

11126  
46



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

DISEÑO Y MANUFACTURA ASISTIDO POR COMPUTADORA

"DISEÑO CONCEPTUAL Y DE FORMA  
DE UN MANIPULADOR INDUSTRIAL  
CON TRES GRADOS DE LIBERTAD"

TRABAJO DE SEMINARIO  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :  
MOISES HERRERA VAZQUEZ

ASESOR: ING. CARLOS ERNESTO PINEDA GARCIA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO.

2003

1



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Diseño y Manufactura Asistido por Computadora

Diseño Conceptual y de Forma de un Manipulador Industrial

con Tres Grados de Libertad.

que presenta el pasante: Moisés Herrera Vázquez

con número de cuenta: 092339844 para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 6 de Noviembre de 2003

MODULO

PROFESOR

FIRMA

I

Ing. Enrique Cortés González

[Firma]

II

M. en I. Felipe Díaz del Castillo

[Firma]

III

Ing. Eusebio Reyes Carranza

[Firma]

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## DEDICATORIAS

---

A mis Padres:

Manuel y Elva. Por que gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de mi vida, fruto del inmenso apoyo, amor y confianza que en mi se depositó y con los cuales he logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el grado más grande que pudiera recibir y por lo cual les viviré eternamente agradecido. Con admiración y respeto.

A mis hermanos y hermana:

Juan Manuel, José de Jesús, Uriel Guadalupe, Alma Kenia, Saúl ,Noc. Sabiendo que no existiría una forma de agradecer la confianza y el esfuerzo, quiero que sientan que el objetivo logrado también es suyo y que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo. Con respeto y admiración

A mis hijas:

Litzy Guadalupe, Mitzy Priscilla. Como un testimonio de la gratitud ilimitada , a mis hijas porque su presencia ha sido y será siempre el motivo más grande que me ha impulsado para lograr esta meta.

A mi esposa:

María Guadalupe. Por su comprensión y tolerancia.

Al ingeniero Carlos Ernesto Pincua García (por su asesoramiento en el desarrollo de este trabajo).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ÍNDICE**

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS	3
ÍNDICE	4
ÍNDICE DE FIGURAS	8
OBJETIVOS	10
INTRODUCCIÓN	11

**CAPITULO I**

**El marco teórico**

1.1	El marco teórico.	25
1.2	Definiciones generales	25
1.3	Parámetros de Denavit-Hartenberg.	32
1.3.1	Que necesitamos para describir un eslabón	33
1.3.2	Ahora describimos una junta	34
1.3.3	A partir de la cinemática	35
1.3.4	Aplicación Denavit-Hartenberg a un cuerpo	37
1.3.5	Representación de Denavit-Hartenberg	42
1.4	Modelación cinemática de un sistema mecánico de cadena abierta	43
1.4.1	Análisis de la configuración no deformada de $R_0$	46
1.4.2	Planteamiento de los problemas cinemáticos directo e inverso	47
1.4.3	Problema cinemático directo	48
1.4.4	Análisis de la configuración deformada de $R_0$	48
1.4.5	Problema cinemático inverso en la configuración deformada	51

**CAPITULO II**

**Diseño conceptual y de forma de un manipulador con 3 GDL.**

2	Diseño conceptual y de forma de un manipulador con 3 GDL	52
2.1	Anatomía del robot	59

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**INDICE**

---

2.1.1	Volumen de trabajo	60
2.1.2	Componentes de un robot	61
2.1.3	Configuraciones básicas de un robot	64
2.1.4	Capacidad de movimiento de un robot	66
2.1.5	Precisión de movimiento	69
2.1.6	Programación del robot	70
2.1.7	Sistemas de control y ejecución dinámica	71
2.1.8	Controladores	72
2.1.9	Actuación de un robot y componentes de retroalimentación	72
2.1.10	Manos del robot (efector final)	78
2.1.11	Categorías de efectores finales	79
2.1.12	Clasificación de pinzas	79
2.1.13	Pinzas mecánicas	79
2.1.14	Sensores robóticos	82
2.1.15	Sensores, Transductores y Actuadores.	84
2.1.16	Transductores.	84
2.1.17	Actuadores.	85
2.1.18	Sistema de impulsión del robot.	85
2.1.19	Planeación de movimientos.	86
2.1.20	Reducción del problema.	88
2.1.21	Aprendizaje del robot.	88
2.1.22	Sistemas expertos y los robots	89
2.1.23	El procesador del lenguaje.	90
2.1.24	El justificador.	90
2.1.25	La pizarra.	91
2.1.26	La base de conocimientos.	91
2.1.27	El controlador.	91
2.1.28	Áreas de aplicación de los sistemas expertos.	91

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO III

## Generación de objetos y del ambiente

3.	Generación de objetos y del ambiente.	93
3.1	Primitivas.	94
3.1.1	Modelo de objetos.	94
3.1.2	Generación de primitivas paramétricas.	96
3.1.3	Generación de sólidos por barrido.	97
3.1.4	Objetos compuestos.	98
3.1.5	Cadenas cinemáticas.	99

## CAPITULO IV

## Manipuladores y robots.

4.	Manipuladores y robots.	101
4.1	Construcción de los robots industriales.	101
4.2	Propiedades de los robots industriales.	104
4.3	Control de robots industriales.	108
4.4	Diseño del control de un robot.	109
4.4.1	Dispositivos de alimentación sencillos.	109
4.4.2	Robots de control por puntos con posiciones programables en todos los ejes	110
4.4.3	Robots con control de trayectoria con desplazamiento libremente programables en todos los ejes	110
4.4.4	Robots de reproducción	110
4.5	Memoria de programas.	111
4.5.1	Estructura del programa.	111
4.5.2	Programación.	112
4.5.3	Conexiones lógicas.	114
4.5.4	Conexión de sensores.	114
4.6	Posibilidades de aplicación de los robots industriales.	114
4.6.1	Criterios para la utilización de robots industriales.	116

