

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT TIPO SCARA  
CON SISTEMA DE VISIÓN DE MÁQUINA, QUE PUEDA SER  
UTILIZADO COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA EN  
ASIGNATURAS DE ROBÓTICA Y CONTROL.

CÉSAR EDUARDO JIMÉNEZ ROBAYO



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2009

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT TIPO SCARA  
CON SISTEMA DE VISIÓN DE MÁQUINA, QUE PUEDA SER  
UTILIZADO COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA EN  
ASIGNATURAS DE ROBÓTICA Y CONTROL.

CÉSAR EDUARDO JIMÉNEZ ROBAYO

TRABAJO DE GRADO PARA ACCEDER AL TITULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA

Tutor

Nelson Fernando Velasco Toledo

Odontólogo U.Nacional de Colombia

Ing. en Mecatrónica U. M. Nueva Granada

Estudiante M Sc. Ing. Biomédica U. Nacional de Colombia

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRONICA  
BOGOTÁ D.C.

2009

*Dedicado...*

*A Dios todopoderoso que cuida cada uno de mis pasos*

*A mis padres que me dieron el maravilloso regalo de la vida, me brindaron todo en todos los aspectos desde el principio.*

*A mis hermanos que siendo familia son muy importantes en mi vida.*

*A mis amigos más cercanos que son como mi segunda familia.*

*A aquellos docentes que encuentran en el arte de enseñar mucho más que la academia de temas y notas, que ven en el estudiante una oportunidad de formar personas con sentido de equidad, fraternidad y transparencia.*

*A todas las personas que de una forma u otra abrieron y cerraron puertas para que este trabajo fuera posible.*

*César Eduardo*





---

# Agradecimientos

---

Mis agradecimientos primero a Dios todopoderoso, sin su ayuda nada de esto hubiera sido posible, también a mis padres que me han soportado y ayudado en todo momento de manera incondicional, a mis hermanos que me han brindado su amistad y apoyo, a mis amigos mas cercanos que me han dado momentos de alegría y esparcimiento, y finalmente a todas las personas que me ayudado de una forma u otra a cumplir los objetivos de una formación personal correcta.

---

# Índice general

---

<b>Índice general</b>	<b>I</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>III</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>V</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1. HISTORIA y DEFINICIONES . . . . .	3
2.2. ROBÓTICA DE MANIPULADORES . . . . .	5
2.2.1. CINEMÁTICA . . . . .	7
2.2.2. DINÁMICA . . . . .	8
2.2.3. PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS . . . . .	9
2.2.4. CONTROL DE MANIPULADORES . . . . .	11
<b>3 DESARROLLO DEL TRABAJO</b>	<b>13</b>
3.1. DISEÑO CONCEPTUAL . . . . .	13
3.2. ESPACIO DE TRABAJO . . . . .	15
3.3. MANIPULADOR SCARA DE 4DOF . . . . .	16
3.3.1. SELECCIÓN DE MOTORES Y DISEÑO MECÁNICO . . . . .	16
3.3.2. SELECCIÓN DE SENSORES Y DISEÑO ELECTRÓNICO . . . . .	20
3.3.3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y MÉTODOS DE CONTROL . . . . .	24
3.4. VISIÓN DE MÁQUINA . . . . .	39
3.4.1. CARACTERÍSTICAS . . . . .	39
3.4.2. ALGORITMO . . . . .	41
3.4.3. RESULTADOS OBTENIDOS . . . . .	42
3.5. INTERFAZ DE USUARIO . . . . .	44
3.6. UNA HERRAMIENTA DE APRENDIZAJE . . . . .	46

<b>4 DESEMPEÑO Y RESULTADOS</b>	<b>47</b>
<b>5 SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES</b>	<b>49</b>
<b>6 CONCLUSIONES</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>53</b>
<b>A PLANOS MECÁNICOS</b>	<b>57</b>
<b>B PLANOS ELECTRÓNICOS</b>	<b>59</b>
<b>C HOJAS DE ESPECIFICACIÓN (Datasheet)</b>	<b>61</b>
<b>D FUNCIONES EMERO<sup>®</sup></b>	<b>63</b>
<b>E MODELO DINÁMICO NEWTON-EULER</b>	<b>65</b>
<b>F MEDIOS MAGNÉTICOS</b>	<b>67</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaciones</b>	<b>69</b>

---

# Índice de figuras

---

2.1. ROBOTS INDUSTRIALES . . . . .	4
2.2. ROBOTS DE INVESTIGACIÓN . . . . .	4
2.3. ROBOTS HUMANOIDES . . . . .	5
2.4. PLANEACIÓN ARTICULAR . . . . .	10
2.5. PLANEACIÓN CARTESIANA 1-1 . . . . .	10
2.6. PLANEACIÓN CARTESIANA 1-2 . . . . .	11
2.7. TIPOS DE CONTROLADORES . . . . .	12
3.1. DISEÑO CONCEPTUAL GENERAL . . . . .	13
3.2. DISEÑO MANIPULADOR SCARA . . . . .	14
3.3. DISEÑO INTERFAZ DE USUARIO . . . . .	14
3.4. DISEÑO VISIÓN DE MÁQUINA . . . . .	15
3.5. DISEÑO ESPACIO DE TRABAJO . . . . .	15
3.6. ESPACIO DE TRABAJO . . . . .	16
3.7. PRINCIPIOS DE DISEÑO . . . . .	16
3.8. BOSQUEJO PRELIMINAR . . . . .	17
3.9. DISEÑO MECÁNICO . . . . .	18
3.10. ANÁLISIS FEM . . . . .	19
3.11. MANIPULADOR SCARA 4DOF . . . . .	19
3.12. GRIPPER DE TRES DEDOS . . . . .	20
3.13. ENCODER INCREMENTAL BIDIRECCIONAL (PULSOS) . . . . .	20
3.14. CONTROLADORES DE POTENCIA . . . . .	21
3.15. ESQUEMA GENERAL DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN . . . . .	22
3.16. DSPIC30F4011 . . . . .	23
3.17. CODIFICACIÓN . . . . .	23
3.18. PARÁMETROS D-H . . . . .	25
3.19. CENTROS DE MASA . . . . .	26
3.20. BLOQUE DEL MODELO SCARA . . . . .	29
3.21. DIAGRAMA DE COMPARACIÓN . . . . .	29
3.22. PRUEBAS DE COMPARACIÓN . . . . .	30

3.23. SIMULACION NX SIEMENS . . . . .	31
3.24. CONFIGURACIÓN DE PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS MATLAB	32
3.25. CONTROL PID . . . . .	33
3.26. ALGORITMO GANANCIAS PID . . . . .	34
3.27. PRUEBA 1 - CONTROLADOR PID - SIMULACIÓN . . . . .	35
3.28. PRUEBA 2 - CONTROLADOR PID - SIMULACIÓN . . . . .	35
3.29. CONTROL TACOMETRICO . . . . .	36
3.30. PRUEBA 1 - CONTROLADOR TACOMETRICO - SIMULACIÓN . . . . .	36
3.31. PRUEBA 2 - CONTROLADOR TACOMETRICO - SIMULACIÓN . . . . .	37
3.32. TRAYECTORIA DE REFERENCIA . . . . .	38
3.33. PRUEBA 1 - CONTROLADOR PID - PLANTA REAL . . . . .	38
3.34. PRUEBA 2 - CONTROLADOR PID - PLANTA REAL . . . . .	38
3.35. PRUEBA 1 - CONTROLADOR TACOMETRICO - PLANTA REAL . . . . .	39
3.36. PRUEBA 2 - CONTROLADOR TACOMETRICO - PLANTA REAL . . . . .	39
3.37. MÓDULO DE VISIÓN DE MÁQUINA . . . . .	40
3.38. OBJETOS A IDENTIFICAR . . . . .	40
3.39. TEMPLATE MATCHING . . . . .	41
3.40. CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA . . . . .	42
3.41. FASES DEL MÓDULO DE VISIÓN DE MÁQUINA . . . . .	43
3.42. INTERFAZ DE MONITOREO DE VARIABLES ARTICULARES(A posi- ción, B velocidad, C aceleración, D control gripper) . . . . .	44
3.43. INTERFAZ DEL MODELO VIRTUAL(A zoom,B ángulo eje z,C ángulo eje x) . . . . .	44
3.44. INTERFAZ DE PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS . . . . .	45
3.45. INTERFAZ DE VISION DE MAQUINA . . . . .	45
3.46. INTERFAZ PARAMETROS DE CONTROL . . . . .	46

---

# Índice de cuadros

---

1.1. METODOLOGÍA . . . . .	2
3.1. MATERIALES . . . . .	18
3.2. VOLTAJE MOTOR vs FRECUENCIA ENCODER . . . . .	21
3.3. TABLA DE CODIFICACIÓN . . . . .	24
3.4. PARÁMETROS D-H . . . . .	25
3.5. PARAMETROS FISICOS DEL MANIPULADOR . . . . .	25
3.6. PRUEBAS DEL MODELO OBTENIDO POR LAGRANGE-EULER . . . . .	29
3.7. PRUEBAS DEL MODELO OBTENIDO POR NEWTON-EULER . . . . .	29
3.8. GANANCIAS PID - SIMULADO . . . . .	33
3.9. PRUEBAS CONTROLADOR PID . . . . .	34
3.10. GANANCIAS PID - REAL . . . . .	37
3.11. PARÁMETROS CREATIVE WEBCAM INSTANT . . . . .	43

## RESUMEN

Con el fin de brindar una herramienta que ayude al entendimiento de conceptos básicos y avanzados de robótica y control, se desarrollo una plataforma de aprendizaje donde se apliquen de manera practica estos temas. Este trabajo presenta el diseño, construcción y puesta en marcha de un robot manipulador SCARA de 4DOF, enfocado para la enseñanza de la materias de robótica y control, se realiza una descripción global y específica de diseño, tanto en el ámbito mecánico, electrónico e informático de la plataforma. Se formula y comprueba el modelo matemático del manipulador a través de varios métodos; se aplican técnicas convencionales de control tanto en la simulación como en el robot construido. El modulo de visión de máquina permite obtener la posición de objetos que se encuentren dentro de un espacio de trabajo, dando la posibilidad al robot de realizar tareas de re-ubicación de objetos sin necesidad de supervisión directa por parte del usuario. Se desarrollo un software para computador orientado hacia el aprendizaje, donde el usuario puede realizar distintas tareas tales como: análisis de variables articulares tanto en gráficas como en un modelo virtual 3D, configuración de trayectorias de movimiento, selección y calibración de métodos de control. Con el fin de facilitar el uso de esta plataforma se elaboraron tres vídeo-manuales donde se explica la simulación, configuración y puesta en marcha del robot manipulador.

*Palabras clave: robótica, control, DOF, SCARA, visión de máquina, modelo virtual.*

## Capítulo 1

---

# INTRODUCCIÓN

---

El estudiante neogranadino de Ingeniería en mecatrónica al cursar las materias de control y robótica, afronta diferentes contenidos y conceptos teóricos acompañados con algunas aplicaciones en laboratorio, pero no se dispone de una herramienta que permita comprobar los conocimientos teóricos con aplicaciones reales, por este motivo se ve la necesidad de elaborar una plataforma de aprendizaje donde se puedan dar de una manera clara y conjunta la aplicación de temáticas de la robótica de manipuladores además de la comparación precisa de diferentes técnicas de control. Para esto se propone diseñar y construir un robot manipulador de 4 DOF que pueda ser utilizado como apoyo didáctico en asignaturas de robótica y control, el robot contara con un software que permitirá aplicar diferentes estrategias de control además de modificar el parámetro de las mismas, calcular diferentes tipos de planeación de trayectorias y hacer seguimiento de las diferentes variables físicas del manipulador.

La plataforma tendrá además un sistema de visión de maquina que permitirá al manipulador ubicar determinados objetos en el espacio de trabajo, y así poder manipularlos de manera automática. Se propone elaborar un manual de usuario básico que servirá de guía para profesor al utilizar el modulo en sus practicas de laboratorio. Entre los alcances del proyecto se encuentra la aplicación conjunta y sinérgica de la mecánica, electrónica y control, su ejecución espacial y cronológica esta delimitada a la Universidad Miliar Nueva Granada para el segundo semestre del año 2009.

Entre los antecedentes la mayoría de trabajos sobre robots manipuladores tratan sobre la técnicas de control que se aplican en ellos, en [7, 8, 13] se afrontan técnicas modernas de control inteligente tales como control evolutivo-difuso, redes neuronales y adaptativo-neuro-difuso; sobre la planeación de trayectorias cabe resaltar [12] aquí la cinemática directa e inversa se aplica al manipulador a través de técnicas de redes neuronales; en [16] se aplican técnicas de calibración de un robot a través de la asistencia de



una cámara; por otra parte uno de los grandes problemas de la robótica de manipuladores es la estimación de los parámetros dinámicos, en [9] se trata a fondo este tema desde una perspectiva clásica y en [15] de una manera moderna.

Como metodología adoptada para el desarrollo del trabajo, se hace un diseño cronológico conjunto donde se definen tareas específicas que se deben desarrollar de forma serial y otras que son independientes y se pueden hacer en paralelo ver tabla 1.1.

LÍNEA	ETAPA1	ETAPA2	ETAPA3	ETAPA4	ETAPA5
MECÁNICA	selección de motores	diseño mecánico	mecanizado		
ELECTRÓNICA		circuitos de potencia, electrónica y comunicación	pruebas y resultados		
CONTROL		calculo de cinemáticas, trayectorias y modelo dinámico	programación de cinemáticas, trayectorias y controles	sintonización de controladores	pruebas y resultados
VISIÓN	selección de la cámara	investigación de técnicas de visión	programación del algoritmo	sintonización	pruebas y resultados

Cuadro 1.1: METODOLOGÍA

Este documento describe de manera consecutiva y detallada el proceso de diseño e implementación del modulo didáctico y aprendizaje, se encontraran bases teóricas esenciales para el entendimiento del funcionamiento del robot, explicaciones detalladas de los algoritmos utilizados, comparaciones cuantitativas de diferentes métodos probados e implementados, imágenes de cada una de las partes del proyecto, conclusiones basadas en los resultados obtenidos y recomendaciones para trabajos futuros; este trabajo esta destinado especialmente para personas con conocimientos afines en las áreas de matemáticas, mecánica, electrónica, robótica, control e informática, pero a pesar de estas limitaciones, puede ser leído y comprendido por cualquier persona con alguna formación técnica.

## Capítulo 2

---

# MARCO TEÓRICO

---

### 2.1. HISTORIA y DEFINICIONES

La palabra robótica según el diccionario de la real academia española se define como la técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales; remontándonos a los orígenes de la palabra:

El término robótica fue introducido a nuestro vocabulario por el escritor checo Karel Capek (1890-1938) en su obra Rossums Universal Robots, en 1920. La palabra proviene del verbo eslavo Robotat cuyo significado es trabajar. No obstante, este término ha formado parte, durante decenios, del vocabulario de la ciencia-ficción [10].

Sin embargo la definición como tal de un robot tiene muchas variantes, de manera general se define como un sistema automático inteligente capaz de realizar una tarea que un humano ya sea por condiciones de seguridad o otros factores no quiere o no esta en la posibilidad de realizar. Respecto a la aplicaciones, la robótica se encuentra prácticamente en todo, desde la automatización industrial pasando por la exploración del espacio hasta la educación; valiéndonos de esto podemos subdividir a la robótica en tres grandes grupos:

#### **Robótica industrial**

Se refiere a toda la aplicación de la robótica en el ámbito industrial, se encuentra toda clase de tecnología encaminada a robot manipuladores (2.1a) y robots móviles denominados AGV (2.1b); los primeros son capaces de interactuar de forma precisa y repetitiva con un entorno de trabajo limitado, sus tareas más comunes son selección a altas velocidades, uso de herramientas, y manipulación automática de grandes cargas. Los AGV por

su parte al tener la habilidad de desplazamiento son encargados de tareas como embalaje y acomodación de carga.



(a) Robot manipulador KUKA de 6 ejes (cortesía de KUKA Robots IBÉRICA, S.A.)



(b) Robot móvil AGV (cortesía de C&H System)

Figura 2.1: ROBOTS INDUSTRIALES

### Robótica de investigación

Esta área se encarga de la innovación tecnológica como tal, sus aplicaciones inmediatas son muy específicas, tales como el ámbito militar (ver 2.2a) y aeroespacial, estos desarrollos requieren de un estricto diseño e implementación que están por encima de los estándares comunes, además de contar con sofisticadas técnicas de inteligencia artificial que los hacen en ciertos sentidos autónomos e inteligentes; este es el caso del robot Spirit (ver 2.2b), el cual estando en marte es capaz de hacer una caminata de reconocimiento marciana, recoger muestras y cargar sus baterías sin necesidad de ordenes provenientes de tierra.

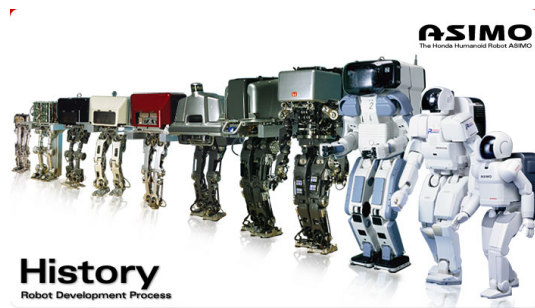


(a) Robot soldado (cortesía EEUU ARMY)



(b) Robot explorador Spirit (cortesía de la NASA)

Figura 2.2: ROBOTS DE INVESTIGACIÓN



(a) Robot ASIMO (cortesía de HONDA)



(b) Robot KEEPON (cortesía del National Institute of Information and Communications Technology NICT)



(c) Robot cocinero Motoman SDA10 (cortesía de la Yaskawa Electric)

Figura 2.3: ROBOTS HUMANOIDES

### Robótica social

Área relativamente nueva, es la que más llega al público en general, se caracteriza por hacer desarrollo en aplicaciones donde la interacción hombre-máquina es primaria; sus mayores adelantos son en la educación y marketing; también se encuentran trabajos donde se intenta imitar al ser humano, encontrando robots con apariencia y capacidades tales como caminar (2.3a), bailar al son de una tonada (2.3b) e incluso cocinar (2.3c); todos estos ejemplos cuentan con algún tipo de autonomía en sus acciones, algunos son capaces de imitar e incluso aprender del ser humano.

