puede referir en la sección 4.2.3, cuando se compara el trabajo de un robot SCARA y el recurso humano.
- Los sensores constituyen una parte fundamental en el diseño del robot SCARA, pues ayudan a registrar y controlar los movimientos que solicita el usuario.
- La creación de al menos 3 prototipos fue satisfactoria para corregir errores e implementar mejoras a un menor costo.
- La precisión de la comunicación entre los motores y el programa es fundamental para el éxito del proyecto, pues garantiza su efectividad en la realización del trabajo.

RECOMENDACIONES

- Por su sencillez de deducción se recomienda desarrollar el modelo de Bresenham para los programas de interfaz PC - robot.
- Ya que uno de los riesgos del sistema de robots es la existencia de colisiones entre eslabones, se recomienda realizar simulaciones en los puntos críticos del sistema, que son los extremos en la trayectoria del brazo y antebrazo.
- Considerando que la magnitud de la fricción que experimentan las juntas del sistema es un punto crítico de éste, se recomienda utilizar un factor de seguridad igual a tres para el cálculo del torque último (de servicio).
- Se recomienda diseñar un circuito de protección para corrientes parásitas e interferencias en cables debido a la frecuencia con que se presentan interferencias en el entorno de trabajo causadas por motores de corriente alterna de frecuente uso en instalaciones industriales.
- Se recomienda para facilidad de mantenimiento y reparación, ubicar en un mismo sitio los circuitos eléctricos y electrónicos, sin que esto perjudique el área disponible para la reparación o mantenimiento en sitio del robot.
- En la implementación de rodamientos se recomienda diseñar una estructura apropiada para los acoples entre eslabones o a su vez comprar integralmente el sistema rodamiento – chumacera, esto ahorrará gastos adicionales de maquinado de piezas en torno.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. C. S. R. Verónica Gallo, «Universidad Privada del Norte,» 1 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://refi.upn.edu.pe/index.php/refi/article/view/7/76>. [Último acceso: 2 Julio 2014].
- [2] D. I. V. M. Diego Checa, «academia.edu,» 10 01 2009. [En línea]. Available: <http://www.academia.edu/3811178>. [Último acceso: 2014 07 2014].
- [3] Borjanen, «gpapivitoria,» 5 28 2010. [En línea]. Available: <http://gpapivitoria.blogspot.com/>. [Último acceso: 22 07 2014].
- [4] Herrera, «Herrera unt,» [En línea]. Available: [//www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dao/files/2012/04/Robotica-2.pdf](http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dao/files/2012/04/Robotica-2.pdf). [Último acceso: 22 07 2014].
- [5] B. Vinicio, «Monografias,» [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos82/robotica-tipos-robot/robotica-tipos-robot2.shtml>. [Último acceso: 23 07 2014].
- [6] A. Borger, «Universidad de Atacama,» 20 Diciembre 2004. [En línea]. Available: http://www.industriaynegocios.cl/Academicos/AlexanderBorger/Docts%20Docencia/Seminario%20de%20Aut/trabajos/2004/Rob%C3%B3tica/seminario%202004%20robotica/Seminario_Robotica/Documentos/CINEM%C3%81TICA%20Directa.htm. [Último acceso: 11 Agosto 2014].
- [7] J. C. R. Calin, «Robplcalin,» [En línea]. Available: <http://robplcalin.jimdo.com/aplicaciones-didacticas/robots/>. [Último acceso: 23 07 2014].

- [8] S. Nova Àgora, «Interempresas,» [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/ObrasPublicas/FeriaVirtual/Producto-Robot-cristalero-KS-400-117664.html>. [Último acceso: 23 07 2014].
- [9] Servocity, «Servocity,» 3 2 2012. [En línea]. Available: https://www.servocity.com/html/spg785a-5_0_servo_gearbox.html#.VXGfAcqqko. [Último acceso: 8 12 2014].
- [10] S. d. C. Binzel, «Sistema intercambiador de herramientas WWS,» [En línea]. Available: <http://www.binzel-abicor.com/MX/spa/productos/robot-periphery/tool-changing-system-wws/>. [Último acceso: 24 07 2014].
- [11] A. Bueno, «Portaleso,» [En línea]. Available: http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_robot_3/robot_indice.html. [Último acceso: 23 07 2014].
- [12] O. Towler, «Oilgear Towler,» [En línea]. Available: <http://www.oilgeartowler.es/OilgearSpain/Productos/ElectronicayControl/PupitresdeMando.htm>. [Último acceso: 24 07 2014].
- [13] S. S.L., «Sensing,» [En línea]. Available: http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Sensores-de-%C3%A1ngulo-y-rotaci%C3%B3n_39/Gu%C3%ADa-de-selecci%C3%B3n-de-sensores-de-%C3%A1ngulo_197/. [Último acceso: 24 07 2014].
- [14] A. M. R. Enrique Mandado Pérez, «Libro web alfaomega,» [En línea]. Available: http://libroweb.alfaomega.com.mx/catalogo/automatasprogramables/libreacceso/libreacceso/reflector/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_01-INTRODUCCION.pdf. [Último acceso: 10 07 2014].
- [15] J. C. Parejo, «Personal .us.es,» 1 03 2008. [En línea]. Available: http://personal.us.es/jcortes/Material/Material_archivos/Articulos%20PDF/RepresentDH.pdf. [Último acceso: 24 07 2014].

- [16] F. R. Cortés, «Robótica, Control de robots manipuladores,» de *Dinámica*, México, Alfaomega, 2011, pp. 255-259.
- [17] Grupo de investigación nbio, «nbio,» 2 Abril 2012. [En línea]. Available: <http://nbio.umh.es/files/2012/04/practica3.pdf>. [Último acceso: 5 Noviembre 2014].
- [18] F. R. Cortés, «Robótica, Control de robots manipuladores,» de *Dinámica*, México, Alfaomega, 2011, p. 338.
- [19] F. R. Cortés, «Robótica, Control de robots manipuladores,» de *Dinámica*, México, Alfaomega, 2011, pp. 260-263.
- [20] F. R. Cortés, «Robótica, Control de robots manipuladores,» de *Control de posición de robots manipuladores*, México, Alfaomega, 2011, pp. 334-342.
- [21] R. L. Mott, «Resistencia de materiales,» de *Flexiones de viga*, México, PEARSON EDUCACIÓN, 2009, p. 459.
- [22] M. I. Co., «Alibaba,» [En línea]. Available: <http://spanish.alibaba.com/p-detail/12v-24v-36v-high-speed-linear-actuator-motor-1989350519.html>. [Último acceso: 10 08 2014].