**CONCLUSIONES**

5	Conclusiones	120
---	--------------	-----

**BIBLIOGRAFÍA**

6	Bibliografía	122
---	--------------	-----

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Carro robot.	30
Figura 1.2	Tipos de brazos mecánicos.	31
Figura 1.3	Representación de junta de revolución.	32
Figura 1.4	Representación de junta prismática.	33
Figura 1.5	Representación de un eslabón con dos juntas de revolución en cada lado.	34
Figura 1.6	Descripción de una junta.	34
Figura 1.7	Representación física de un manipulador con seis eslabones.	36
Figura 1.8	Eslabones de una cadena cinemática.	38
Figura 1.9	Asignación de parámetros D-H.	39
Figura 1.10	Descripción de las transformaciones para dos juntas.	42
Figura 1.11	Caracterización del robot.	43
Figura 1.12	Configuración no deformada de $R_0$	45
Figura 1.13	Configuración deformada de $R_0$	49
Figura 2.1	Controlador de lazo abierto.	57
Figura 2.2	Un robot PUMA ilustrando articulaciones y elementos.	60
Figura 2.3	Configuración física sobre la forma del volumen de trabajo.	61
Figura 2.4	Sistema de robot industrial.	62
Figura 2.5	Configuración polar.	64
Figura 2.6	Configuración cilíndrica.	65
Figura 2.7	Configuración cartesiana.	65
Figura 2.8	Configuración de brazo articulado.	66
Figura 2.9	Robot industrial paralelo	67
Figura 2.10	Tipos de articulación giratoria.	68
Figura 2.11	Asociación de tres grados de libertad con movimientos del brazo y del cuerpo	68
Figura 2.12	Metodología de control de sistemas difusos.	76
Figura 2.13	Robot con efectores finales.	79
Figura 2.14	Robot con pinza mecánica.	81
Figura 2.15	Sensor de estado interno.	82

Figura 2.16	Sensor de estado externo.	83
Figura 2.17	Visión del robot.	83
Figura 2.18	Sensor táctil.	84
Figura 2.19	Sensor de proximidad y alcance.	84
Figura 2.20	Componentes de un sistema experto.	91
Figura 3.1	Fases de desarrollo de un modelador.	93
Figura 3.2	Árbol generado por B-rep.	95
Figura 3.3	(a) vista de un sólido (b) las superficies que componen el sólido (c) las líneas y puntos que toman las superficies.	95
Figura 3.4	Propiedades geométricas de las primitivas.	96- 97
Figura 3.5	(a) barrido lineal (b) barrido radial.	98
Figura 3.6	Generación de objeto compuesto.	99
Figura 3.7	Cadena cinemática de un manipulador.	100
Figura 4.1	Diseño cinemático de los ejes principales de un robot industrial y area de trabajo resultante L = eje lineal R = eje rotatorio.	101
Figura 4.2	Ejes lineales rotatorios.	102
Figura 4.3	Tipos de pinzas.	102
Figura 4.4	Elementos constructivos de un robot industrial.	104
Figura 4.5	Robot universal típico.	105
Figura 4.6	Montaje de chips.	106
Figura 4.7	Robots de soldadura.	107
Figura 4.8	Multifuncionalidad de un robot industrial	115

## **OBJETIVOS**

---

### **DISEÑO CONCEPTUAL Y DE FORMA DE UN MANIPULADOR INDUSTRIAL CON TRES GRADOS DE LIBERTAD.**

#### **OBJETIVOS:**

- Construir el modelo cinemático de posicionamiento de un robot de 3GDL mediante la notación de Denavit-Hartenberg, y bajo este modelo, obtener los parámetros de desplazamiento angular de los eslabones con el objetivo de controlar una secuencia de movimientos asociada con el robot.
- Análisis de la estructura formada por sistemas o subsistemas y componentes del robot manipulador.
- Generación de objetos y del ambiente para diseñar las partes que integran al robot de 3GDL.
- Estudio de las propiedades y control de los Manipuladores y Robots.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**INTRODUCCIÓN [14][15][16][17][18]**

La historia de la robótica moderna tiene su punto de partida en 1954 con la patente de George C. Devol, Jr., seguida de la instalación en 1959 del primer modelo de prueba "Unimate" en la planta de fundición inyectada de General Motors en Turnstead y la creación en 1961 de Unimation Inc.

El tiempo transcurrido desde entonces ha contemplado un intenso desarrollo de la robótica y, en concreto, de la denominada robótica industrial, de tal forma que los robots, que llegaron a ser considerados el paradigma de la automatización industrial, se han convertido en nuestros días en un elemento más, aunque importante, de dicha automatización.

Al igual que otras muchas ramas de la ciencia y la tecnología, la robótica nacia llena de promesas de futuro de un desarrollo tan rápido e intenso que, en pocos años, habría alcanzado metas que en aquellos momentos correspondían al ámbito de la ciencia ficción. Las aportaciones de una informática en continuo desarrollo, junto a las novedosas metodologías de la inteligencia artificial, permitían prever la disponibilidad, en pocos años, de robots dotados de una gran flexibilidad y capacidad de adaptación al entorno, que invadirían todos los sectores productivos de forma imparable.

¿Ha sucedido así? Solo parcialmente y, en algunos aspectos, muy por debajo de las previsiones. Pasadas las primeras etapas de desarrollo realmente vertiginoso y en muy diversos frentes, los problemas reales han frenado considerablemente las expectativas y han obligado a reconocer que el avance va a ser mucho más lento de lo esperado.

No obstante lo indicado, la robótica industrial ha alcanzado un elevado grado de madurez, y la compra e instalación de robots industriales en los entornos productivos ha dejado de ser una aventura para convertirse en una opción razonable en muchos contextos de la automatización.

Aunque la apariencia de los robots industriales no ha cambiado significativamente y muchos modelos actuales tienen una estructura y funcionamiento similares, aunque a diferentes escalas, a aquel primer PUMA que Unimation entregó en 1978 al centro de

tecnología de General Motors en Warren, Michigan, lo cierto es que tanto en los aspectos mecánicos como en el control y la programación, los avances han sido importantes aunque no espectaculares. Los robots actuales son más robustos, rápidos y fiables. Su capacidad de carga y repetitividad es comparativamente superior, y su programación se ha facilitado considerablemente.

Queda, no obstante, un largo camino por recorrer y en la tercera sección de este artículo intentaremos esbozar cuáles son previsiblemente las líneas futuras del desarrollo de la robótica, en el mundo y en nuestro entorno más inmediato, España.

### **LA ROBÓTICA EN EL MUNDO**

La principal fuente de información sobre la situación de la robótica en el mundo y sus previsiones inmediatas es la publicación "World Robotics" [1] realizada conjuntamente por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UN/ECE) y la Federación Internacional de Robótica (IFR). Esta última recopila anualmente la información de los países más significativos desde el punto de vista de la robótica a través de las asociaciones nacionales de robótica de dichos países que son miembros de la federación. La información se complementa con los datos macro-económicos aportados por la UN/ECE y por la OCDE.