## 2.2. ROBÓTICA DE MANIPULADORES

Aquí es donde se centra específicamente el área de la robótica industrial y los robot manipuladores son los más estudiados e investigados; un robot manipulador concretamente se utiliza en tareas repetitivas de ensamblaje o manejo de herramientas que requieren cierto nivel de precisión, esta conformado por:

## **Estructura mecánica**

Generalmente la estructura de estos robots tiene semejanza con el brazo humano, son eslabones unidos a través de articulaciones, el movimiento de cada articulación puede ser de rotación, translación o una mezcla de ambos. Una descripción más estricta se encuentra como:

El sistema mecánico está compuesto por diversas articulaciones, normalmente se distinguen entre el brazo y el efector final que puede ser intercambiable. El aumento de número de articulaciones aporta mayor maniobrabilidad pero dificulta el problema de control, obteniéndose normalmente menores precisiones por acumulación de error [11].

## **Sistemas de accionamiento**

Están conformados por actuadores encargados de generar las fuerzas y pares necesarios para que exista el movimiento, existen de diferentes tipos y casi todos son de utilidad a la hora de ser implementados en un robot manipulador, según las prestaciones los que manejan mayores potencias son los de tipo hidráulico y neumático, pero actualmente son muy utilizados los de tipo eléctrico y servo-controlados; investigaciones recientes muestran diseño de actuadores centrados en conceptos biomecánicos como los músculos [14].

## **Sistema sensorial**

Existen dos tipos de sensores según su aplicación, los sensores internos encargados de adquirir las variables articulares del robot, y los sensores externos encargados de hacer seguimiento al área u objetos sobre los que trabaja el manipulador. Los sensores internos más comunes son encoders incrementales y absolutos, potenciómetros, captadores angulares de posición sincro-resolver, LVDTs, taco-generadores y finales de carrera. Entre los sensores externos más utilizados se encuentran sistemas de visión de máquina (cámaras digitales y analógicas); detectores de presencia inductivos, capacitivos y ópticos.

## **Sistemas de control**

Existen diversas formas para controlar un robot; una de las primeras técnicas que se empleó desde el surgimiento de los robots manipuladores ha sido la tele-operación, básicamente control de lazo abierto. Actualmente se utilizan controles denominados servomecanismos, dichos controladores tienen parámetros fijos a pesar de que las condiciones de trabajo cambian drásticamente; debido a esto este tipo de controlador no cumple las expectativas en muchas ocasiones.

Se encuentran entonces tipos de control más sofisticados tales como control por estructura variable o realimentación taco-métrica, estos tipos de control se basan en el modelo dinámico del manipulador para compensar problemas como la no-linealidad del sistema, acoplamiento de articulaciones, efectos de fricción y fuerzas externas; por medio de

estos se consiguen mejores prestaciones referentes a precisión y velocidad. Por último se han desarrollado técnicas de control inteligente que se adaptan a cambios inesperados en los parámetros físicos y electrónicos del manipulador, trabajos referentes a estas técnicas son [7, 8, 13].

### 2.2.1. CINEMÁTICA

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así la cinemática se interesa por la descripción analítica de movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares [11].

El estudio de la cinemática de un robot se divide en cinemática directa y cinemática inversa.

#### Cinemática Directa

El análisis cinemático directo estudia el problema de la siguiente forma: dadas las posiciones en variables de articulación, hallar la posición y orientación del elemento final. Así mismo, el análisis cinemático inverso, lo estudia como sigue: dada la posición y orientación del elemento final, hallar las posiciones de cada una de las articulaciones. En general, el problema cinemático directo es más sencillo de analizar que el problema cinemático inverso. Este último, frecuentemente conlleva a múltiples soluciones y depende de otros parámetros adicionales de la morfología del manipulador [10].

Prácticamente el problema se resuelve al encontrar la relación matemática que permite conocer la ubicación  $x, y, z$  y orientación  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  del efector final a partir de las variables articulares  $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$ , para esto se hace uso de matrices de transformación homogénea, en las cuales los sistemas de referencia viene dados por la representación Denavit-Hartenberg (D-H) [6], a través de esta representación se hallan los parámetros  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$ . Para cada eslabón la matriz de parámetros  $A_n$  (ver 2.1) tiene una forma representativa dependiente exclusivamente de las características geométricas del eslabón, y al hacer la pre-multiplicación de cada una de las matrices  $A_n$  se encuentra la matriz  $T$  (ver 2.2), esta matriz en su ultima columna define las variables  $x, y, z$  del efector final.

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$T = A_0^n = A_0^1 A_1^2 \dots A_{n-1}^n \quad (2.2)$$

## Cinemática Inversa

A diferencia del análisis cinemático directo, el inverso generalmente resulta más complejo y no posee un método único. La idea esencial del análisis cinemático inverso es hallar las variables de articulación que producen una posición y orientación del efector final. El problema con el análisis cinemático inverso que es para la mayoría de los casos se tienen múltiples soluciones, o incluso, situaciones donde no se tiene ninguna. La forma como se abordará el problema es utilizando métodos geométricos, los cuales son útiles para la mayoría de los manipuladores [10].

El método seleccionado para dar solución depende del número de grados de libertad del manipulador, si se trata de un robot de 3 o menos grados de libertad usar el método geométrico es lo más aconsejable, para casos de mayor complejidad entrar a manipular la relación matemática obtenida por medio del método de la cinemática directa es recomendable.

Nótese que se involucra la resolución de un sistema de ecuaciones no lineales. Así, en un robot manipulador con seis articulaciones rotacionales, la matriz  $T$  que define el modelo tiene 16 elementos, de los cuales cuatro son triviales (última fila de la matriz de transformación). Por consiguiente, se plantean doce ecuaciones no lineales para obtener los seis ángulos de las seis articulaciones. Las doce ecuaciones corresponden a tres de translación y nueve de rotación de las cuales sólo tres son independientes. Es decir, el problema puede reducirse a uno de seis incógnitas y seis ecuaciones independientes no lineales con senos y cosenos tales como las que se involucran en el modelo directo [11].

### 2.2.2. DINÁMICA

Estudia la manera en que el sistema se mueve, prácticamente es formular el modelo matemático del manipulador, se generan un sistema de ecuaciones no lineales donde la entrada son torques por cada articulación y la salida son aceleraciones también por cada articulación; la ecuación genérica se denota en 2.3, donde  $\tau = [\tau_1 \dots \tau_n]^T$  son los pares ejercidos por los actuadores en las  $n$  articulaciones,  $\theta = [\theta_1 \dots \theta_n]^T$  el vector de las variables articulares,  $M(\theta)$  es la matriz  $n \times n$  de masas del manipulador dependiente directamente de la posición instantánea de las articulaciones,  $G(\theta)$  son pares de fuerza debido a la gravedad,  $T_d$  fuerzas o pares externos perturbadores,  $H(\theta, \theta')$  pares de fuerza debido a las fuerzas centrífugas y de Coriolis,  $F(\theta')$  términos que definen la fricción viscosa y fricción de Coulomb.

$$\tau = M(\theta)\theta'' + G(\theta) + F(\theta') + H(\theta, \theta') + T_d \quad (2.3)$$

Los términos de fuerzas externas y de fricción son bastante complejos de estimar, los demás se pueden calcular a través de varios métodos, los dos más conocidos son Lagrange-Euler y Newton-Euler, el primer método es utilizado para robots de 3 o menos articulaciones debido a que utiliza un algoritmo de orden  $O(n^4)$ , es decir, sus operaciones a realizar crecen con la potencia cuarta del número de grados de libertad; en cambio el segundo método es computacionalmente más factible de orden  $O(n)$ , es decir aumenta su complejidad de manera lineal con cada articulación.

### 2.2.3. PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS

También llamado control cinemático, estudia la generación de referencias de posición adecuadas para que el manipulador se mueva de una manera suave y específica a través del espacio de trabajo; el análisis de la trayectoria se hace dependiendo del caso, ya sea en el espacio articular o en el espacio de trabajo se utilizan parámetros ingresados por el usuario como son velocidad máxima articular o tiempo mínimo de desplazamiento.

#### Planeación articular

En 2.4 se calcula la posición de cada articulación por separado, en la gráficas 2.4 podemos observar los perfiles cinemáticos resultantes para un robot SCARA de 2DOF, el objetivo primordial es que el aumento y reducción de la velocidad en cada articulación sea de una manera suave y constante; este tipo de planeación por cada articulación da como resultado un movimiento circular del manipulador a través del espacio de trabajo (ver 2.4d); cabe aclarar que para la generación de la trayectoria es necesario especificar el  $t_{min}$  o en su defecto la  $v_{max}$  deseada.

$$\theta_{trayectoria}(t) = \theta_{inicial} - \left[ \left( \frac{\theta_{final} - \theta_{inicial}}{2} \right) \left( 1 - \cos \left( \frac{t\Pi}{t_{min}} \right) \right) \right] \quad (2.4)$$

$$t_{min} = \left( \frac{\pi}{2} \right) \left( \frac{(\theta_{final} - \theta_{inicial})}{v_{max}} \right) \quad (2.5)$$

#### Planeación cartesiana

A diferencia de la planeación articular, en la planeación cartesiana los perfiles de posición calculados con 2.4 se aplican a las coordenadas de trabajo del manipulador, lográndose así desplazamientos específicos sobre el efector final, en la figura 2.5a se propone un desplazamiento en línea recta que no se puede ejecutar físicamente como analizaremos más adelante.

Este tipo de planeación es restringida, ya que hay zonas del espacio de trabajo que el manipulador no puede alcanzar, además de trayectorias que exigen cambios bruscos de velocidad que los actuadores no pueden ejecutar, como se puede observar en 2.6b y 2.6c



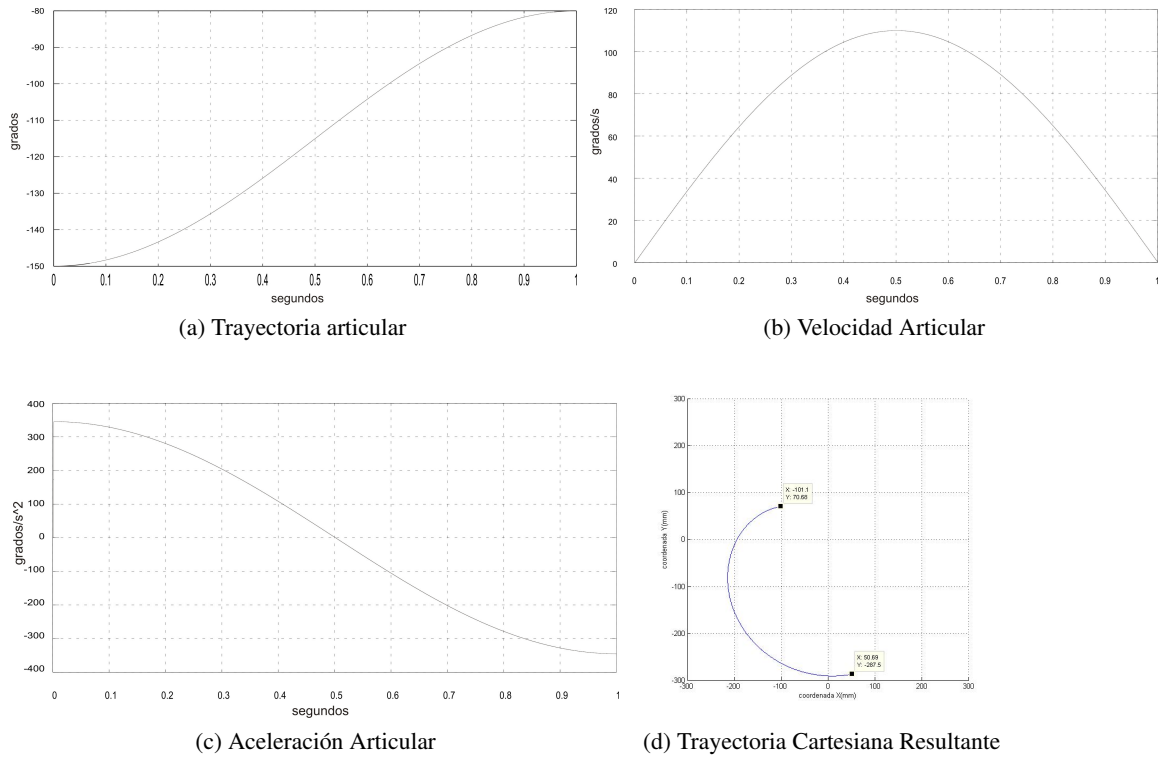


Figura 2.4: PLANEACIÓN ARTICULAR

las velocidades y aceleraciones son demasiado abruptas; como solución a estas limitaciones de carácter matemático se deben implementar restricciones de aceleración por software para asegurar la seguridad de los actuadores, aunque en algunos casos se recurre a hacer limitaciones en velocidad debido a la facilidad de determinar velocidades máximas permitidas a partir de las características de fabrica de los actuadores.

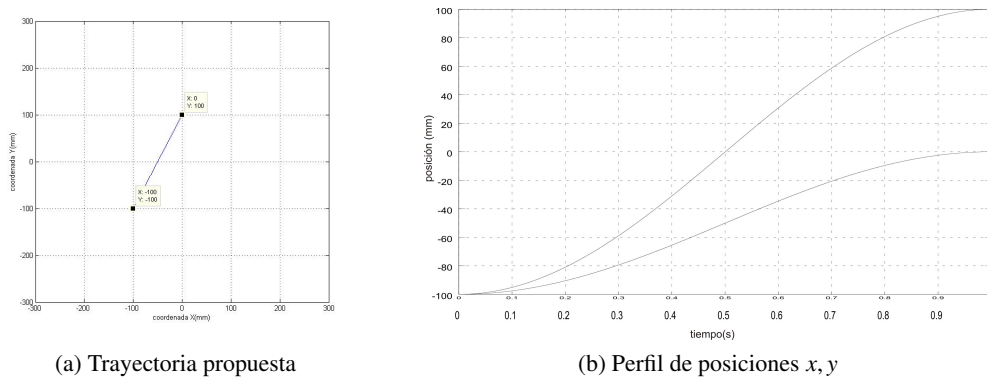


Figura 2.5: PLANEACIÓN CARTESIANA 1-1

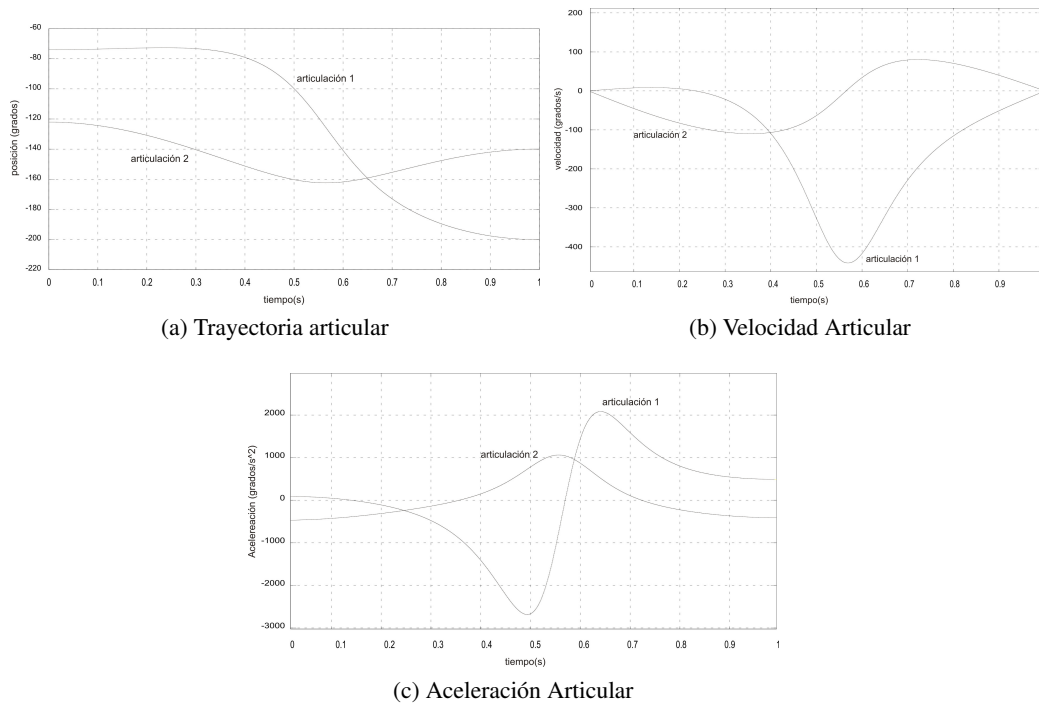


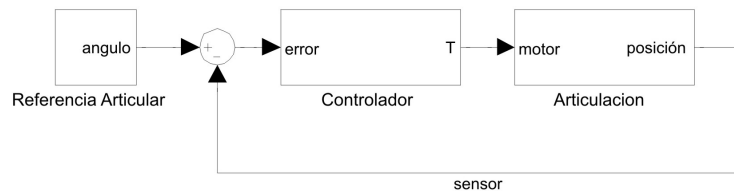
Figura 2.6: PLANEACIÓN CARTESIANA 1-2

## 2.2.4. CONTROL DE MANIPULADORES

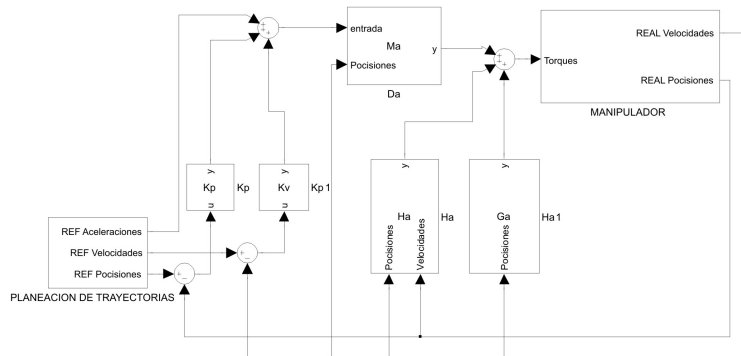
Ya cuando tenemos definidas las referencias articulares de movimiento, se necesitan técnicas de control adecuadas para que el manipulador las ejecute, generalmente cuando no se necesitan grandes velocidades de movimiento las técnicas que se usan son relativamente sencillas, pero cuando se demandan elevadas prestaciones de velocidad y precisión es necesario utilizar técnicas basadas en el modelo matemático del manipulador; incluso cuando las tareas a realizar se enfrentan a un entorno difícil de trabajo, se implementan técnicas basadas en control inteligente que permiten que el controlador se adapte a cambios inesperados en el entorno o en la composición propia del manipulador.