#### **Dos familias de robots.**

Hasta 1997, la publicación anual conjunta de la UN/ECE y la IFR tenía el título "World Industrial Robots". En 1998, el título ha pasado a ser "World Robotics".

De una forma similar, la principal actividad organizada por la IFR, el "International Symposium on Industrial Robots (ISIR)", que viene realizándose anualmente de forma ininterrumpida desde 1970, ha cambiado de nombre por primera vez en su 29ª edición celebrada en abril de 1998 en Birmingham, para pasar a llamarse "International Symposium on Robotics (ISR)".

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

¿A qué son debidos estos cambios de denominación? Al reconocimiento de la importancia creciente de una familia de robots que se ha desarrollado, aunque más lentamente, en paralelo con la robótica industrial: la robótica de servicios.

La clásica definición de la "Robotic Industries Association (RIA)" americana ha sido sustituida por la de la norma ISO 8373. Según esta norma, "un robot industrial manipulador es un manipulador programable en tres o más ejes, controlado automáticamente, reprogramable y multifuncional, que puede estar fijado en un lugar o ser móvil, y cuya finalidad es la utilización en aplicaciones de automatización industrial".

No existe aún, por el contrario, una definición reglada de robot de servicio. A la espera de un acuerdo sobre la misma, la IFR ha adoptado la siguiente definición provisional: "Robot de servicio es un robot que opera de forma parcial o totalmente autónoma para realizar servicios útiles para el bienestar de los humanos y del equipamiento, excluyendo operaciones de manufactura". Con esta definición, que tendrá que ir siendo afinada con el tiempo, los robots industriales manipuladores pueden ser considerados robots de servicio si están dedicados a operaciones diferentes de la manufactura.

La IFR ha adoptado también una clasificación provisional de los robots de servicio, por áreas de aplicación:

Servicio a humanos (personal, protección, entretenimiento, ...)

Servicio a equipos (mantenimiento, reparación, limpieza, ...)

Otras funciones autónomas (vigilancia, transporte, adquisición de datos, ...)

En estos momentos, el número de robots de servicio operando en todo el mundo se estima en unos pocos miles y claramente por debajo de la cifra de 10.000 unidades. Estos robots están realizando principalmente tareas de transporte y mensajería (p. ej. en hospitales), limpieza, cirugía y asistencia a minusválidos, aunque se espera su extensión a otras aplicaciones en un futuro próximo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### El mercado mundial de robots.

En el periodo 1987 - 1997, la venta anual de robots industriales tuvo un claro crecimiento hasta 1990, año en que se vendieron del orden de 81.000 unidades, para caer en los años siguientes, debido principalmente al brutal descenso del mercado japonés, hasta alcanzar un mínimo en 1993 con poco más de 54.000 unidades vendidas. Después de una pequeña recuperación en 1994, el año siguiente contempló un espectacular crecimiento de casi un 29% que se moderó a un 11% en 1996 y a un 6,5% en 1997, año en el que se ha alcanzado la cifra récord de casi 85.000 unidades vendidas.

El número total estimado de robots operativos al final de 1997 supera la cifra de 711.000, con un crecimiento del 6,4% respecto al año anterior. De ellos, Japón, con prácticamente 413.000 robots, se lleva la parte del león y junto con los otros cinco grandes países en robótica, totalizan casi 611.000 robots, quedando únicamente 100.000 para el resto del mundo.

El mercado anual de robots se mueve alrededor de la cifra de 5.000 millones de dólares, con un ligero descenso en 1997, pese al incremento de ventas de robots. Este hecho pone de manifiesto el continuo descenso del precio de los robots desde 1990, que en periodo 1990 - 97 ha supuesto un decremento en dólares corrientes que va desde algo más del 21% en EEUU hasta el casi 50% en Francia. No obstante ha de tenerse en cuenta que, tal como indica destacadamente el informe UN/ICE-IFR, el precio del robot sólo representa en media un 30% del coste total del sistema.

En cuanto a las áreas de aplicación, el 29,2% de los robots instalados en 1997 han estado dedicados a soldadura (13,2% al arco y 15,7% por puntos) que ha sido la aplicación mayoritaria, seguida por montaje (25,7%), manipulación (13,1%), mecanizado (8,7%) y paletización (3,1%). Estos porcentajes varían considerablemente cuando se refieren al total de robots operativos al final de 1997. En este caso, el montaje se destaca claramente con un 33,3%, pasando la soldadura a un segundo puesto, con un 23,9%. A mecanizado le corresponde el 9,6%, a manipulación, el 7,2% y a paletizado, el 2,8%. Únicamente del orden de 5.600 robots en todo el mundo (0,9%) están dedicados a enseñanza e investigación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Por sectores industriales, la fabricación de vehículos automóviles es claramente el sector mayoritario, rozando el 30% del total, tanto en nuevas instalaciones de robots como en número de robots operativos.

En cuanto a los tipos de robots, los de 5 ó más ejes instalados en 1997 representan el 65% del total, mientras que los de 3 y 4 ejes se reparten el resto en partes aproximadamente iguales. Los robots angulares (con al menos tres articulaciones de rotación) suponen el 47.1% de los robots instalados en 1997. A este respecto, cabe destacar el reducido número de nuevas instalaciones de robots SCARA que alcanza solamente el 2.6% del total, únicamente por encima de los robots paralelos (cuyos brazos tienen articulaciones prismáticas o de rotación concurrentes) que tienen el 0.5%. Finalmente, los robots de trayectoria continua controlada representan la inmensa mayoría (82.4%) de los instalados en 1997.

### **PRINCIPALES TENDENCIAS.**

Hacer previsiones sobre la evolución de la robótica, como sobre la de cualquier tecnología en rápido desarrollo, es siempre difícil y arriesgado. La historia reciente de la robótica, tal como se comenta en la introducción, está plagada de previsiones no cumplidas y esperanzas no confirmadas. No obstante, es siempre conveniente mirar hacia el futuro y, con las salvedades del caso, se indican en este apartado algunas de las tendencias previsibles a corto y medio plazo.