### Control Mono-articular

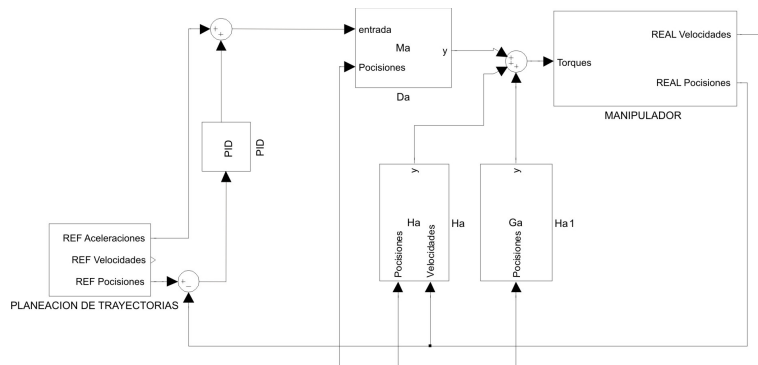
Si el manipulador trabaja a velocidades medias, y su estructura tiene rozamientos viscosos altos y reductores, se pueden despreciar varios términos del modelo dinámico 2.3 aplicando controles individuales por cada articulación; es posible utilizar el controlador PID (ver 2.7a) para cada articulación, obteniendo errores mínimos de posición en estado estable (demostrado en [2]).



(a) Control PID Mono-articular



(b) Control con retroalimentación taco-métrica y par calculado



(c) Control PID par calculado

Figura 2.7: TIPOS DE CONTROLADORES

### Control Multi-articular

Se basa en el desacople articular del manipulador a partir de su modelo matemático, se compensan las aceleraciones indeseadas y se tiene en cuenta las masas, fuerzas externas, gravedad y fricciones del sistema; la realimentación del error se hace con las variables de posición y velocidad. Este tipo de control se define como par calculado con realimentación taco-métrica (ver 2.7b). Además de las compensaciones mencionadas lo que realmente hace de este control bastante efectivo es el desacople articular debido a la matriz de masas  $M_a$ , este factor es utilizado por otro tipo de controles que apuestan hacia más robustez y adaptabilidad, un ejemplo es el PID par-calculado (ver 2.7c).

## Capítulo 3

# DESARROLLO DEL TRABAJO

Antes de comenzar con el desarrollo del trabajo es necesario introducir al lector en el siguiente concepto de diseño:

Un ingeniero en mecatrónica al afrontar tareas diseño observa la problemática de una manera global, pensando en una solución compuesta de partes; Una solución conformada de sistemas mecánicos, electrónicos e informáticos enlazados de una manera muy estrecha en el proceso de diseño.

### 3.1. DISEÑO CONCEPTUAL

Aplicando la premisa de diseño anterior, la vista general de la solución del problema planteado en el capítulo 1 se muestra en la figura 3.1, aquí se muestran las áreas específicas en las que la solución toma forma, todas están conectadas y cada una necesita de criterios de diseño vistos de manera específica y global.

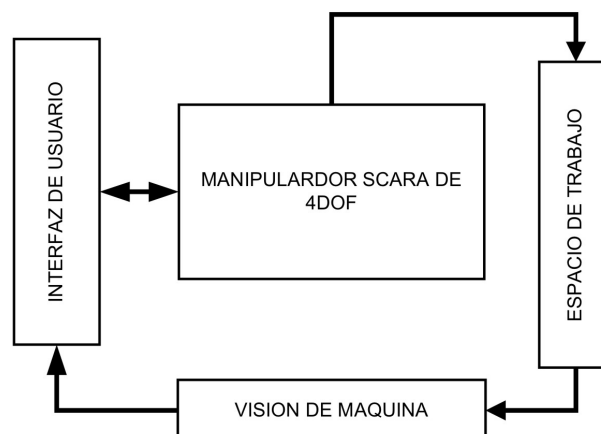


Figura 3.1: DISEÑO CONCEPTUAL GENERAL

Las partes que conforman la solución son: La interfaz de usuario, el manipulador SCARA de 4DOF, el módulo de visión de máquina y el espacio de trabajo. en algunos se aplican criterios de diseño bastante rigurosos, otros solo se acomodan a los requerimientos principales del proyecto.

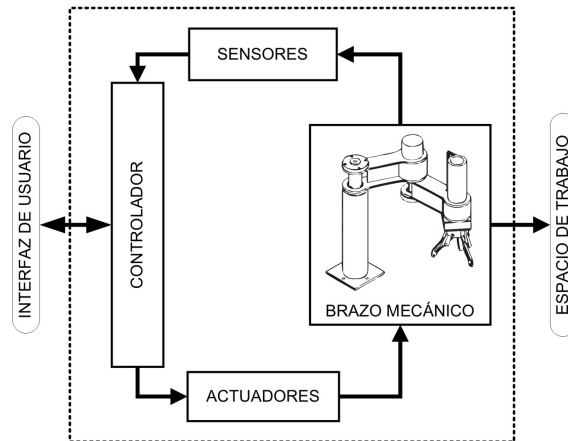


Figura 3.2: DISEÑO MANIPULADOR SCARA

En la figura 3.2 se observa el diseño conceptual del manipulador, este módulo es el corazón de la solución, y es precisamente donde convergen la mecánica, electrónica e informática, aplicándose criterios de diseño de cada una de las ramas, y criterios conjuntos.

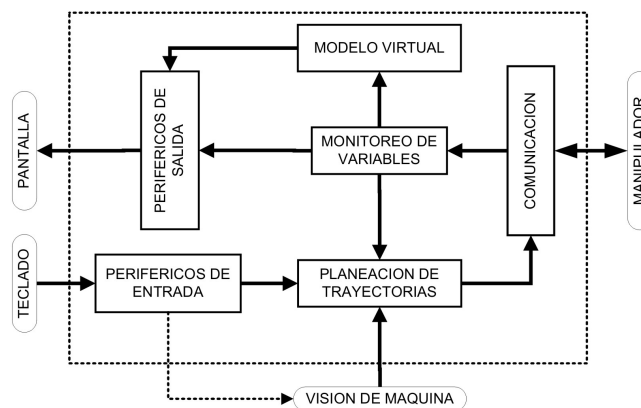


Figura 3.3: DISEÑO INTERFAZ DE USUARIO

En la figura 3.3 se observa como esta conformada la interfaz de usuario, en ella se pueden hacer configuraciones y ver los resultados del sistema, de una manera cuantitativa (gráficas en tiempo real), además de contar con el modelo virtual del manipulador, cabe resaltar que este modelo virtual sigue fielmente el comportamiento del modelo real.

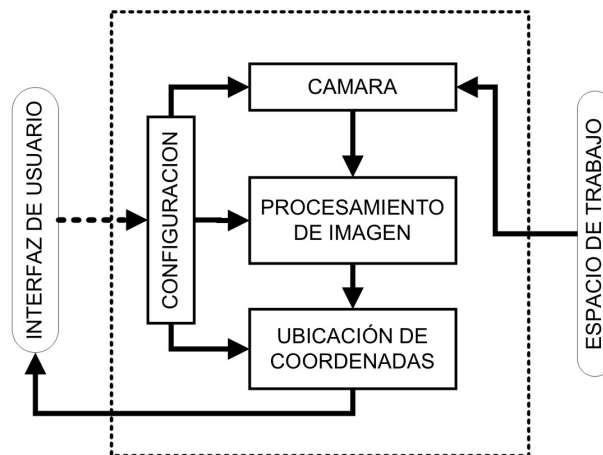


Figura 3.4: DISEÑO VISIÓN DE MÁQUINA

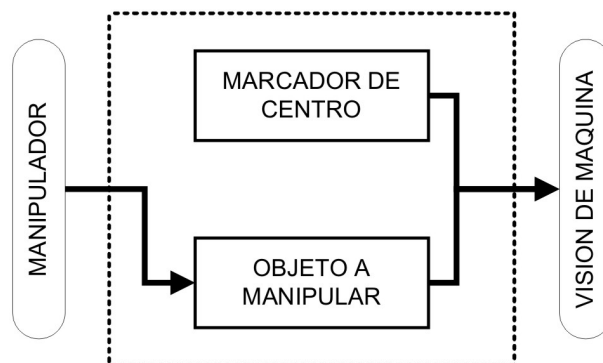


Figura 3.5: DISEÑO ESPACIO DE TRABAJO

Los módulos de las figuras 3.4 y 3.5 no necesitan mayores criterios de diseño, su implementación es casi aislada, dependen directamente de los requerimientos generales del sistema.

## 3.2. ESPACIO DE TRABAJO

Se define como el espacio alcanzable manipulable del robot, sus características dimensionales son arbitrarias acorde al proyecto, el contraste de colores utilizado está definido por las necesidades del módulo de visión de máquina, contiene como objetos adicionales un indicador de centro y el objeto propio a manipular (de color amarillo y rojo respectivamente en la figura 3.6b), especificaciones de estos se encuentran en la sección 3.4.

El módulo completo además del área de trabajo del manipulador, estipula un espacio para que el estudiante pueda acomodarse a realizar sus prácticas con un computador portátil (ver 3.6a), para especificaciones dimensionales completas ver anexo A.

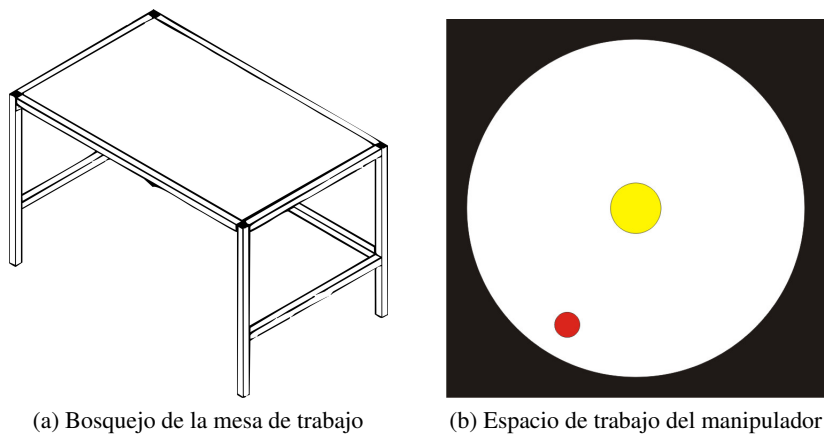


Figura 3.6: ESPACIO DE TRABAJO

### 3.3. MANIPULADOR SCARA DE 4DOF

El nombre SCARA viene del acrónimo en inglés Selective Compliant Assembly Robot Arm, su configuración cinemática viene dada por dos articulaciones en serie unidas a una articulación prismática, permitiéndole así ubicar el efector final en cualquier posición  $x, y, z$  y orientación  $\phi_z$  (ver figura 3.7a).

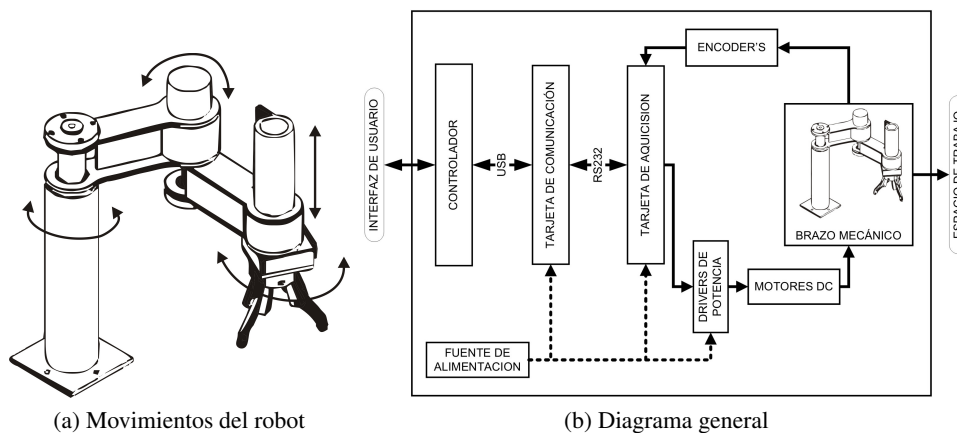


Figura 3.7: PRINCIPIOS DE DISEÑO

#### 3.3.1. SELECCIÓN DE MOTORES Y DISEÑO MECÁNICO

El sistema detallado del robot se muestra en la figura 3.7b, el diseño empieza con la selección de los actuadores, con base a las dimensiones de estos y del espacio de trabajo, se da dimensión al robot en general; con los actuadores definidos se da pie a la selección de sensores y controladores de potencia adecuados. Los motores deben soportar las iner-

cias de arranque del mecanismo, cargas dinámicas efectivas. Todos los cálculos deben ser realizados basándose en un factor de seguridad, por lo general se toma valores entre 1.5 y 2, esto es para asegurar que los dispositivos y dimensiones calculadas soporten fluctuaciones inesperadas de funcionamiento.

A partir de un bosquejo mecánico preliminar hecho a partir de dimensiones y materiales estimadas (ver figura 3.8), se calcula  $\tau_{min} = 0,3Nm$  para el par de arranque que mueve toda la estructura desde la primera articulación, se asume una aceleración angular mínima  $\alpha_{min} = 6rad/s$  (ver ecuaciones 3.1 y 3.2).

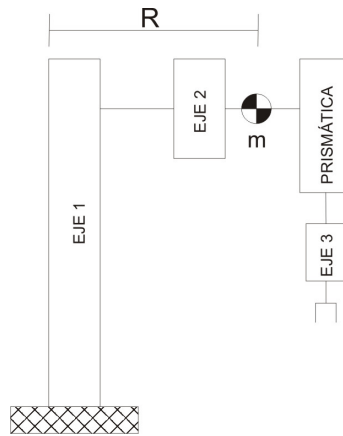


Figura 3.8: BOSQUEJO PRELIMINAR

$$I_z = mR^2 \quad (3.1)$$

$$\tau_{min} = I_z\alpha_{min} \quad (3.2)$$

Con este dato preliminar se seleccionan motores DC FAULHABER Serie 2342012CR (hoja de especificaciones ver anexo C), estos motores con su respectiva caja de reducción logran un par de arranque de 4.8Nm y par nominal de 0.8Nm; así se tiene un factor de seguridad respectivo al par de arranque de más de 2, esto para asegurar que los motores no se verán comprometidos de manera importante frente a cambios en la estructura mecánica.

Ya con los actuadores seleccionados se entra a diseñar la estructura mecánica como tal, los materiales se seleccionaron según la tabla 3.1, el diámetro del eje principal y secundario se define con conceptos de diseño mecánico de ejes [3], donde las fuerzas de entrada estimadas son de 19.6N y 9.8N respectivamente, los esquemas y diagramas de cuerpo libre para el eje principal se observan en la figura 3.9c, el diámetro del eje macizo  $D = 5,35mm$  es calculado por el criterio de Von Misses (máxima energía de distorsión ver ecuación 3.3) con los siguientes datos: factor de diseño  $\eta_d = 2$ , material CR1020 con una resistencia a la tensión de  $S_\mu = 380MPa$  y punto crítico de análisis A con un



PIEZA	MATERIAL
eje principal	Acero CR1020
eje secundario	Aluminio
prismática	Aluminio
eslabón 1	Acrílico Impacto medio-alto
eslabón 2	Acrílico Impacto medio-alto

Cuadro 3.1: MATERIALES

momento flector máximo  $M_A = 2,86Nm$  (ver figura 3.9e), el eje por razones de ensamble en vez de ser macizo es un tubo redondo con tres agujeros redondos transversales, por esta razón sus dimensiones aumentaron sobre el diámetro calculado originalmente, quedando con un diámetro externo de  $D = 75mm$  y diámetro interno de  $d = 5mm$ .

$$D = \sqrt[3]{\left[ \frac{16\eta d}{\pi S_\mu} \sqrt{(4M_A^2 + 3T^2)} \right]} \quad (3.3)$$

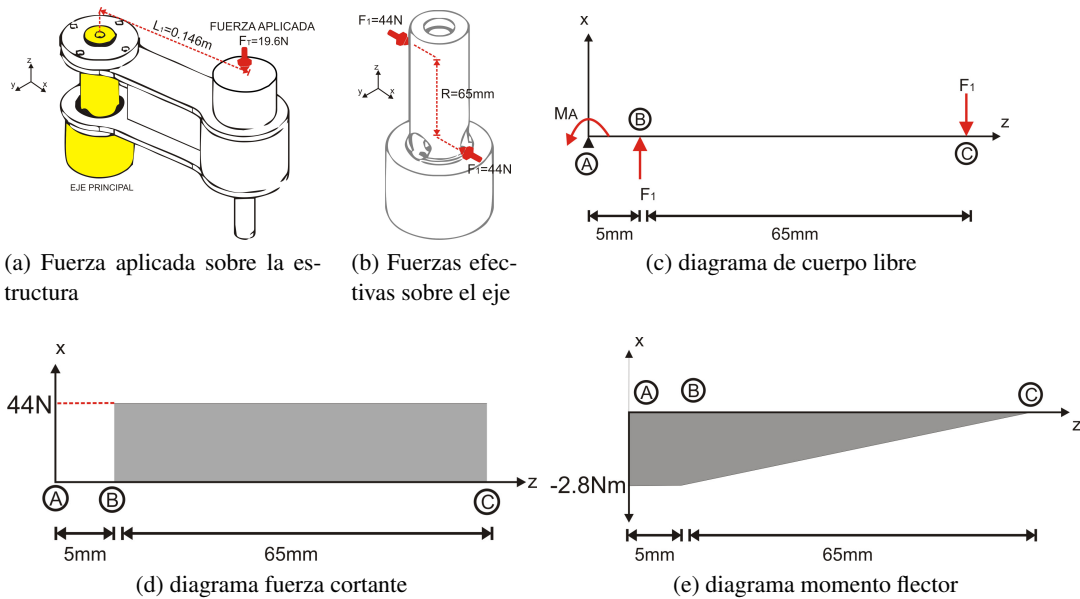


Figura 3.9: DISEÑO MECÁNICO

Además de los métodos clásicos de determinación de esfuerzos principales, se aplicaron técnicas más modernas como lo es el FEM, a través del paquete de software Ansys© se estimaron deformaciones máximas y esfuerzos principales del segundo eje (ver figura 3.10), la fuerza de entrada estimada fue de 9.8N a una distancia de 0.149m

generando un momento en el eje de 1.46Nm (ver figura 3.10a).