Para este cometido, resulta especialmente útil analizar las inquietudes y desarrollos puesto de manifiesto en los congresos internacionales sobre la materia, como, por ejemplo, el IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [2] [3], de carácter científico, y el International Symposium on Robotics (ISR) [4] [5], con orientación aplicada. Ambos tienen periodicidad anual y reúnen a un buen número de especialistas en el campo.



### **Arquitectura de robots.**

La estructura mecánica condiciona tanto el espacio de trabajo como las prestaciones que pueden esperarse de un robot manipulador. Por este motivo ha sido objeto de numerosos estudios en el intento de lograr estructuras que puedan sustituir con ventaja a las tradicionales, al menos en determinadas aplicaciones. A pesar de las numerosas propuestas realizadas, ninguna de ellas se ha abierto camino de una manera clara en el ámbito industrial. Los denominados robots angulares acaparan casi la mitad del mercado mundial y los más novedosos robots paralelos solamente representan el 0,5% de los robots instalados en 1997.

No obstante, la investigación en este campo continúa adelante y son de esperar avances en el mismo. En lo que hace referencia a las articulaciones, dos interesantes paradigmas marcan los objetivos a alcanzar. Por un lado, la articulación tipo *muñillo* que se caracteriza por su ligereza, tamaño reducido, precisión y rapidez, y, por otro, la de tipo *rodilla*, paradigma de relación entre diseño mecánico, control complejo y suspensión activa.

Los actuadores de accionamiento directo, evitando transmisiones que pueden dar lugar a oscilaciones o comportamientos inadecuados, parecen tener un futuro prometedor. De la misma forma, los motores de estado sólido, especialmente en micro-robótica pueden tener un importante desarrollo. Dentro de este campo puede también mencionarse el diseño conjunto actuador-control, como un medio de conseguir mejores prestaciones del robot.

En cuanto a los sistemas de locomoción, aspecto esencial para los robots móviles, las ruedas siguen siendo la opción de mayor futuro, si bien combinadas con algún tipo de soporte articulado, activo o pasivo, para su utilización en terrenos irregulares.

### **Control de movimientos.**

En los últimos años, los robots han constituido una planta excelente para la aplicación y ensayo de numerosas técnicas de control. En este sentido, cabe mencionar el control adaptativo, el control por modos deslizantes, las técnicas de pasividad, el control difuso y el control neuronal, entre otros. Muchos de los sistemas desarrollados han sido probados

## INTRODUCCIÓN

únicamente en simulación y no han sido sometidos aún a una verificación experimental que permita su validación real.

No obstante, diversos fabricantes de robots han incorporado mejoras derivadas de estos desarrollos y puede apreciarse una paulatina mejora en las prestaciones de los sistemas de control, ligada también, evidentemente, a la disponibilidad de micro procesadores más rápidos y potentes. En esta línea, algunos fabricantes han comenzado a incorporar en sus sistemas módulos de compensación dinámica que permiten al robot cargado seguir con precisión trayectorias a velocidad elevada.

La identificación en línea del modelo del robot puede permitir mejorar su comportamiento dinámico y supervisar su funcionamiento en vistas a detectar disfuncionalidades o fallos del sistema.

### **Sensores y percepción.**

La incorporación de sensores a los robots que les permitan obtener información de su entorno e interactuar con él, ha sido mucho más lenta de lo previsto. Sensores como los de tacto que en un momento dado fueron objeto de intensa investigación e, incluso de comercialización en algunos casos, han quedado prácticamente aparcados. No obstante, no parece demasiado arriesgado afirmar que el desarrollo de la robótica futura, tanto de los robots manipuladores como de los robots móviles, pasa en gran parte por la incorporación de nuevos y más eficientes sensores.

En robots manipuladores y, en concreto, para tareas de montaje y mecanizado en las que existe contacto entre la pieza manipulada por el robot y el entorno, la utilización de sensores de fuerza puede tener un incremento apreciable a medio plazo. Esta utilización se verá facilitada por el abaratamiento del coste de los sensores, y la disponibilidad de procesadores para el tratamiento en tiempo real de su información, y de estrategias eficientes de ejecución de esas tareas que hagan uso efectivo de la información de fuerza.

Los sistemas de visión seguirán siendo, en cualquier caso, los más utilizados y los de mayor desarrollo futuro, tanto para los robots manipuladores como para los robots móviles.

aunque para estos últimos los sensores de proximidad y distancia sigan constituyendo un elemento esencial. La iluminación controlada aparece como uno de los factores fundamentales de los sistemas de visión futuros. Aspectos como la posición y tipo de los focos, la utilización de luz estructurada y la explotación de las posibilidades de la longitud de onda y de la polarización serán, sin duda, de gran importancia en dichos sistemas.

Por otro lado, la incidencia de los modelos, especialmente de representación jerárquica, de los programas oportunistas y de la selección automática de dichos modelos de acuerdo con el objetivo perseguido, tendrán una creciente importancia de cara al procesado de la información de las imágenes. Igualmente, los futuros sistemas de visión harán un uso creciente del color, de la información 3D y de las técnicas de visión activa como el seguimiento y el flujo óptico.

Mención especial merecen las técnicas de integración sensorial que tienen como objetivo combinar la información procedente de diversos sensores para construir y actualizar un modelo del entorno en vistas a un objetivo determinado. Estas técnicas han de permitir, por un lado, un uso más eficiente de los sensores disponibles con un incremento de la cantidad y de la calidad de la información obtenida, y, por otro lado, la detección de errores y fallos en algún sensor, y la continuidad del funcionamiento, aunque degradado, del sistema.

### **Programación, planificación y aprendizaje.**

La interfase hombre-máquina y, en concreto, la programación de los robots para la ejecución de las tareas es uno de los temas básicos para la efectiva expansión de los robots en los ambientes industriales.

Uno de los temas recientes de discusión es la necesidad o conveniencia de alcanzar un estándar sobre un lenguaje de programación para robots que pudiese ser convertido por software en el lenguaje específico de cada robot. Sobre este punto, diversos fabricantes han expresado opiniones contrapuestas, pero parece haber un consenso generalizado sobre la necesidad de hacer más fácil, seguro y eficiente para el usuario el desarrollo de aplicaciones robotizadas.

## INTRODUCCIÓN

En esta dirección cumple un papel decisivo la programación fuera de línea, que no ocupa tiempo de trabajo del robot, asistida de la simulación gráfica y de elementos como el posicionamiento relacional que facilita la obtención de posiciones y orientaciones que ha de alcanzar el robot.