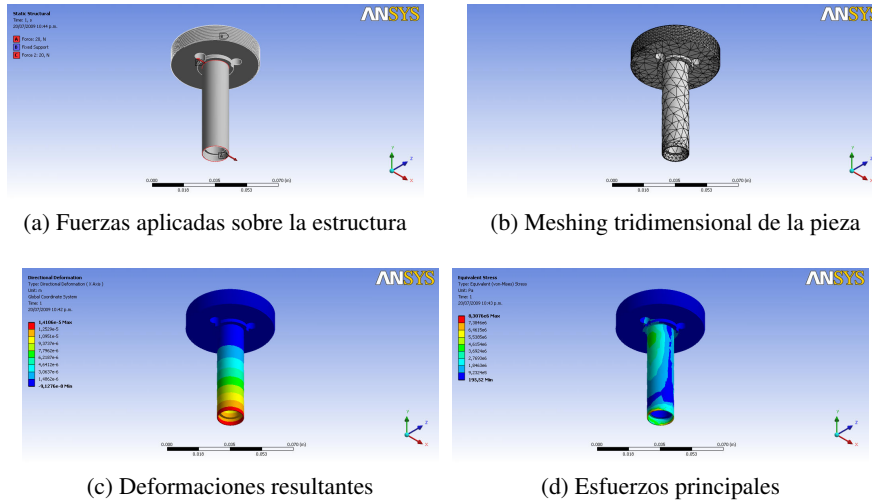


Figura 3.10: ANÁLISIS FEM

Como se puede observar en la figuras 3.10c y 3.10d, las deformaciones máximas son de 0.014mm, y el esfuerzo es de 8.30MPa en los puntos críticos; teniendo en cuenta estos datos y dado que el material de este eje es aluminio (el cual tiene un esfuerzo maximo de 173MPa) podemos concluir que las dimensiones del eje son confiables para las cargas estimadas.

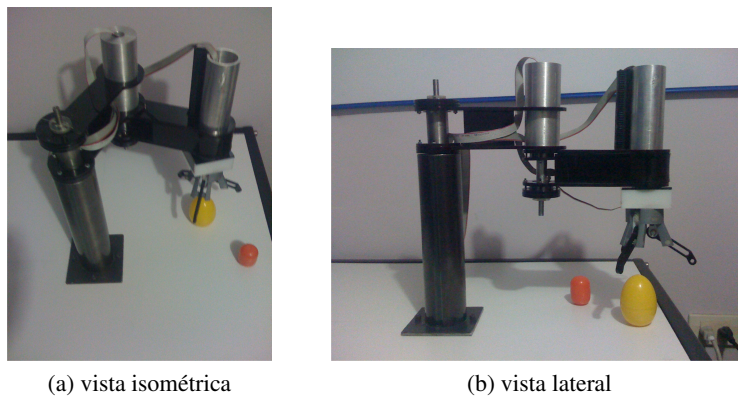


Figura 3.11: MANIPULADOR SCARA 4DOF

En la construcción de las piezas principales de aluminio y acero se utilizaron técnicas de mecanizado clásicas tales como torneado, fresado, taladrado. En la figura 3.11 se observa la estructura completamente terminada, para planos detallados ver anexo A; cabe resaltar que el efector final tiene partes elaboradas con técnicas modernas de corte láser computarizado y prototipado rápido (ver figura 3.12).



Figura 3.12: GRIPPER DE TRES DEDOS

### 3.3.2. SELECCIÓN DE SENSORES Y DISEÑO ELECTRÓNICO

Observando la figura general de diseño 3.7b, se observa que el sistema electrónico de adquisición de datos y generación de señales de potencia depende del sistema de sensores y controladores; por esto la selección de estos es preliminar en el diseño electrónico.

Las variables que se necesitan adquirir del manipulador son las posiciones angulares de cada articulación; por razones de precio, resolución y acople mecánico los sensores utilizados son encoders incrementales bidireccionales; cabe resaltar que este tipo de encoders además de proporcionar una salida serie respectiva a la posición del eje, dan a conocer el sentido de giro del motor gracias al desfase de dos señales A y B (ver figura 3.13).

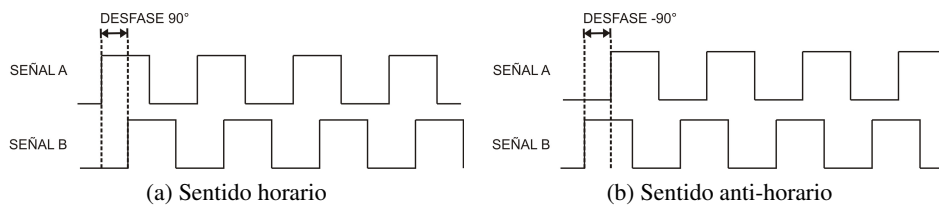


Figura 3.13: ENCODER INCREMENTAL BIDIRECCIONAL (PULSOS)

El único inconveniente de esta clase de encoders es que generan una señal relativa de la posición, es decir, no tienen un punto de referencia fijo sobre el cual medir, la solución a este problema es activar todo el sistema siempre desde una posición predeterminada; cada encoder tienen una resolución nominal de 12 pulsos/vuelta, pero debido a la caja reductora de 60:1 la resolución efectiva es de 720 pulsos/vuelta.

Los rangos de frecuencia a la cual se generan las tramas A y B son decisivos para la selección de la tarjeta de adquisición; estos rangos depende directamente de la velocidad a la que gire el motor acoplado al encoder; para los motores seleccionados las frecuencias de señal se observan en la tabla 3.2, encontrándose 8.55KHz y 102.67KHz como

frecuencias mínimas y máximas requeridas respectivamente.

VOLTAJE (voltios)	RPM (sin caja reductora)	Frecuencia (KHz)
1	713	8.55
2	1426	17.112
5	3565	42.78
10	7130	85.56
12	8556	102.67

Cuadro 3.2: VOLTAJE MOTOR vs FRECUENCIA ENCODER

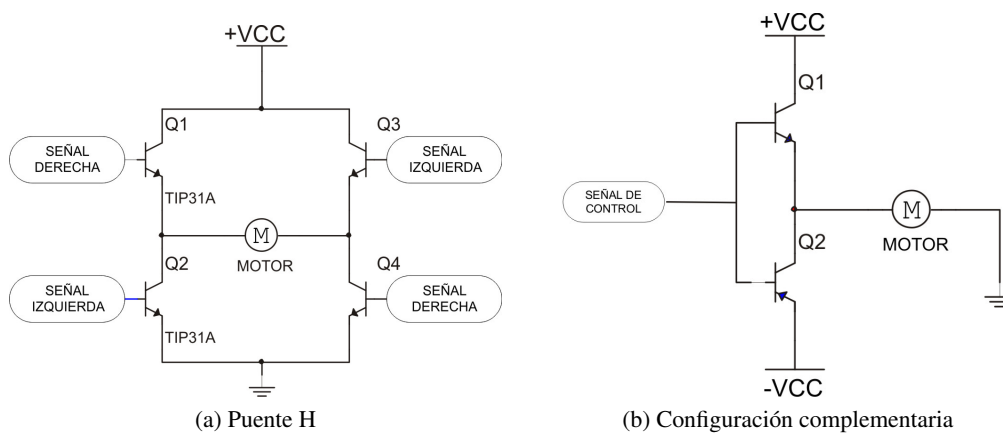


Figura 3.14: CONTROLADORES DE POTENCIA

Los controladores de potencia son los encargados de convertir las señales digitales de control en voltaje efectivo que mueve a los motores, se estimó en primer término utilizar configuraciones puente H (ver figura 3.14a), las cuales se consiguen en un solo empaquetado y necesitan una sola fuente de polarización; pero la opción fue desechada debido a que estos empaquetados no manejan frecuencias de señal de entrada de mas de 3Khz, y las señales de control se deben situar por el orden de 30Khz para evitar el ruido audible y vibraciones en los actuadores. Se opta por la configuración complementaria de transistores BJT (ver figura 3.14b), su ancho de banda es el adecuado, y solo necesita una señal de entrada, el único inconveniente es la necesidad de utilizar fuente dual como alimentación.

En términos de potencia eléctrica, se manejan 4 motores DC al mismo tiempo, cada uno con una corriente máxima de 1 amperio, es decir, la fuente de alimentación debe proveer 4 amperios para los motores, además de la corriente que consumen los dos circuitos digitales de adquisición y comunicación, que se estima de alrededor de 200mA para cada uno; a partir de estos requisitos de corriente se propone una fuente dual regu-

lada de voltaje con capacidad de 5A y voltajes máximos de 12 y -12 voltios(ver figura 3.15).

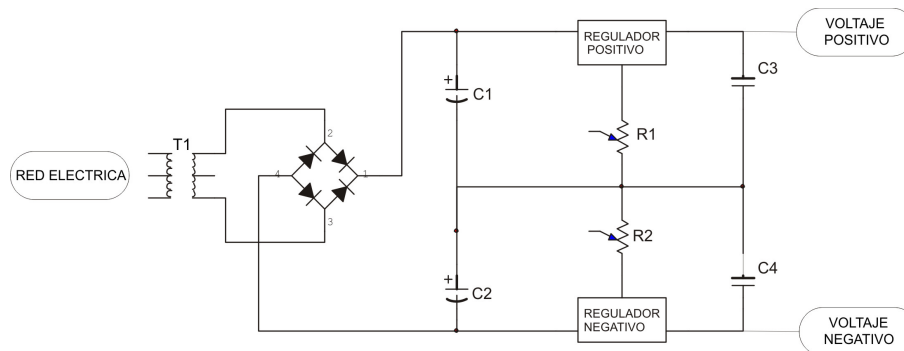


Figura 3.15: ESQUEMA GENERAL DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

### Tarjeta controladora

Ya definidos los actuadores y sensores, se procede a seleccionar el sistema de adquisición de datos, este sistema debe tener las siguientes características:

- Generación de por lo menos 4 señales análogas o PWM's (con frecuencias del orden de 30KHz) para controlar motores DC.
- Cuatro módulos de encoder incremental o interrupción externa para leer la posición de los actuadores.
- Comunicación serial RS232 para comunicarse con la tarjeta USB.
- Velocidades de procesamiento preferiblemente del orden de los 16Mhz o más, necesarias para ejecutar operaciones de codificación-decodificación en un lapso menor a los periodos generados por las señales de encoder (ver tabla 3.2).

Con estos requisitos presentes se seleccionó el procesador digital de señales DSPIC30F4011 de *microchip*<sup>®</sup>, micro-controlador especializado en adquisición de señales de alta frecuencia, generación de señales PWM para control de motores, y varios módulos de interrupción embebidos (ver hoja de especificaciones técnicas en el anexo C).

Cabe resaltar que el funcionamiento del DSPIC se fundamenta tanto en interrupciones externas e internas (ver figura 3.18), esto quiere decir, que sólo ejecuta instrucciones cuando ocurren determinados sucesos:

- cuando los actuadores se mueven, el procesador lee los encoders y envía su posición por RS232.
- cuando llega información a través del puerto RS232, el procesador lee el puerto.

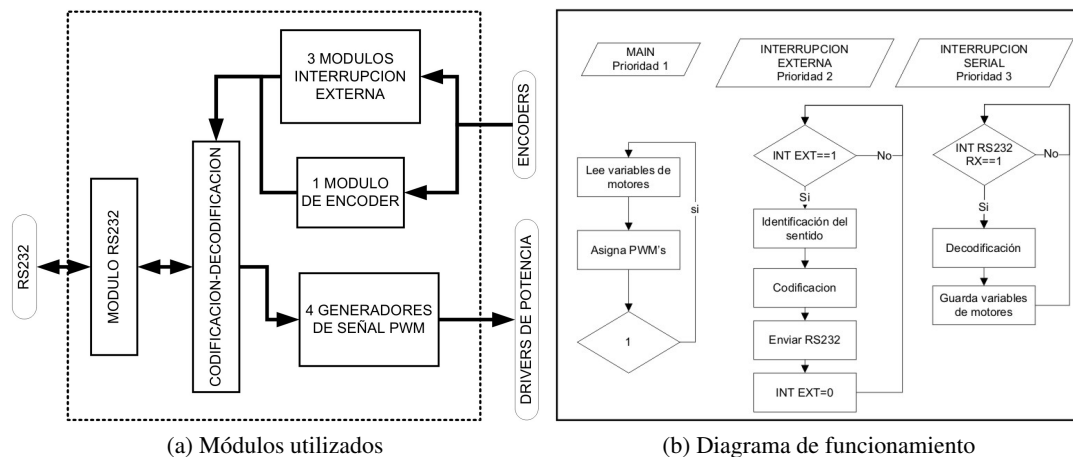


Figura 3.16: DSPIC30F4011

### Rutina de comunicación serial

Para definir la resolución de cada dato a transmitir se parte del criterio de que cada encoder para un giro desde  $-360^\circ$  a  $360^\circ$  entrega un número de pulsos desde  $-720$  a  $720$  (para un total de 1440 pulsos); esto nos indica que la resolución mínima debe ser de 11 bits, por razones de simetría en la codificación se toma una resolución de 12 bits.

Por la anterior y puesto que el número de datos a comunicar es 4 la comunicación serial por si sola es incapaz de enviar estos datos de una manera correcta, por esto es necesario implementar una rutina codificación-decodificación que envíe y reciba de una manera ordenada 4 datos de 12 bits a través de un canal de 8 bits (ver patrón de codificación en la tabla 3.3).

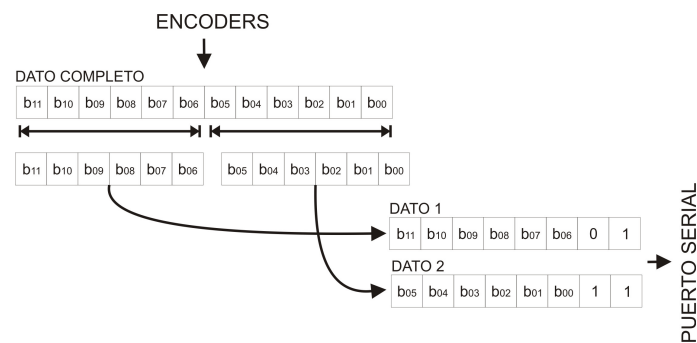


Figura 3.17: CODIFICACIÓN

La rutina de codificación se encarga de tomar un dato de 12 bits y partirlo en dos datos de 6 bits, a cada sub-dato se le agregan en la parte menos significativa dos bits para su identificación, por último se envían (ver figura 3.17).

La rutina de decodificación hace lo contrario, tomando los 2 bits menos significativos

de cada trama, identifica y une de manera ordenada los dos sub-datos de 8 bits formando el dato original de 12 bits.

DATOS	CODIFICACIÓN											
DATO 1 (12 bits)	$B_{11}$	$B_{10}$	$B_{09}$	$B_{08}$	$B_{07}$	$B_{06}$	$B_{05}$	$B_{04}$	$B_{03}$	$B_{02}$	$B_{01}$	$B_{00}$
dato 1-1 (8bits)	$B_{11}$	$B_{10}$	$B_{09}$	$B_{08}$	$B_{07}$	$B_{06}$	0	0				
dato 1-2 (8 bits)	$B_{05}$	$B_{04}$	$B_{03}$	$B_{02}$	$B_{01}$	$B_{00}$	1	0				
DATO 2	$B_{11}$	$B_{10}$	$B_{09}$	$B_{08}$	$B_{07}$	$B_{06}$	$B_{05}$	$B_{04}$	$B_{03}$	$B_{02}$	$B_{01}$	$B_{00}$
dato 2-1	$B_{11}$	$B_{10}$	$B_{09}$	$B_{08}$	$B_{07}$	$B_{06}$	0	0				
dato 2-2	$B_{05}$	$B_{04}$	$B_{03}$	$B_{02}$	$B_{01}$	$B_{00}$	1	1				
DATO 3	$B_{11}$	$B_{10}$	$B_{09}$	$B_{08}$	$B_{07}$	$B_{06}$	$B_{05}$	$B_{04}$	$B_{03}$	$B_{02}$	$B_{01}$	$B_{00}$
dato 3-1	$B_{11}$	$B_{10}$	$B_{09}$	$B_{08}$	$B_{07}$	$B_{06}$	0	1				
dato 3-2	$B_{05}$	$B_{04}$	$B_{03}$	$B_{02}$	$B_{01}$	$B_{00}$	1	0				
DATO 4	$B_{11}$	$B_{10}$	$B_{09}$	$B_{08}$	$B_{07}$	$B_{06}$	$B_{05}$	$B_{04}$	$B_{03}$	$B_{02}$	$B_{01}$	$B_{00}$
dato 4-1	$B_{11}$	$B_{10}$	$B_{09}$	$B_{08}$	$B_{07}$	$B_{06}$	0	1				
dato 4-2	$B_{05}$	$B_{04}$	$B_{03}$	$B_{02}$	$B_{01}$	$B_{00}$	1	1				

Cuadro 3.3: TABLA DE CODIFICACIÓN

### Tarjeta de Comunicación USB

Esta tarjeta se encarga de la comunicación del robot con el computador, debido a que en la mayoría de computadores portátiles y de escritorio el puerto serial ya no se encuentra se optó por comunicación USB; este tipo de bus da la ventaja de enviar gran cantidad de datos con resolución del orden de 16 bits además de permitir varias configuraciones de comunicación según la necesidad [1], la más adecuada para la aplicación es la denominada *bulk transfer*, especializada en la transmisión de grandes cantidades de información. El microcontrolador encargado de esta tarea es el PIC18F4550 de *microchip*® (hoja de especificaciones técnicas ver anexo C).

Para detalles esquemáticos y plantillas de las tarjetas electrónicas ver anexo B.