La planificación de tareas fue un tema de boga hace unos años que quedó después en un segundo plano debido a la dificultad de realizar planificadores realistas y utilizables en un entorno industrial. En estos momentos, los objetivos son claramente más modestos y la planificación se orienta más como una ayuda a la programación en tareas complejas que como un sistema autónomo. Ejemplos de este enfoque son la planificación de movimientos sin colisión, de la acomodación activa en tareas de montaje con robots y de las curvas de pulido en el acabado de piezas. En todo caso, los planificadores, para ser realistas, deben tener en cuenta la incertidumbre siempre presente en la ejecución de una tarea y la utilización de los sensores disponibles para llevar a cabo la misma.

La programación reactiva y el aprendizaje son otras técnicas prometedoras aunque todavía incipientes en el entorno industrial. La introducción del aprendizaje en el campo de la robótica viene motivado básicamente por la necesidad del robot de adquirir automáticamente los conocimientos necesarios para la realización de determinadas tareas. Esta necesidad es debida, en algunos casos, a la existencia de tareas difíciles de programar pero cuya forma de realización puede ser mostrada fácilmente al robot. Otras veces, el problema es que la información necesaria para programar el robot no es accesible y el robot ha de adquirir ese conocimiento mediante la exploración. Un caso similar se produce en entornos dinámicos en los que el robot ha de ser capaz de tener constantemente actualizado el conocimiento de los mismos.

### **Integración de robots.**

Tal como se ha mencionado en la introducción, el robot industrial es cada vez más un elemento dentro de un sistema automático de producción. En este sentido, adquiere una gran importancia la integración del robot con otros robots y con otras máquinas.

## **INTRODUCCIÓN**

---

En el campo de la cooperación entre robots pueden mencionarse como temas abiertos el reparto de tareas entre los distintos robots, el control combinado fuerza-posición en la manipulación conjunta por parte de varios robots y la evitación de colisiones entre ellos.

La integración de robots en celdas robotizadas pone de manifiesto una serie de problemas hasta ahora resueltos solamente de forma parcial, como son el diseño de la arquitectura de la célula, la comunicación entre máquinas, la simulación del funcionamiento y la programación de la celda.

### **Teleoperación.**

La constatación de la dificultad de programar un robot para operaciones complejas y con capacidad de adaptación a situaciones cambiantes ha hecho resurgir la idea de la teleoperación. En un futuro próximo, la teleoperación asistida en la que el robot es capaz de desarrollar ciertas operaciones ordenadas por el operador sin necesidad de que éste tenga que realizarlas en detalle, y la utilización del retorno sensorial a través del cual el operador experimenta las sensaciones de la tarea, tendrán un desarrollo creciente.

Actualmente estas técnicas están siendo ya aplicadas con éxito en tareas complejas de mantenimiento y en campos de reciente introducción de la robótica, como la construcción.

### **El Robot en la historia de la Tecnología.**

#### **Eras Tecnológicas.**

Se dice que la historia ayuda a entender el presente. La historia de la tecnología está formada por tres periodos principales: Era agrícola, era industrial y era de la información. El desarrollo de los robots se puede ver como lógica e importante parte de la historia.

#### **Eras Agrícola e Industrial.**

A través de la historia la tecnología de cada época ha sido poderosamente influyente en la vida cotidiana de sus sociedades. Los productos y la ocupación han sido dictados por la tecnología disponible, por ejemplo en la era agrícola cuya tecnología era muy primitiva, esta estaba formada por herramientas muy simples que, sin embargo eran lo último en

## INTRODUCCIÓN

tecnología, como consecuencia de ello la mayoría de la gente eran agricultores y todo el trabajo se hacía mediante la fuerza de los hombres y de los animales.

A mediados del siglo XVIII, los molinos de agua, la máquina de vapor y otros transformadores de energía reemplazaron la fuerza humana y animal como fuente principal de energía. Las nuevas máquinas de fabricación impulsaron el crecimiento de la industria y mucha gente pasó a estar empleada en las nuevas fábricas como trabajadores. Los bienes se producían más rápidamente y mejor que antes y la calidad de vida aumentó. Los cambios se sucedieron "un deprimida que a este período se le conoce como "revolución industrial".

### **Era de la Información.**

A continuación, en la mitad del siglo XX surgen las industrias basadas en la ciencia, las mejoras tecnológicas en la electrónica hicieron posible el ordenador. Este constituye el desarrollo más importante, el ordenador revolucionó el modo de procesar y comunicar la información. Como resultado la información se ha convertido en un bien más del mercado y esta nueva era se conoce como la era de la información o "post-industrial".

La tecnología de la información tiene un gran impacto en la sociedad, ordenadores, fibra óptica, radio, televisión y satélites de comunicación son sólo ejemplos de dispositivos que tienen un enorme efecto sobre nuestra vida y economía.

Un gran porcentaje de empleos requieren "trabajadores informáticos" y cada vez menos se necesitan "trabajadores de producción". La tecnología de la información ha sido responsable del espectacular crecimiento de la Robótica, a medida que la era industrial declina se espera que cada vez más trabajo físico sea realizado por robots.

### **¿Cuándo aparecen los robots tal y como los conocemos en la actualidad?**

Androides que posean una funcionalidad completa se encuentran muy alejados de la actualidad debido a la multitud de problemas que aún deben ser resueltos. Sin embargo, algunos robots reales, sofisticados que trabajan hoy en día están revolucionando los lugares de trabajo. Estos robots no tienen la romántica apariencia humana de los androides, de

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## INTRODUCCIÓN

hecho son manipuladores (brazos y manos) industriales controlados por ordenador; son tan diferentes a la imagen popular que sería muy fácil no reconocerlos.

En el año 1956 George Devol and Joseph Engelberger formaron Unimation la primera empresa de robots, los Unimates. Devol predijo que el robot industrial "ayudaría al trabajador de las fábricas del mismo modo en que las máquinas de ofimática habían ayudado al oficinista". Unos años más tarde, en 1961, el primer robot industrial se empleó en la factoría de General Motors en Nueva Jersey. Entonces hubo un "boom" de la idea de la fábrica del futuro, en un primer intento el resultado y la viabilidad económica fueron desastrosos.

Desde 1980, los robots se han expandido por otro tipo de industrias. El principal factor responsable de este crecimiento han sido las mejoras técnicas en los robots debidas al avance en Microelectrónica e Informática. Los Estados Unidos vendieron sus empresas de robots a Europa y Japón o a sus filiales en otros países. En la actualidad sólo una empresa, Adept, permanece en el mercado de producción industrial de robots en EE.UU.