### 3.3.3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y MÉTODOS DE CONTROL

Ya con el sistema físico y electrónico completo, la siguiente tarea a implementar es el controlador del robot, el ideal de este sistema como se ve en los capítulos 2.2.1, 2.2.2 y 2.2.3 es poder mover el efector final del robot a través de una trayectoria determinada en un tiempo específico. Aquí la simulación es primordial ya que nos permite probar y comparar las técnicas de control propuestas antes de aplicarlas directamente sobre el robot construido.

## MODELO MATEMÁTICO

Para hacer la simulación de los controladores es necesario tener el modelo matemático del manipulador, como se describe en el capítulo 2.2.2 existen varios métodos; se aplicaron los dos métodos más conocidos Lagrange-Euler y Newton-Euler. Independientemente del método, ambos necesitan de los parámetros físicos y D-H del manipulador. Con el paquete de software *SolidWorks*® y a partir de los sistemas de referencia definidos (ver figura 3.18a), materiales (ver tabla 3.1), y geometría (ver anexo A) se determinan los datos físicos del robot (ver figura 3.19 y tabla 3.5).

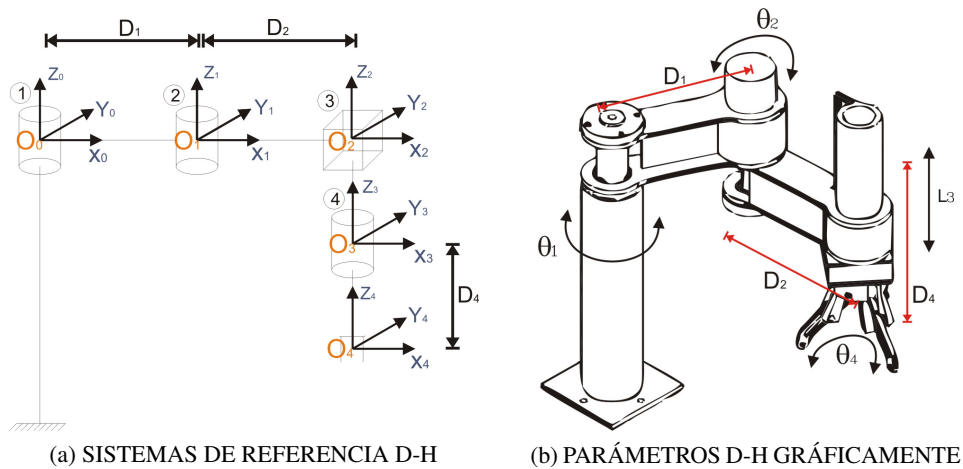


Figura 3.18: PARÁMETROS D-H

Eslabon n	$\alpha_i$	$\theta_i$	$a_i$	$d_i$
1	0	$\theta_1(0)$	$D_1 = 146mm$	0
2	0	$\theta_2(0)$	$D_2 = 145,9mm$	0
3	0	0	0	$L_3(-100mm)$
4	0	$\theta_4(0)$	0	$D_4 = 100mm$

Cuadro 3.4: PARÁMETROS D-H

Eslabon	Masa(Kg)	$\bar{X}(mm)$	$\bar{Y}(mm)$	$\bar{Z}(mm)$	$I_{zz}(Kg * mm^2)$
1	1.255	-6.417	-0.008	-19.023	1166.024
2	0.539	-19.459	1.088	11.475	1228.643

Cuadro 3.5: PARAMETROS FISICOS DEL MANIPULADOR



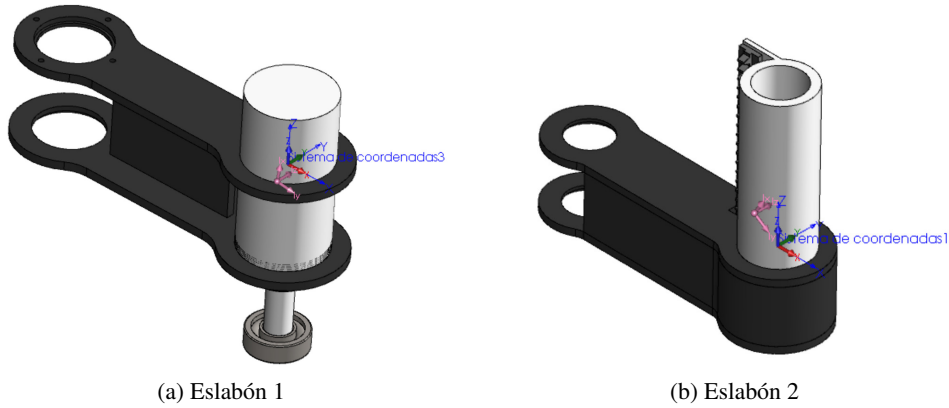


Figura 3.19: CENTROS DE MASA

El método de Lagrange-Euler es un método computacionalmente no recomendado [2], pero es factible cuando se analizan sólo las dos primeras articulaciones del robot, en este documento se simplificó el modelo analizando la estructura de la siguiente manera:

Se modelan solo las dos primeras articulaciones.

La inercia y peso para la segunda articulación se calcula teniendo en cuenta los pesos y geometrías de las articulaciones prismática  $L_3$  y rotacional  $\theta_4$ , es decir, como si las dos últimas articulaciones no existieran y los eslabones 2, 3 y 4 fueran un solo eslabón que se mueve respecto a la articulación rotacional  $\theta_2$ .

Siguiendo los pasos determinados en [2], los términos característicos  $M_{(\theta)}$ ,  $H_{(\theta, \theta')}$ ,  $G_{(\theta)}$  se muestran en las ecuaciones 3.15, 3.16 y 3.17 respectivamente.

El método fue programado según los siguientes pasos:

1. Definición de los sistemas de referencia según las normas de D-H.
2. Obtención de las matrices de transformación  $A_0^2$  y  $A_0^1$  (ver ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.7).

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & D_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & D_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_0^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & D_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & D_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A_0^2 = A_1^0 * A_1^2 \quad (3.6)$$

$$A_0^2 = \begin{bmatrix} (C\theta_1 C\theta_2) - (S\theta_1 S\theta_2) & (-C\theta_1 C\theta_2) - (S\theta_1 S\theta_2) & 0 & 145,9C\theta_1 C\theta_2 - 145,9S\theta_1 S\theta_2 + 146C\theta_1 & \\ S\theta_1 C\theta_2 + C\theta_1 S\theta_2 & C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2 & 0 & 145,9S\theta_1 C\theta_2 - 145,9C\theta_1 S\theta_2 + 146S\theta_1 & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3. Obtener las matrices  $U_{ij}$  definidas por:

$$U_{ij} = \frac{\delta^0 A_i}{q_j} \quad (3.8)$$

4. Obtener las matrices  $U_{ijk}$  definidas por:

$$U_{ijk} = \frac{\delta U_{ij}}{\delta q_k} \quad (3.9)$$

5. Obtener la matriz de pseudoinercias  $J_i$  para cada elemento, que vienen definidas por:

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-I_{xxi} + I_{yyi} + I_{zz}) & I_{xyi} & I_{xzi} & m_i \bar{X}_i \\ I_{xyi} & \frac{1}{2}(I_{xxi} - I_{yyi} + I_{zz}) & I_{yzi} & m_i \bar{Y}_i \\ I_{xzi} & I_{yzi} & \frac{1}{2}(I_{xxi} + I_{yyi} - I_{zz}) & m_i \bar{Z}_i \\ m_i \bar{X}_i & m_i \bar{Y}_i & m_i \bar{Z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

6. Obtener la matriz de inercias  $D = [d_{ij}]$  cuyos elementos vienen definidos por:

$$d_{ij} = \sum_{k=(\max i,j)}^n \text{Traza}(U_{kj} J_k U_{ki}^T) \quad (3.11)$$

Con  $i, j = 1, 2, \dots, n$

$n$  : número de grados de libertad

7. Obtener los términos  $h_{ikm}$  definidos por:

$$h_{ikm} = \sum_{j=(\max i,k,m)}^n \text{Traza}(U_{jkm} J_j U_{ji}^T) \quad (3.12)$$

Con  $i, k, m = 1, 2, \dots, n$

8. Obtener la matriz de columna de fuerzas de Coriolis y centrípeta  $H = [h_i^T]$  cuyos elementos vienen definidos por:

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{\theta}_k \dot{\theta}_m \quad (3.13)$$

9. La ecuación dinámica del sistema será:

$$\tau = D\theta'' + H + C \quad (3.14)$$

donde  $\tau$  es el vector de fuerzas y pares motores efectivos aplicados sobre la coordenada  $\theta_i$ .

$$M = \begin{bmatrix} 46,7e6 - 171e3 \sin(\theta_2) + 19,9e6 \cos(\theta_2) & 965e4 - 85763 \sin(\theta_2) + 996e4 \cos(\theta_2) \\ 965e4 - 85763 \sin(\theta_2) + 996e4 \cos(\theta_2) & 965e4 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$H = \begin{bmatrix} -(33,1e - 13)\theta_2'(\cos(\theta_1)^2 + \sin(\theta_1)^2) * (\theta_2' + 2\theta_1') * (300e16 \sin(\theta_2) + 258e13 \cos(\theta_2)) \\ (331e - 14)(\theta_1')^2(\cos(\theta_1)^2 + \sin(\theta_1)^2) * (300e16 \sin(\theta_2) + 258e14 \cos(\theta_2)) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Analizando el parámetro de masas  $M_{(\theta)}$  (descrito en la sección 2.2.2) se observa que sólo depende del ángulo  $\theta_2$ , además siendo una matriz 2x2 nos muestra que las dos articulaciones están acopladas inercialmente. El término  $H_{(\theta,\theta')}$  correspondiente a aceleraciones relativas como era de esperarse depende de  $\theta_i$  y  $\theta_i'$ , cabe analizar que el término  $G_{(\theta)}$  debe ser cero ya que el manipulador no ejecuta movimientos a través al eje z en sus dos primeras articulaciones.

$$\theta'' = M_{(\theta)}^{-1} * (\tau - H_{(\theta,\theta')} - G_{(\theta)}) \quad (3.18)$$

Un segundo modelo matemático se obtiene por el método de Newton-Euler haciendo uso del paquete de funciones *emero*<sup>©</sup> para *Matlab*<sup>©</sup> (ver detalle de funciones en anexo D), aquí se obtiene el modelo completo del manipulador en sus 4 articulaciones (ver parámetros del modelo en anexo E).

Se procede a comparar los dos modelos formulados, para verificar que son similares. Cada modelo se implementa según la ecuación 3.18 en *Simulink*<sup>©</sup> de *Matlab*<sup>©</sup> utilizando la herramienta Embedded Function (ver figura 3.20), aquí las entradas a los sistemas son torques (*mNmm*), y las salidas son aceleraciones angulares ( $^{\circ}/s^2$ ) que se integran numéricamente para obtener las velocidades y posiciones instantáneas del robot.

Las pruebas consisten en aplicar torques de entrada  $\tau_1$  y  $\tau_2$  iguales en ambos modelos (ver figura 3.22a), para luego medir los respectivos ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  resultantes (ver

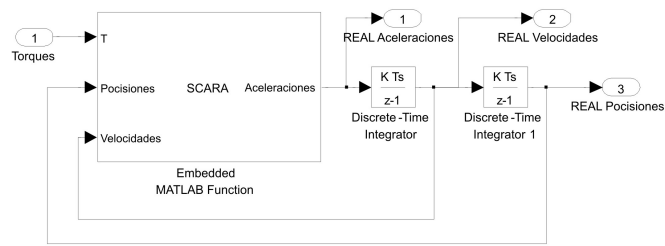


Figura 3.20: BLOQUE DEL MODELO SCARA

figura 3.21), cabe resaltar que sólo se analizaron los ángulos de la primera y segunda articulación (ver figura 3.22).

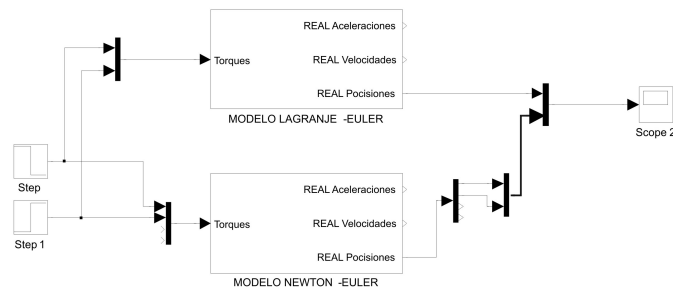


Figura 3.21: DIAGRAMA DE COMPARACIÓN

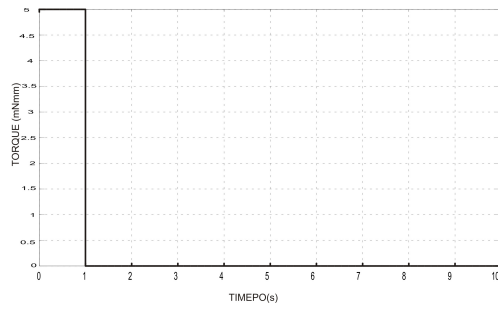
Prueba	$\tau_1$ (mNmm)	$\tau_2$	$\theta_1$ (°)	$\theta_2$
1	3	0	46°	-85°
2	0	3	230°	-47°
3	5	-5	160°	-540°

Cuadro 3.6: PRUEBAS DEL MODELO OBTENIDO POR LAGRANGE-EULER

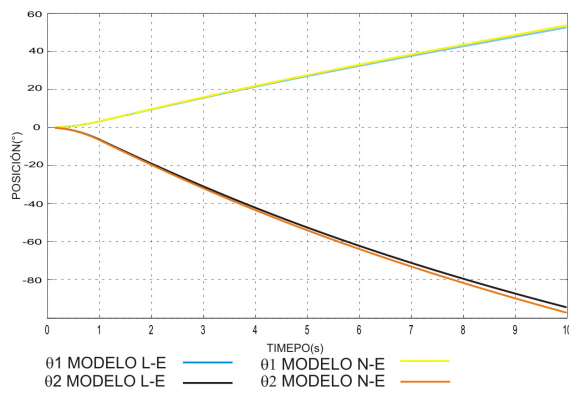
Prueba	$\tau_1$ (mNmm)	$\tau_2$	$\theta_1$ (°)	$\theta_2$
1	3	0	47.2°	-87.5°
2	0	3	230.5°	47.1°
3	5	-5	160.4°	-544°

Cuadro 3.7: PRUEBAS DEL MODELO OBTENIDO POR NEWTON-EULER

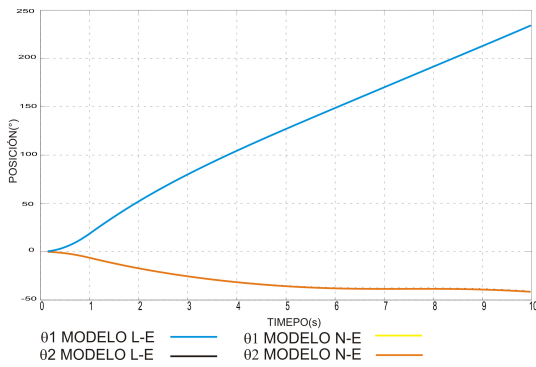
Analizando la similitud de los resultados entre los modelos (ver tablas 3.6 y 3.7 columnas 4 y 5) podemos afirmar que los dos métodos obtuvieron modelos matemáticos casi iguales en su comportamiento.



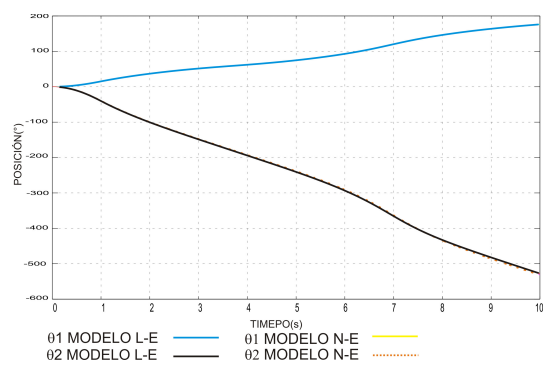
(a) Forma de los torques de entrada



(b) Prueba 1



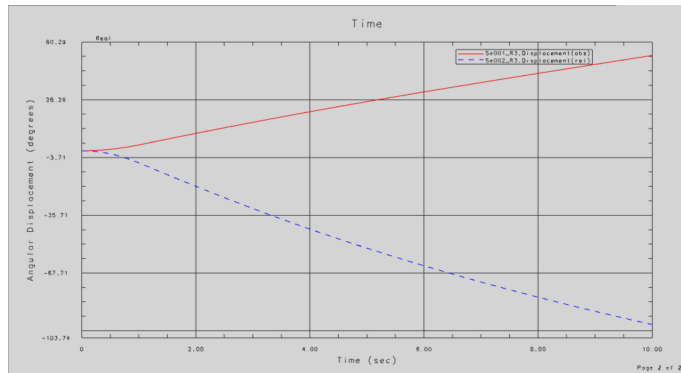
(c) Prueba 2



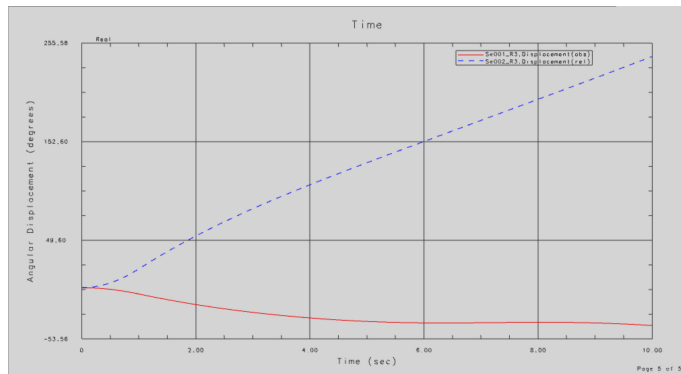
(d) Prueba 3

Figura 3.22: PRUEBAS DE COMPARACIÓN

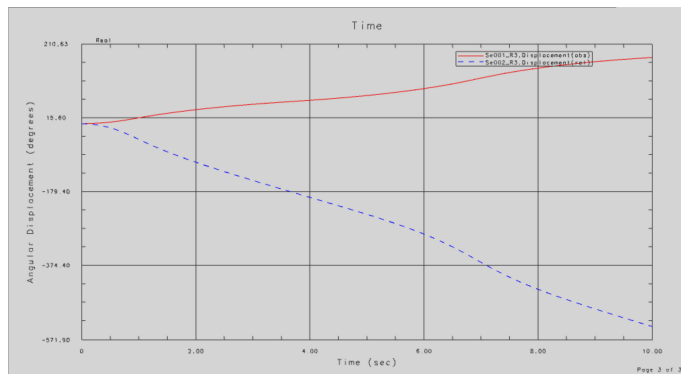
A través de una versión beta del paquete de software *CAD NX Siemens*<sup>®</sup>, se implementó la simulación física del manipulador; a la cual se le aplicaron los mismos torques de entrada  $\tau_1$  y  $\tau_2$  de las pruebas anteriores, observando la concordancia de los resultados (ver figura 3.23) y partiendo de la fiabilidad del software podemos concluir que los modelos son correctos y apropiados para comparar varios métodos de control.



(a) prueba 1



(b) Prueba 2



(c) Prueba 3

Figura 3.23: SIMULACION NX SIEMENS

Se recomienda para trabajos futuros obtener la versión completa del software *NX Siemens*<sup>®</sup>, la cual permite profundizar en el modelamiento de fricciones y fuerzas externas, las cuales no se tienen en cuenta por los métodos aplicados en este trabajo.

## PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS

Antes de comenzar propiamente con la simulación de los controladores, es necesario programar un bloque de planeación de trayectorias (ver figura 3.24a) en el espacio de la articulaciones, para esto se utilizo el bloque de "function block parameters" de Simulink® de MATLAB®, en el bloque se ingresa la función 2.4 denotada en la sección 2.2.3 (ver figura 3.24b).

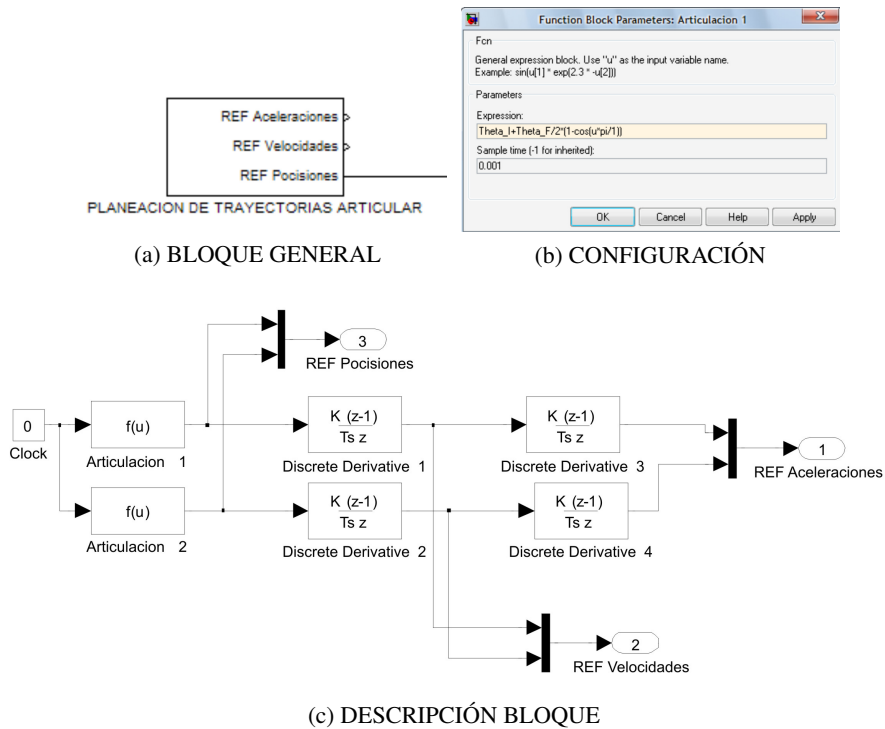


Figura 3.24: CONFIGURACIÓN DE PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS MATLAB

Como se puede observar en la figura 3.24c se toman las posiciones generadas a partir de los parámetros del usuario, y se derivan numéricamente dos veces para generar las velocidades y aceleraciones necesarias para la implementación de los controladores propuestos mas adelante.

$$\theta_{trayectoria}(t) = \theta_{inicial} - \left[ \left( \frac{\theta_{final} - \theta_{inicial}}{2} \right) \left( 1 - \cos \left( \frac{T\Pi}{t_{min}} \right) \right) \right] \quad (3.19)$$

$$t_{min} = \left( \frac{\pi}{2} \right) \left( \frac{(\theta_{final} - \theta_{inicial})}{v_{max}} \right) \quad (3.20)$$

Ya en el programa de interfaz de usuario la ecuación de la sección 2.2.3 se programa en tiempo discreto (ver ecuación 2.4), teniendo los siguientes parámetros de entrada:

1. Variables propias del sistema:  $\theta_{inicial}$  de cada articulación.
2. Numero de muestras predeterminada  $n$  para definir la trayectoria
3. Requerimientos del usuario: velocidad máxima requerida  $V_{max}$  o tiempo mínimo necesario  $t_{min}$ .

Primero se crea un vector de tiempo  $T$ , el cual se genera al muestrear el lapso de tiempo desde 0 hasta  $t_{min}$  teniendo como frecuencia de muestreo  $n/t_{min}$ .

A partir de lo anterior se calculo un vector de posiciones encargado de contener la trayectoria calculada, el tamaño de dicho vector es  $n$ , y se calcula reemplazando el vector  $T$  en la ecuación 2.4.

### CONTROL MONO-ARTICULAR

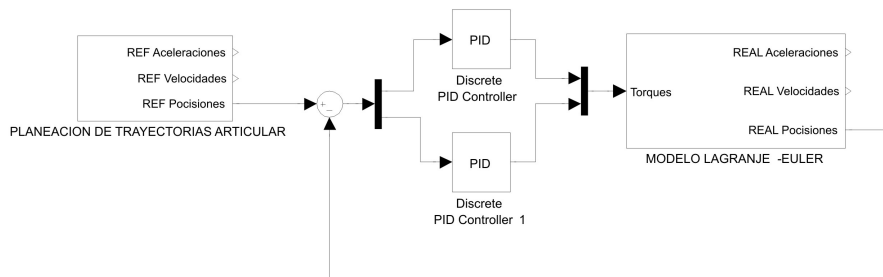


Figura 3.25: CONTROL PID

La primera técnica de control a implementar en simulación sobre el modelo dinámico es un PID mono-articular (ver figura 3.25), sus características se pueden encontrar en el capítulo 2.2.4, las ganancias del controlador para cada articulación se obtuvieron por el método de tanteo y ajuste aplicando el algoritmo de la figura 3.26 (las ganancias obtenidas se observan en la tabla 3.8); las pruebas sobre el controlador se describen en la tabla 3.9.

	PID Art 1	PID Art 2
$K_p$	100	80
$K_i$	0.001	0.001
$K_d$	2.5	2.5

Cuadro 3.8: GANANCIAS PID - SIMULADO



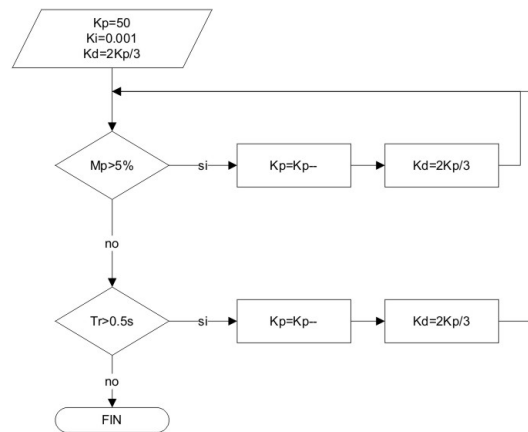


Figura 3.26: ALGORITMO GANANCIAS PID

Prueba	$\theta_1$ inicial	$\theta_2$ inicial	$\theta_1$ final	$\theta_2$ final	tiempo (s)
1	0°	0°	-100°	-120°	10
2	0°	0°	-100°	-120°	1

Cuadro 3.9: PRUEBAS CONTROLADOR PID

Los resultados muestran que al disminuir el tiempo de la trayectoria, el robot no sigue las referencias de una manera adecuada (ver figura 3.28); este comportamiento es consecuencia de las altas velocidades angulares que se presentan en el robot, las cuales generan no-linealidad en el sistema debido a inercias acopladas y aceleraciones indeseadas.

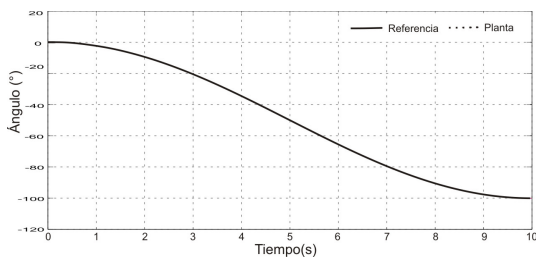
## CONTROL TACOMETRICO

Se procede con la simulación del control por par calculado con realimentación tacométrica (ver figura 3.29), las matrices de ganancia  $K_p$  y  $K_v$  se obtuvieron para obtener un amortiguamiento crítico como respuesta (ver 3.21 y 3.22) por medio del mismo procedimiento mostrado en la gráfica 3.26, las trayectorias de prueba son las mismas que se plantean para el control PID (ver tabla 3.9).

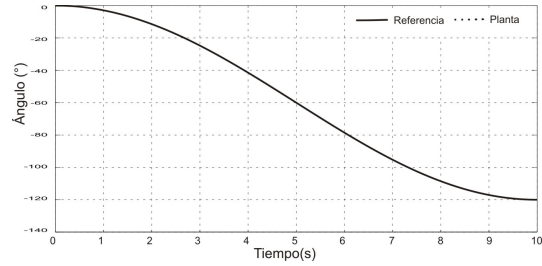
$$K_p = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

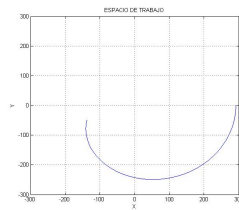
A diferencia del controlador PID, se aprecia que este controlador se acopla a la no-linealidad del robot; analizando el sistema sabemos que al aumentar la velocidad y



(a) 1ra ARTICULACIÓN

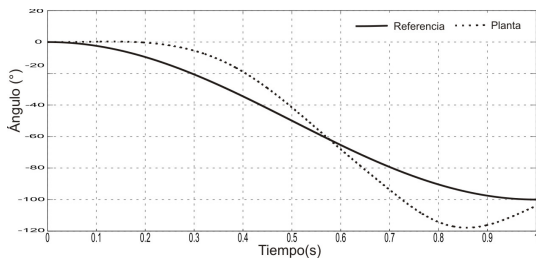


(b) 2da ARTICULACIÓN

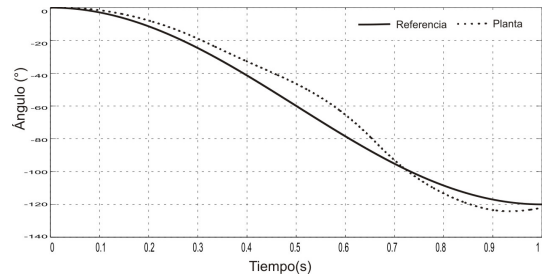


(c) EFECTOR FINAL

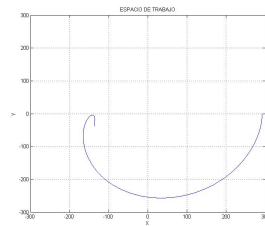
Figura 3.27: PRUEBA 1 - CONTROLADOR PID - SIMULACIÓN



(a) 1ra ARTICULACIÓN



(b) 2da ARTICULACIÓN



(c) EFECTOR FINAL

Figura 3.28: PRUEBA 2 - CONTROLADOR PID - SIMULACIÓN

aceleración de las articulaciones la no-linealidad del modelo se hace mas notable; pero independientemente de esto el controlador logra que el seguimiento de las trayectorias por parte de la plata presente buenos resultados.

(ver figura 3.31).

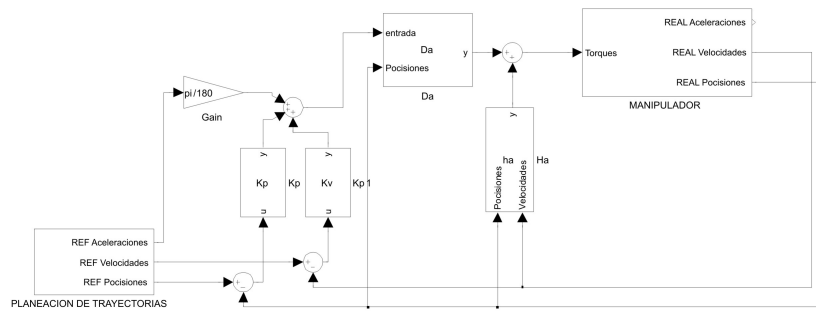


Figura 3.29: CONTROL TACOMETRICO

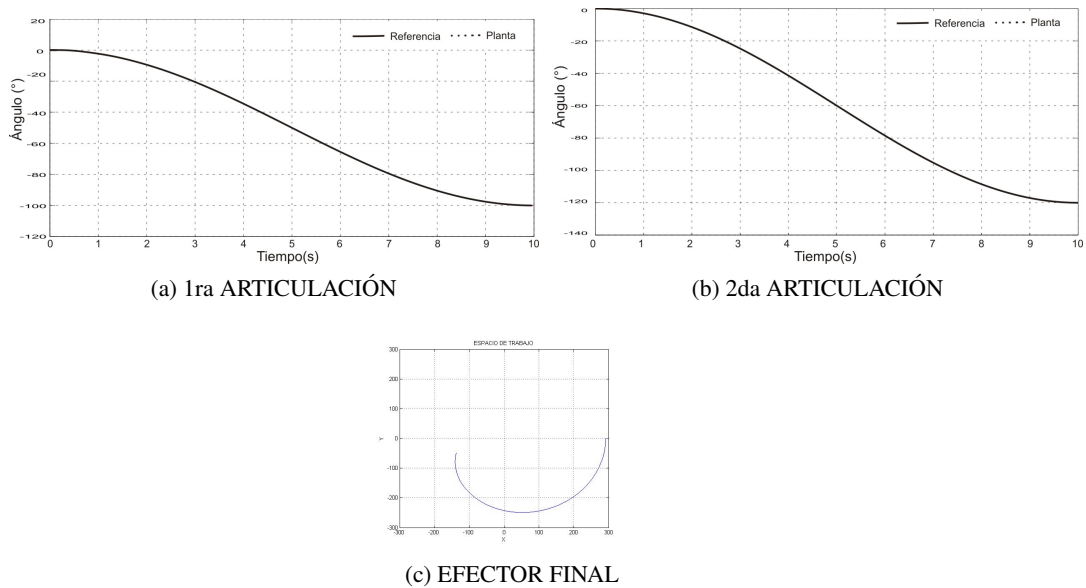


Figura 3.30: PRUEBA 1 - CONTROLADOR TACOMETRICO - SIMULACIÓN

### RESULTADOS SOBRE LA ESTRUCTURA FÍSICA

Ya simulados y analizados los dos tipos de control, se procede a programarlos e implementarlos sobre el robot construido, empezando por el PID las ganancias para cada articulación de la plata real se sintonizaron por el algoritmo propuesto en la figura 3.26,(ver tabla 3.10).

Las dos pruebas de este controlador sobre la planta real se hicieron a partir de una trayectoria predeterminada, para la cual se cambia el tiempo de ejecución de 2 segundos a 1 segundo respectivamente (ver figura 3.32). Comparando las figuras 3.33 y 3.34 se observa que el robot no cumple satisfactoriamente la trayectoria cuando la velocidad aumenta; de esta manera se comprueba físicamente con la planta real la no-linealidad del sistema debido a cambios inerciales cuando se exigen altas velocidades.