Aunque los robots ocasionen cierto desempleo, también crean puestos de trabajo: Técnicos, comerciales, ingenieros, programadores, etc. Los países que usen eficazmente los robots en sus industrias tendrán una ventaja económica en el mercado mundial.

En el campo de la investigación el primer autómatas (1940.s) lo construye Grey Walter, era una tortuga que buscaba la luz o iba a enchufarse para recargar baterías, también de esa época es la bestia de John Hopkins. Al final de los 60.s Shakey construido por SRI navegaba en entornos de interior de edificios muy estructurados, y al final de los 70.s el Stanford Cart de Moravec se atrevió a salir a "exteriores". A partir de ese momento ha habido una gran proliferación de trabajo en vehículos autónomos que ya circulan a la velocidad de un coche por la carretera y navegan por todo terreno en aplicaciones comerciales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### **Generaciones.**

La introducción de los microprocesadores desde los años 70 ha hecho posible que la tecnología de los robots haya sufrido grandes avances, los modernos ordenadores han ofrecido un "cerebro" a los músculos de los robots mecánicos. Ha sido esta fusión de electrónica y mecánica la que ha hecho posible al moderno robot, los japoneses han acuñado el término "mecatrónica" para describir esta fusión.

El año 1980 fue llamado "primer año de la era robótica" porque la producción de robots industriales aumentó ese año un 80 % respecto del año anterior.

### **Primera y Segunda Generación.**

Los cambios en Robótica se suceden tan deprisa que ya se ha pasado de unos robots relativamente primitivos a principios de los 70, a una segunda generación. La primera generación de robots era reprogramable, de tipo brazo, dispositivos manipuladores que sólo podían memorizar movimientos repetitivos, asistidos por sensores internos que les ayudan a realizar sus movimientos con precisión. La segunda generación de robots entra en escena a finales de los 70, tienen sensores externos (tacto y visión por lo general) que dan al robot información (realimentación) del mundo exterior. Estos robots pueden hacer elecciones limitadas o tomar decisiones y reaccionar ante el entorno de trabajo, se les conoce como robots adaptativos.

### **Tercera Generación.**

La tercera generación acaba de surgir, está surgiendo en estos años, emplean la inteligencia artificial y hacen uso de los ordenadores tan avanzados de los que se puede disponer en la actualidad. Estos ordenadores no sólo trabajan con números, sino que también trabajan con los propios programas, hacen razonamientos lógicos y aprenden. La IA permite a los ordenadores resolver problema inteligentemente e interpretar información compleja procedente de avanzados sensores.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### Tendencias futuras.

Durante años los robots han sido considerados útiles sólo si se empleaban como manipuladores industriales. Recientemente han irrumpido varios roles nuevos para los robots. A diferencia de los tradicionales robots fijos de manipulación y fabricación, estos nuevos robots móviles pueden realizar tareas en un gran número de entornos distintos. A estos robots no industriales se les conoce como **robots de servicios**.

Los robots de servicios proporcionan muchas funciones de utilidad, se emplean para el ocio, la educación, fines de bienestar personal y social. Por ejemplo, hay prototipos que recorren los pasillos de los hospitales y cárceles para servir alimentos, otros navegan en oficinas para repartir el correo a los empleados. Los robots de servicios son idealmente adecuados al trabajo en áreas demasiado peligrosas para la vida humana y a explorar lugares anteriormente prohibidos a los seres humanos. Han probado ser valiosos en situaciones de alto riesgo como en la desactivación de bombas y en entornos contaminados radioactiva y químicamente.

Este crecimiento revolucionario en el empleo de robots como dispositivos prácticos es un indicador de que los robots desempeñarán un importante papel en el futuro. Los robots del futuro podrán relevar al hombre en múltiples tipos de trabajo físico. Joseph Engelberg, padre de la robótica industrial, está investigando en una especie de robot mayordomo o

sirviente doméstico. Se piensa que los robots están en ese momento crítico antes de la explosión del mercado, como lo estuvieron los PC.s en 1975. El campo de la robótica se desbordará cuando los robots sean de dominio público, esta revolución exigirá que la gente de la era de la información no sea "analfabeta robótica".

En palabras de Engelberg: "Robotics is a six billion dollars industry worldwide. Sometime between 2000 and 2010 service robots will exceed industrial robotics in worldwide sales volume." Transition Research Corporation, USA.

## CAPITULO I

### 1.1 EL MARCO TEÓRICO

#### 1.2 DEFINICIONES GENERALES.

##### INTRODUCCION.

Existen ciertas dificultades a la hora de establecer una definición formal de lo que es un robot industrial. La primera de ellas surge de la diferencia conceptual entre el mercado japonés y el euro americano de lo que es un robot y lo que es un manipulador. Así, mientras que para los japoneses un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a la manipulación, el mercado occidental es más restrictivo, exigiendo una mayor complejidad, sobre todo en lo relativo al control.

En segundo lugar, y centrándose ya en el concepto occidental, aunque existe una idea común acerca de lo que es un robot industrial, no es fácil ponerse de acuerdo a la hora de establecer una definición formal. Además, la evolución de la robótica ha ido obligando a diferentes actualizaciones de su definición.

La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la Asociación de Industrias Robóticas (RIA), según la cual:

**DEFINICIÓN 1.1.1** Un **robot industrial** es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

Esta definición, ligeramente modificada, ha sido adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) que define al robot industrial como:

Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Se incluye en esta definición la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad. Una definición más completa es la establecida por la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) que define primero el manipulador y, basándose en dicha definición, el robot:

**DEFINICIÓN 1.1.2 Manipulador:** mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.

**DEFINICIÓN 1.1.3 Robot:** manipulador automático servo controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material.

Por último, la Federación Internacional de Robótica (IFR) distingue entre robot industrial de manipulación y otros robots:

**DEFINICIÓN 1.1.4 Por robot industrial de manipulación** se entiende a una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento. En esta definición se debe entender que la reprogramabilidad y multifunción se consigue sin modificaciones físicas del robot.

Común en todas las definiciones anteriores es la aceptación del robot industrial como un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**DEFINICIÓN 1.1.5** Un sistema robotizado, en cambio, es un concepto más amplio. Engloba todos aquellos dispositivos que realizan tareas de forma automática en sustitución de un ser humano y que pueden incorporar o no a uno o varios robots, siendo esto último lo más frecuente.