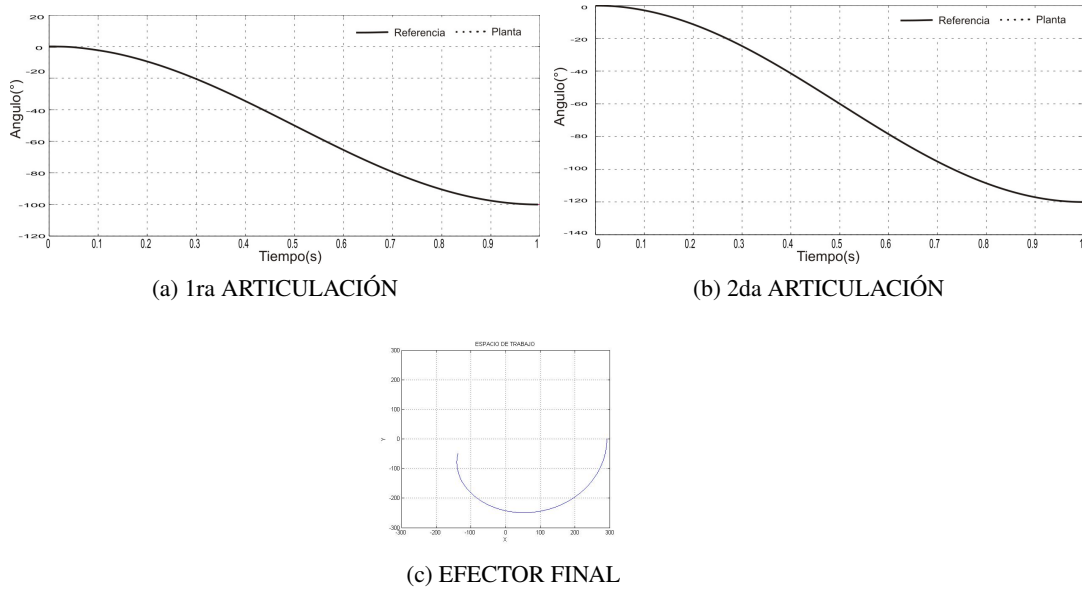


Figura 3.31: PRUEBA 2 - CONTROLADOR TACOMETRICO - SIMULACIÓN

	PID Art 1	PID Art 2	PID Art 3	PID Art 4
$K_p$	10	10	90	0.7
$K_i$	0.005	0.005	0.001	0.001
$K_d$	7	7	0.5	0.1

Cuadro 3.10: GANANCIAS PID - REAL

Para la aplicación real del controlador tacometrico se utilizaron las mismas referencias de entrada que en la implementación del PID, las ganancias de las matrices  $K_p$  y  $K_v$  se obtuvieron para obtener un amortiguamiento critico como respuesta siguiendo el algoritmo presentado en la figura 3.26 (ver 3.23 y 3.24).

$$K_p = \begin{bmatrix} 0,16 & 0 \\ 0 & 0,6 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 0,015 & 0 \\ 0 & 0,015 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Como era de esperarse por los resultados apreciados en la simulación, las pruebas sobre la planta real arrojan mejores resultados aplicado el controlador tacometrico, conviene poner en manifiesto que el funcionamiento del controlador no es óptimo como se observaba en las simulaciones (ver fig 3.31), debido a que no se tuvieron en cuenta factores tales como la fricción, saturación de los controladores de potencia, y juegos ar-

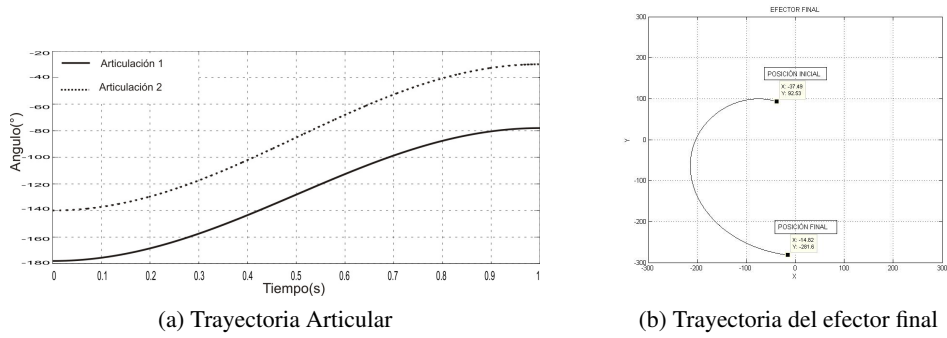


Figura 3.32: TRAYECTORIA DE REFERENCIA

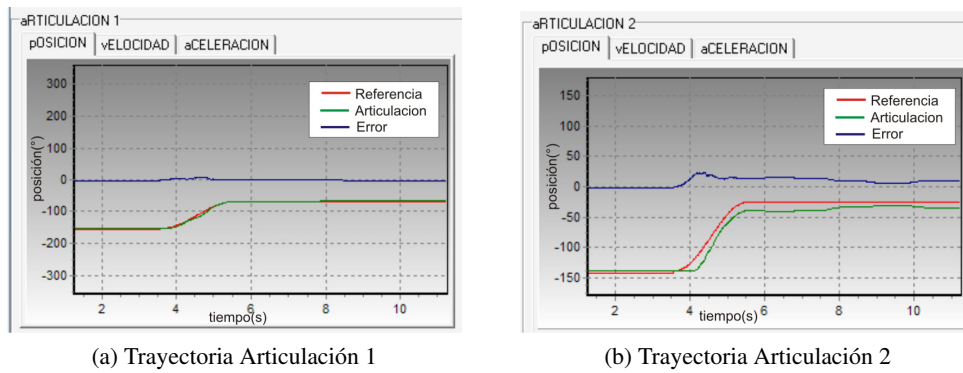


Figura 3.33: PRUEBA 1 - CONTROLADOR PID - PLANTA REAL

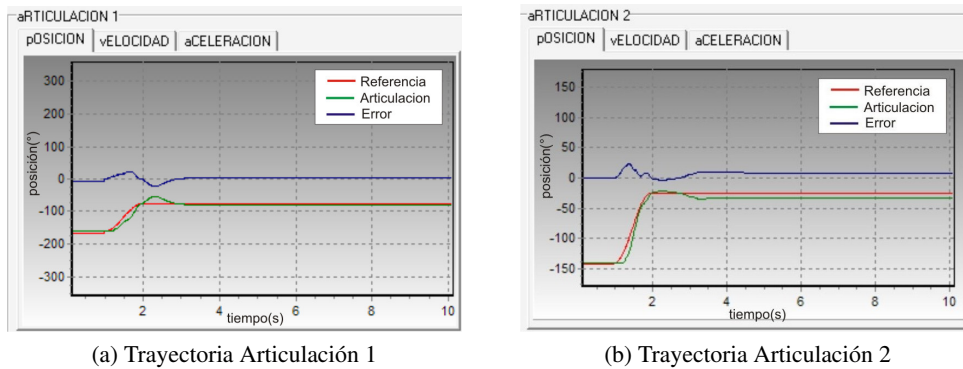
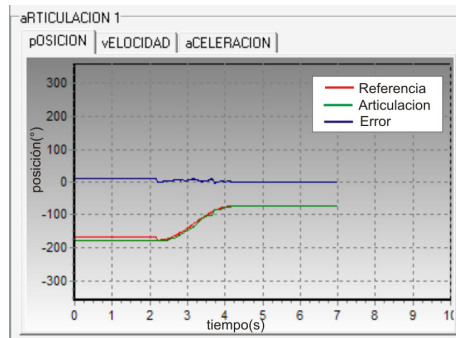


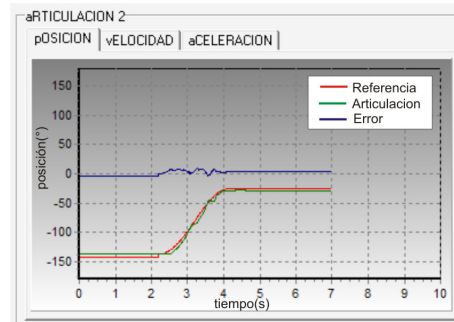
Figura 3.34: PRUEBA 2 - CONTROLADOR PID - PLANTA REAL

ticulares intrínsecos al mecanismo.

Cabe resaltar que el controlador tacometrico se a programado partiendo de una formulación en tiempo continuo (el algoritmo programado no tiene en cuenta frecuencias de muestreo ni transformación a tiempo discreto de los parámetros dinámicos ni de con-

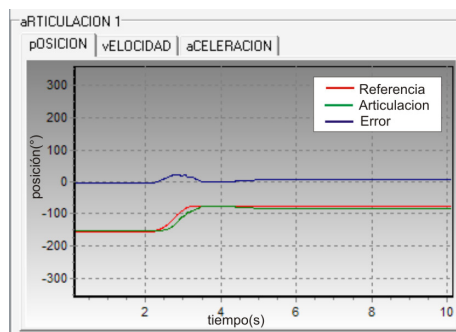


(a) Trayectoria Articulación 1

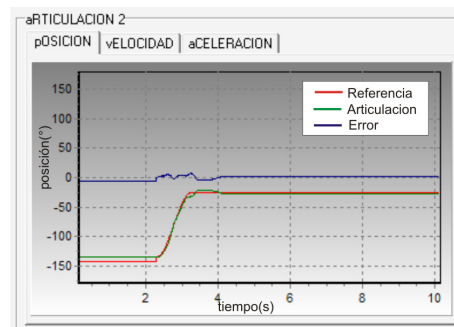


(b) Trayectoria Articulación 2

Figura 3.35: PRUEBA 1 - CONTROLADOR TACOMETRICO - PLANTA REAL



(a) Trayectoria Articulación 1



(b) Trayectoria Articulación 2

Figura 3.36: PRUEBA 2 - CONTROLADOR TACOMETRICO - PLANTA REAL

trol), debido a que las frecuencias de comportamiento dinámico del manipulador (del orden de 100KHz) no son significativas con respecto a la frecuencias con la que se cierra el bucle de control (del orden de 16Mhz)[11].

### 3.4. VISIÓN DE MÁQUINA

#### 3.4.1. CARACTERÍSTICAS

El ideal del sistema de visión de máquina es identificar la posición de algún tipo de objeto predeterminado en coordenadas X y Y referentes al espacio de trabajo. Para cumplir con este objetivo se cuenta con la cámara web CREATIVE WEBCAM INSTANT (vease fig 3.37a) acoplada a una base especialmente diseñada, así se consigue la vista aérea completa del área de trabajo del robot manipulador (vease fig 3.37b). Además de la cámara se necesita de un marcador de posición, el cual es utilizado para identificar la posición cero del espacio de trabajo.

El marcador debe contar con las siguientes características (vease fig 3.38a): Sus di-

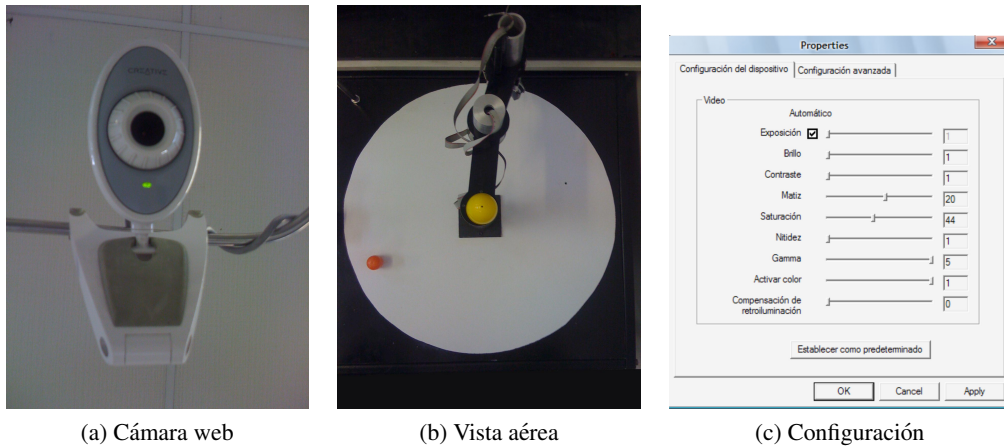


Figura 3.37: MÓDULO DE VISIÓN DE MÁQUINA

mensiones tienen que encontrarse entre los 55mm y 60 mm de diámetro, puede tener cualquier forma irregular, su color puede ser cualquiera menos blanco o negro y debe ubicarse en el centro del espacio de trabajo; El objeto a manipular debe contar con las siguientes características (vease fig 3.38b): Sus dimensiones tienen que encontrarse entre los 32mm y 35 mm de diámetro, puede tener cualquier forma irregular, su color puede ser cualquiera menos blanco o negro y su peso no debe sobrepasar los 250gr.

El algoritmo de procesamiento de imagen ubica al objeto por medio de la concentración de color; se empieza por la discretización de los colores con la transformación de espacios RGB-HSV, seguido de la operación de una plantilla que encuentra la concentración de color respectiva de cada objeto, pero esta ubicación es referente a las coordenadas de la imagen y no del espacio de trabajo, para solucionar esto se hace una transformación de coordenadas cámara-espacio de trabajo, logrando obtener las coordenadas reales de los objetos.

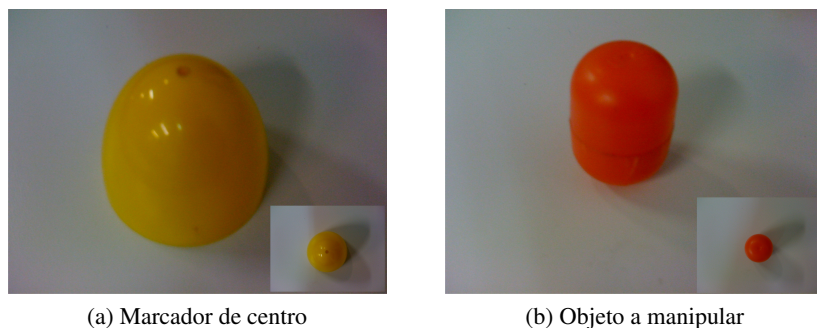


Figura 3.38: OBJETOS A IDENTIFICAR

Como requisito indispensable la cámara debe tener una configuración de contraste, brillos y nitidez muy bajos, esto con el fin de minimizar el ruido y la pérdida de color debido a condiciones inapropiadas de iluminación (vease fig 3.37c). Para aumentar la velocidad de ubicación del objeto se aplican diferentes técnicas, entre las cuales vale mencionar que sólo se analiza el espacio de trabajo del manipulador y no toda la imagen que captura la cámara.

### 3.4.2. ALGORITMO

Paso 1 - RGV-HSV: Cuando se trabaja con imágenes provenientes de una cámara por lo general el formato de colores que se recibe es RGB, este formato utiliza 8 bits para definir el grado de cada una de las tonalidades principales, por esta razón no es útil para la identificación de colores ya que no permite una definición lineal de los mismos, para solucionar esto se hace una transformación del formato RGV a HSV, el cual define el modelo del color en términos de tonalidad, saturación y valor de color.

Paso 2 - Selección del color: Ya trabajando sobre un espacio de colores lineal se filtra la capa de saturación a través de un valor mínimo y máximo, que selecciona de la imagen sólo los pixels que tienen algún color determinado; este rango de colores filtrado se pinta de color amarillo para su plena identificación y calibración.

Paso 3 - Concentración de color: Discretizada la imagen se procede a encontrar las concentraciones de color importantes, el método de búsqueda utilizado se denomina template matching [5], donde básicamente se hace la búsqueda de patrones en una imagen a partir de plantillas predeterminadas (para una descripción más detallada del recorrido de la plantilla sobre la imagen ver figura 3.39), sobre esta plantilla y la sección de la imagen correspondiente se aplica una operación de comparación (ver ecuación 3.25), cuando la plantilla concuerda con la imagen dicha operación da como resultado un valor característico que identifica el objeto.

$$Z = \sum_{p=0}^{p=m \times n} Plantilla_{(p)} \times Imagen_{(p)} \quad (3.25)$$

Paso 4 - Transformación de coordenadas: Una cámara de vídeo en su imagen entrega puntos ubicados en un sistema de coordenadas angulares; para obtener la ubicación  $x$  y  $y$  en el espacio de trabajo de un punto ubicado en  $\alpha$  y  $\beta$  del espacio de la cámara es necesario hacer una transformación basada en características tales como resolución, ángulo máximo de captura y distancia del objetivo (vease fig 3.40).



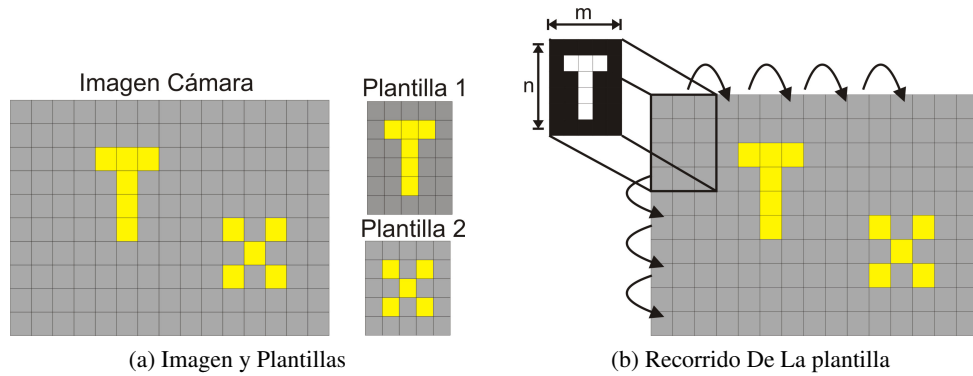


Figura 3.39: TEMPLATE MATCHING

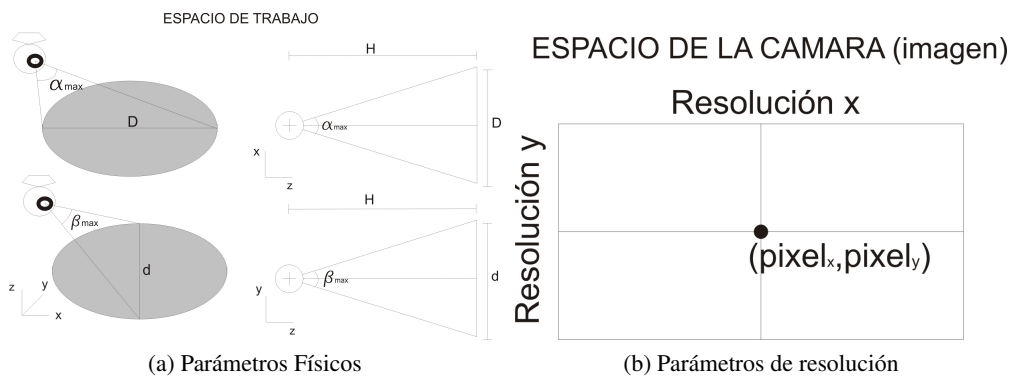


Figura 3.40: CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA

$$\alpha_{max} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{D}{2H} \right) \quad (3.26)$$

$$\beta_{max} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{d}{2H} \right) \quad (3.27)$$

$$\alpha_{(p_x)} = \frac{[(2pixel_x) - (Resolución_x)] - \alpha_{max}}{2Resolución_x} \quad (3.28)$$

$$\beta_{(p_y)} = \frac{[(2pixel_y) - (Resolución_y)] - \beta_{max}}{2Resolución_y} \quad (3.29)$$

$$x_{(\alpha)} = 2H \tan(\alpha) \quad (3.30)$$

$$y_{(\beta)} = 2H \tan(\beta) \quad (3.31)$$

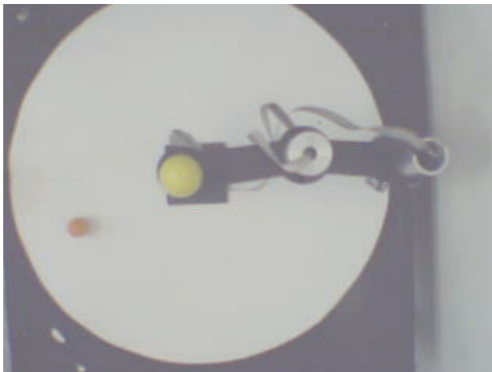
Con las ecuaciones 3.26 y 3.27 se encuentran los parámetros angulares de la cámara, a partir de estos con 3.28 y 3.29 se determina los ángulos respectivos para un pixel determinado. Con 3.30 y 3.31 son resueltas las coordenadas del pixel con respecto al sistema de referencia del espacio de trabajo. Para el caso específico los parámetros de caracterización se encuentran en la tabla 3.11.