**DEFINICIÓN 1.1.6 Clasificación del Robot Industrial.** La maquinaria para la automatización rígida dio paso al robot con el desarrollo de controladores rápidos, basados en el microprocesador, así como un empleo de servos en bucle cerrado, que permiten establecer con exactitud la posición real de los elementos del robot y establecer el error con la posición deseada. Esta evolución ha dado origen a una serie de tipos de robots, que se citan a continuación:

**DEFINICIÓN 1.1.7 Manipuladores**

Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control, que permite gobernar el movimiento de sus elementos, de los siguientes modos:

- \*- **Manual:** Cuando el operario controla directamente la tarea del manipulador.
- \*- **De secuencia fija:** cuando se repite, de forma invariable, el proceso de trabajo preparado previamente.
- \*- **De secuencia variable:** Se pueden alterar algunas características de los ciclos de trabajo.

Existen muchas operaciones básicas que pueden ser realizadas óptimamente mediante manipuladores, por lo que se debe considerar seriamente el empleo de estos dispositivos, cuando las funciones de trabajo sean sencillas y repetitivas.

**DEFINICIÓN 1.1.8 Robots de repetición o aprendizaje.** Son manipuladores que se limitan a repetir una secuencia de movimientos, previamente ejecutada por un operador humano, haciendo uso de un controlador manual o un dispositivo auxiliar. En este tipo de robots, el operario en la fase de enseñanza, se vale de una pistola de programación con diversos pulsadores o teclas, o bien, de joystics, o bien utiliza un maniquí, o a veces, desplaza directamente la mano del robot. Los robots de aprendizaje son los más conocidos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

hoy día, en los ambientes industriales y el tipo de programación que incorporan, recibe el nombre de "gestual".

**DEFINICIÓN 1.1.9 Robots con control por computador.** Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales, controlados por un computador, que habitualmente suele ser un microordenador.

En este tipo de robots, el programador no necesita mover realmente el elemento de la máquina, cuando la prepara para realizar un trabajo. El control por computador dispone de un lenguaje específico, compuesto por varias instrucciones adaptadas al robot, con las que se puede confeccionar un programa de aplicación utilizando solo el terminal del computador, no el brazo. A esta programación se le denomina textual y se crea sin la intervención del manipulador.

Las grandes ventajas que ofrecen este tipo de robots, hacen que se vayan imponiendo en el mercado rápidamente, lo que exige la preparación urgente de personal calificado, capaz de desarrollar programas similares a los de tipo informático.

**DEFINICIÓN 1.1.10 Robots inteligentes.** Son similares a los del grupo anterior, pero, además, son capaces de relacionarse con el mundo que les rodea a través de sensores y tomar decisiones en tiempo real (auto programable).

De momento, son muy poco conocidos en el mercado y se encuentran en fase experimental, en la que se esfuerzan los grupos investigadores por potenciarles y hacerles más efectivos, al mismo tiempo que más asequibles.

La visión artificial, el sonido de máquina y la inteligencia artificial, son las ciencias que más estén estudiando para su aplicación en los robots inteligentes.

**DEFINICIÓN 1.1.11 Micro-robots.** Con fines educacionales, de entretenimiento o investigación, existen numerosos robots de formación o micro-robots a un precio muy asequible y, cuya estructura y funcionamiento son similares a los de aplicación industrial.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **Clasificación de los robots según la AFRI (AFRI) Asociación Francesa de Robótica Industrial**

**Tipo A.** Manipulador con control manual o telemando

**Tipo B.** Manipulador automático con ciclos preajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.

**Tipo C.** Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.

**Tipo D.** Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

La **IFR** distingue entre cuatro tipos de robots:

- \*-Robot secuencial
- \*-Robot de trayectoria controlable
- \*-Robot adaptativo
- \*-Robot tele manipulado

### **Clasificación de los robots industriales en generaciones**

**1 Generación** Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.

**2 Generación** Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.

**3 Generación** Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee la capacidad para la planificación automática de sus tareas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Clasificación de los robots según T.M.Cancel**

<b>Clasificación de los robots según T.M.Cancel</b>				
<b>Generación</b>	<b>Nombre</b>	<b>Tipo de Control</b>	<b>Grado de movilidad</b>	<b>Usos mas frecuentes</b>
(1982)	Pick & place	Fines de carrera, aprendizaje	Ninguno	Manipulación, servicio de maquinas
(1984)	Servo	Servocontrol, Trayectoria continua, progr. condicional	Desplazamiento por vía	Soldadura, pintura
(1989)	Ensamblado	Servos de precisión, visión, tacto	Guiado por vía	Ensamblado, Desbardado
(2000)	Móvil	Sensores inteligentes	Patatas, Ruedas	Construcción, Mantenimiento
(2010)	Especiales	Controlados con técnicas de IA	Andante, Saltarín Militar, Espacial	

Por último y con el fin de dar una visión del posible futuro, se presentaron en forma clasificada, gran parte de los diversos tipos de robots que se puedan encontrar hoy en día. Todos los robots representados existen en la actualidad, aunque los casos futuristas están en estado de desarrollo en los centros de investigación de robótica

**DEFINICIÓN 1.1.12** La palabra "Robot" proviene del checo "robota" que significa "trabajo duro", forzado o servil, el de los siervos de la gleba, mientras que en otras lenguas eslavas solamente significa "trabajo".



**Figura 1.1 Carro robot.**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**DEFINICIÓN 1.1.13** Los robots son dispositivos compuestos de sensores que reciben datos de entrada (input) y que pueden estar conectados a la computadora. Ésta, al recibir la información de entrada, ordena al robot que efectúe una determinada acción (output). Puede ser que los propios robots dispongan de microprocesadores que reciban el input de los sensores y que estos microprocesadores ordenen al robot la ejecución de acciones para las cuales está concebido. En este último caso, el propio robot es, a su vez, una computadora.

Los robots ya están entre nosotros y no se trata de ciencia ficción. Están presentes en las actividades industriales, en la investigación, en la actividad espacial y también en la educación, sustituyen al hombre en las tareas repetitivas, en los trabajos cansados y peligrosos. Su utilización permite reducir los costos de producción, hace que sean posibles actividades que antes no podían ni imaginarse y aumenta la competitividad de los procesos.