PARÁMETROS	VALOR
H	123cm
D	83cm
d	62cm
$\alpha_{max}$	37.28°
$\beta_{max}$	28.29°
Resolución	320x240

Cuadro 3.11: PARÁMETROS CREATIVE WEBCAM INSTANT

### 3.4.3. RESULTADOS OBTENIDOS

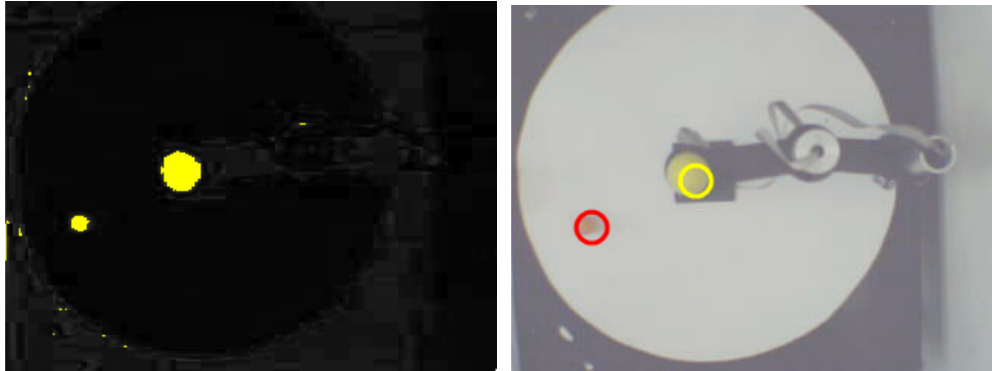
Como resultado principal se logró una ubicación exacta en el espacio de trabajo del objeto a manipular, como se puede observar en la fig 3.41 se consigue una ubicación de los objetos importantes a partir de una imagen normal; logrando inmunidad a cambios de iluminación moderados y cambios de ubicación de la cámara que no modifiquen su altura, esto último debido a la uso del marcador de centro del espacio de trabajo.



(a) Imagen original



(b) Imagen en HSV



(a) Imagen discretizada en color

(b) Ubicacion final

Figura 3.41: FASES DEL MÓDULO DE VISIÓN DE MÁQUINA

Otra característica importante es la velocidad de 20 fps con la que trabaja el algoritmo, esto de suma importancia para una respuesta en tiempo real del manipulador frente a cambios de posición del objeto a manipular.

### 3.5. INTERFAZ DE USUARIO

Una de las partes más importantes del trabajo, es la interacción del usuario con el robot, para esto se desarrollo un software donde se pueden configurar, supervisar y poner en marcha el robot manipulador; las variables articulares de posición, velocidad y aceleración se pueden observar en tiempo real por medio de gráficas (ver figura 3.42).

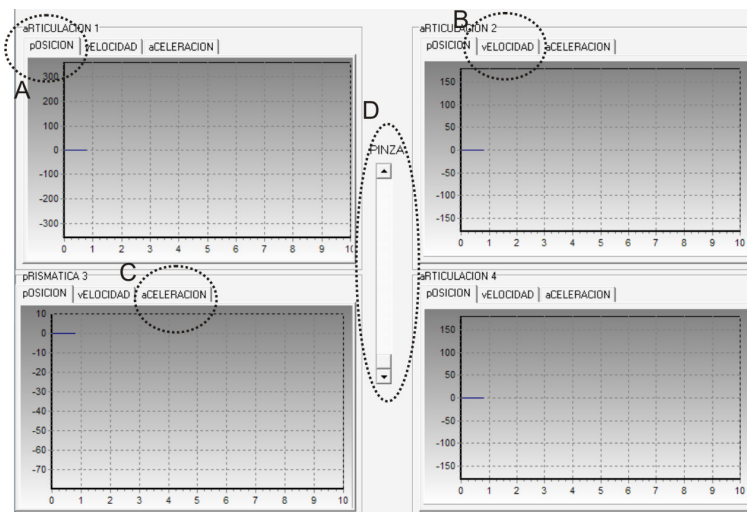


Figura 3.42: INTERFAZ DE MONITOREO DE VARIABLES ARTICULARES(A posición, B velocidad, C aceleración, D control gripper)

El software también representa el movimiento del robot en un modelo virtual 3D elaborado haciendo uso de herramientas del paquete de software OPEN-GL©, donde se pueden variar tanto los ángulos como el zoom de la perspectiva (ver figura 3.43).

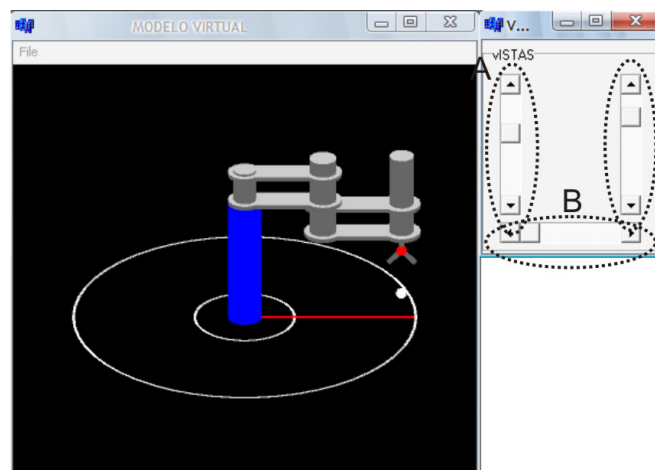


Figura 3.43: INTERFAZ DEL MODELO VIRTUAL(A zoom, B ángulo eje z, C ángulo eje x)

El usuario tiene la posibilidad de configurar y escoger el tipo de trayectoria que ejecute el robot (ver figura 3.44 indicador C), se pueden ingresar tanto la velocidad máxima o el tiempo mínimo en que se desea que se mueva el manipulador (ver figura 3.44 indicador B).

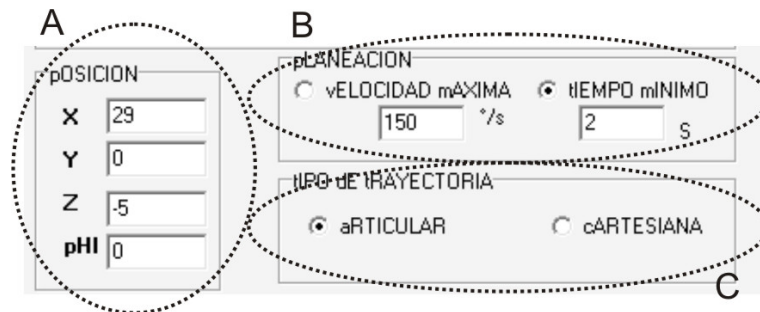


Figura 3.44: INTERFAZ DE PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS

El modulo de visión de maquina se encuentra en una sub-ventana, donde se muestra la imagen de la cámara, las coordenadas del objeto identificado, y los botones de control y definición de centro (ver imagen 3.45, marcadores A y B respectivamente).

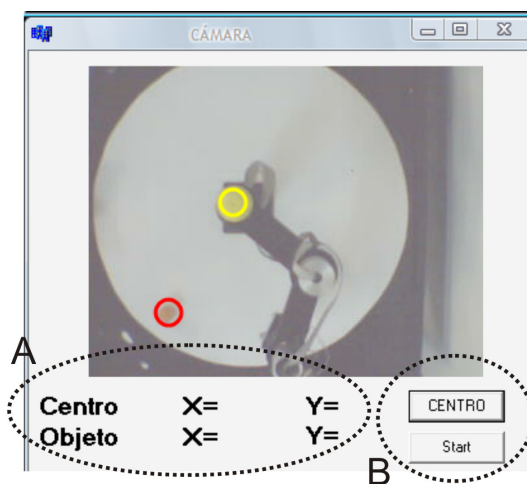


Figura 3.45: INTERFAZ DE VISION DE MAQUINA

Por último para modificar el control del robot, se encuentra una sub-ventana donde se puede seleccionar entre el tipo de controlador a utilizar, ya sea PID o tacometrico, además de cambiar los parámetros de cada uno.(ver figura 3.46 indicadores A,B y C respectivamente).

El ejecutable del paquete software se incluye en el anexo F.

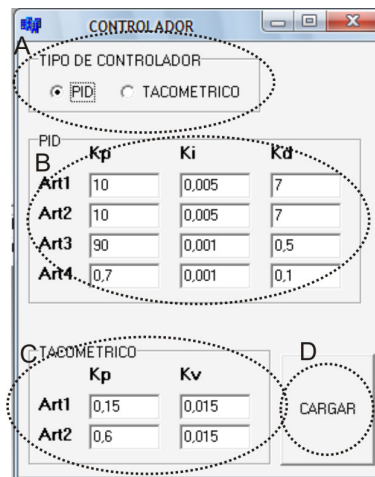


Figura 3.46: INTERFAZ PARAMETROS DE CONTROL

### 3.6. UNA HERRAMIENTA DE APRENDIZAJE

La plataforma como tal permite abordar temáticas de robótica y control, de una manera nueva para el estudiante; se ven aplicados conceptos de control, modelamiento matemático y robótica. Por esto es necesario presentar tanto al profesor guía de laboratorio como al estudiante una serie de manuales que permitan hacer buen uso de la plataforma.

Para un mejor entendimiento se optó por elaborar tres vídeo-manuales donde se explica:

- La simulación del manipulador con el paquete de software *Matlab*<sup>®</sup>.
- Explicación de los parámetros configurables del robot.
- Ejemplos de puesta en marcha del toda la plataforma como tal.

Se empleo el paquete de software *Camtasia Studio* 6<sup>®</sup> (version demo de 30 días) para realizar las capturas de vídeo de la interfaz de usuario y del robot manipulador. Estos vídeo-manuales se adjuntan en el anexo F.



## Capítulo 4

---

# DESEMPEÑO Y RESULTADOS

---

Ya diseñados, construidos y ensamblados los diferentes módulos mecánicos, electrónicos y de control, junto con el sistema de visión de maquina. En la plataforma se pueden configurar y ver funcionando los siguientes temas:

- comparación de técnicas de control
- planeación de trayectorias
- modelamiento dinámico de robots
- sintonización de controladores
- visión de maquina
- diseño mecánico de estructuras

El desempeño de cada una de estas características se analizo por separado en cada uno de los anteriores capítulos, solo cabe resaltar que el desempeño del modulo completo solo se puede evaluar por el usuario a la hora de aplicar los vídeo-manuales, y ver que a través de la plataforma de aprendizaje la teoría de la clase en verdad concuerda con la practica de laboratorio.





## Capítulo 5

---

# SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

---

Como posibles mejoras se da la tentativa de hacer las siguientes modificaciones:

- Para aumentar la robustez del manipulador al agarrar objetos del espacio de trabajo es posible acoplar un sensor en el efector final, se recomienda un sensor de proximidad ultrasónico.
- En el diseño electrónico se recomienda utilizar controladores de potencia basados en transistores de campo MOSFET, debido a que son capaces de manejar altas corrientes sin pérdidas considerables de potencia [4], son la tecnología idónea para controladores de potencia de motores.
- Para disminuir los problemas de ajuste mecánico en este tipo de mecanismos, se recomienda usar motores de accionamiento directo, este tipo de motores al no usar caja reductora evitan problemas de acople mecánico y fricciones indeseadas, se aplican mayormente en los manipuladores tipo SCARA industriales; otra alternativa es acoplar a los motores cajas reductoras del tipo armónico [2].
- Para solucionar el problema de no tener un punto fijo de referencia de posición en el robot se aconseja implementar encoders absolutos en cada una de las articulaciones, o algún tipo de sensor que defina la posición *home*, como finales de carrera.

Posibles trabajos futuros a implementar:

- Modelar matemáticamente el manipulador profundizando en los términos de fricciones y fuerzas externas, a través de la versión completa del software NX SIEMENS©, debido a que estos términos afectan considerablemente el desempeño del robot cuando se necesitan altas prestaciones de velocidad y precisión.

- Modelar matemáticamente el manipulador a partir de la planta real a través de técnicas modernas de identificación de sistemas, tales como la función *ident* de MATLAB©.
- Probar e implementar sobre el manipulador técnicas innovadoras de control tales como control adaptativo y control neuro-difuso, citadas en el capítulo 1.
- Acoplar al proyecto un sistema de visión de máquina que sea capaz de reconocer e identificar objetos de diferente forma y color, además de ubicarlos en el espacio tridimensional  $x$  y  $z$ , se recomienda un módulo de visión estereoscópica.

## Capítulo 6

---

# CONCLUSIONES

---

Se diseñó y construyó un robot manipulador SCARA de 4DOF, implementando desde una perspectiva global conocimientos de diseño mecánico, electrónico e informático; consiguiendo buenos resultados de acople entre los sistemas, además de no entrar en gastos adicionales por problemas de mal diseño o mala estimación de componentes. En síntesis se consiguió el funcionamiento conjunto y acorde de los diferentes sistemas.

Se logró aplicar y comparar dos métodos de control tanto en la simulación como sobre el robot construido, obteniendo mejores resultados de trayectoria en las pruebas elaboradas por el método de control tacométrico; se demuestra así que el robot siendo un sistema altamente no-lineal es el tipo de planta de prueba perfecta para la implementación y comparación de controladores innovadores; esto de gran importancia para la enseñanza e investigación de temáticas de robótica y control.

Se implementó un paquete de software que permite configurar, supervisar, y poner en marcha al robot manipulador. Es decir se logra una interacción completa usuario-robot con el fin de ofrecer todas las posibilidades para el aprendizaje de temáticas básicas y avanzadas de robótica y control.

Se construyó un módulo de visión de maquina que permite al robot obtener la ubicación de determinados objetos en el espacio de trabajo, para manipularlos de manera automática. Por consiguiente el robot con una configuración previa esta en capacidad de interactuar con el entorno sin supervisión humana.

Se elaboraron tres vídeo-manuales guía acerca de la simulación, configuración y funcionamiento del robot manipulador. Brindando así bases solidas del uso del robot para la enseñanza de la robótica y el control.

Se logra el primer antecedente de trabajo de grado que a partir de una concepción de diseño mecatrónico, construye y pone en marcha un robot manipulador con visión de maquina, capaz de interactuar con el entorno sin supervisión humana; esto de gran importancia ya que brinda un incentivo significativo para mejores trabajos futuros.

A partir de selección de materiales, herramientas CAD aplicadas con criterios de diseño mecánico, y procedimientos matemáticos; se calculó y comprobó el modelo dinámico del manipulador antes de ser construido. De esta forma se cumple un paso primordial de la concepción de ingeniería mecatrónica: *poder aplicar criterios de diseño sobre un sistema global antes de ser construido.*

---

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Jan Axelson. *USB Complete Everything You Need to Develop Custom USB Peripherals*. Lakeview Research LLC, 2005. [cited at p. 24]
- [2] Antonio Barrientos. *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A., 1997. [cited at p. 11, 26, 49]
- [3] Ferdinand Beer and E. Russell. *Mecánica de Materiales*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2006. [cited at p. 17]
- [4] Louis Boylestad, Robert L. y Nashelsky. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2003, 2003. [cited at p. 49]
- [5] Roberto Brunelli. *Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice*. 2009. [cited at p. 41]
- [6] J. Denavit and R.S. Hartenberg. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of applied mechanics*, 1955. [cited at p. 7]
- [7] A. A. Eftekharian and H. Sayyaadi. Design of mixed fuzzy-ga controller for scara type robot. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2173–2178, October 2006. [cited at p. 1, 7]
- [8] Meng Joo Er and Kang Chew Liew. Control of adept one scara robot using neural networks. 44(6):762–768, December 1997. [cited at p. 1, 7]
- [9] I.-J. Ha, M.-S. Ko, and S. K. Kwon. An efficient estimation algorithm for the model parameters of robotic manipulators. 5(3):386–394, June 1989. [cited at p. 2]
- [10] Olier Ivan. *Fundamentos de Robótica e Inteligencia Artificial*. 2002. [cited at p. 3, 7, 8]
- [11] Aníbal Ollero Baturone. *Robótica, Manipuladores y robots móviles*. 2001. [cited at p. 6, 7, 8, 39]

- [12] K. Onozato and Y. Maeda. Learning of inverse-dynamics and inverse-kinematics for two-link scara robot using neural networks. In *Proc. Annual Conference SICE*, pages 1031–1034, September 17–20, 2007. [cited at p. 1]
- [13] D. Prabu, S. Kumar, and R. Prasad. Dynamic control of three-link scara manipulator using adaptive neuro fuzzy inference system. In *Proc. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control ICNSC 2008*, pages 1609–1614, April 6–8, 2008. [cited at p. 1, 7]
- [14] N. Saga, T. Nakamura, J. Uehara, and T. Iwade. Development of artificial muscle actuator reinforced by kevlar fiber. In *Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology IEEE ICIT '02*, volume 2, pages 950–954, December 11–14, 2002. [cited at p. 6]
- [15] C. Wildner and J. E. Kurek. Calculation of scara robot model using neural nets. In *Proc. Third International Workshop on Robot Motion and Control RoMoCo '02*, pages 435–439, November 9–11, 2002. [cited at p. 2]
- [16] Hanqi Zhuang, Wen-Chiang Wu, and Z. S. Roth. Camera assisted calibration of scara arms. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 3(4):46–53, December 1996. [cited at p. 1]

# **Anexos**





**Anexo A**

---

# **PLANOS MECÁNICOS**

---



**Anexo B**

---

# **PLANOS ELECTRÓNICOS**

---



**Anexo C**

---

# **HOJAS DE ESPECIFICACIÓN (Datasheet)**

---



## Anexo D

---

# **FUNCIONES *EMERO*®**

---





**Anexo E**

---

**MODELO DINÁMICO  
NEWTON-EULER**

---



**Anexo F**

---

# **MEDIOS MAGNÉTICOS**

---



---

# Lista de Símbolos y Abreviaciones

---

Abreviación	Descripción	Página
SCARA	Selective Compliant Assembly Robot Arm	page 16
RGB	Red, Green, Blue	page 41
HSV	Hue, Saturation, Value	page 41
AGV	Automatic Guided Vehicle	page 3
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer	page 6
D-H	Denavit-Hartenberg	page 25
PID	Proportional, Integral, Derivative	page 11
FEM	Finite Element Method	page 18
MPa	Mega Pascal	page 17
KHz	Kilohertz	page 20
BJT	Bipolar Junction Transistor	page 21
DC	Direct Current	page 17
PWM	Pulse Width Modulation	page 22
USB	Universal Serial Bus	page 22
CAD	Computer-Assisted Design	page 30