La palabra **Robot** la acuñó en 1917, Karel Capek a través de su obra de teatro titulada RUR (Los robots universales de Rossum). En la obra aparecían una serie de seres artificiales con apariencia humana que respondían a las órdenes de su maestro y desempeñaban los trabajos duros.

En 1950 Isaac Asimov toma el tema y escribe su famosísimo "Yo robot". En su obra aparecen diferentes figuras antropomorfas, capaces de moverse, de ejecutar operaciones, de hablar e incluso de emocionarse.

Salvo en el cine, la apariencia real de los robots empleados en la industria para la realización de tareas repetitivas en poco o en nada se parecen al hombre.

La mayoría de las veces estas máquinas consisten en un brazo mecánico que puede llevar a cabo todos los movimientos en todas las posiciones y en una mano que sirve para tomar o dejar objetos, pero con una frecuencia cada vez mayor.



**Figura 1.2** Tipos de brazos mecánicos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

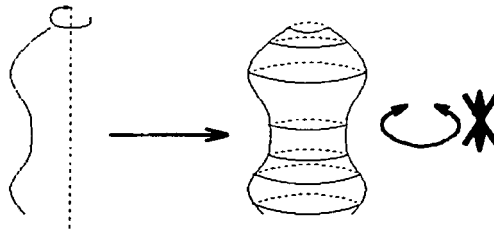


A los robots se les está dotando de órganos sensoriales que les permiten tener vista y tacto, o el uso de la palabra. Una característica de los robots industriales es la de ser idóneos para muchos usos, con la capacidad de memorizar sus tareas y aprender otras nuevas. Esto supone la existencia, junto a una estructura mecánica, de otra electrónica basada en un microprocesador y una memoria, es decir, un auténtico miniordenador.

Hoy en día la robótica constituye una ciencia aplicada compleja, que merece la mayor atención. Omitir la enseñanza de sus principios sería perjudicial y contradictorio frente a las exigencias de una sociedad que quiere desarrollarse.

### 1.3 PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG

En este tratamiento, un brazo de robot es asumido a un consistente número de elementos rígidos (eslabones), los cuales son pares inteligentes conectados a otros por medio de uniones. Considerando dos eslabones adyacentes, sólo es permitido en las uniones donde el equipo de los puntos de contacto es comprendido en una superficie. Este tipo de uniones son llamadas pares inferiores (como un ejemplo considere una bola rodando sobre una mesa, ambos, "eslabones" son rígidos, pero sus contactos son solo un simple punto). Mas adelante restringiremos nuestra atención a las siguientes dos juntas.

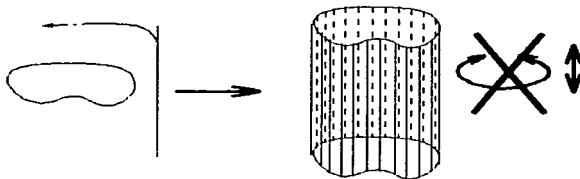


**Figura 1.3 Representación de junta de revolución**

*La junta de revolución*, donde la superficie de contacto es una superficie de revolución, una superficie de revolución es obtenida por la definición en una curva planar arbitraria (el

perfil) y un eje de rotación ( en el plano de la curva). La superficie en el espacio barrido por la curva durante una revolución completa alrededor del eje de rotación y es una superficie de revolución. Si componemos el primero de los dos eslabones, la junta de revolución permite rotación del segundo eslabón alrededor del eje de rotación.

*La junta prismática*, donde la superficie de contacto es un cilindro general. Un cilindro general es la superficie barrida por una línea ( la generatriz), la cual se mueve a lo largo de los límites de una curva cerrada sin cambiar esta orientación. La junta prismática permite un deslizamiento del segundo eslabón en la dirección de la línea.



**Figura 1.4**  
**Representación de**  
**junta prismática**

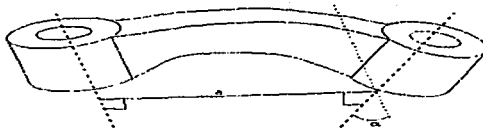
Note que un cilindro circular tiene ambas, una superficie de revolución y una cilíndrica, de esta manera permite ambos movimientos. En adelante no se consideraran tales juntas.

En orden para describir un brazo de robot, es suficiente describir cada uno de los eslabones y de las juntas.

### 1.3.1 QUE NECESITAMOS PARA DESCRIBIR UN ESLABÓN.

Primero considerar un eslabón con dos juntas de revolución en cada lado. Como sabemos, ambas juntas tienen ejes de rotación. Llamamos el largo de las líneas más cortas conectando los dos ejes de rotación a lo largo del eslabón  $a$ . La línea más corta es perpendicular a ambos ejes ( si  $a$  es más grande que 0 ). Esto es por que también es llamado normal común. Ahora podemos mover el primer eje a lo largo de esta línea (sin cambiar

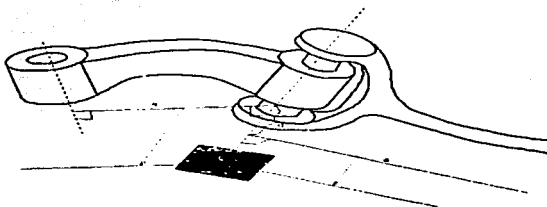
esta orientación) hasta que ambas rotaciones de los ejes se unan. El ángulo encerrado por los dos ejes es llamado el eslabón del ángulo girado  $\alpha$ .



**Figura 1.5 Representación de un eslabón con dos juntas de revolución en cada lado.**

Si alguna de ambas uniones es prismática, no existe única definición del eje de rotación en su lugar, podemos usar cualquier línea paralela a la generatriz de la superficie de contacto. Podemos siempre elegir líneas encontradas una con otra, además la posición de  $a$  (el largo del eslabón) a cero y midiendo solo  $\alpha$ .

### 1.3.2 AHORA DESCRIBIMOS UNA JUNTA.



**Figura 1.6 Descripción una junta**

Ya definida la normal común de un eslabón. La distancia entre dos normales comunes de dos eslabones adyacentes a lo largo de los ejes de las juntas es llamada la distancia entre los eslabones  $d$ . Esta distancia será variable para un ajunta prismática. Si hace una proyección paralela de la normal común hasta el plano normal del eje de la junta y medido el ángulo

entre la proyección de la normal común, obtenemos el ángulo entre los eslabones  $teta$ . La cual es la variable en una junta de revolución.

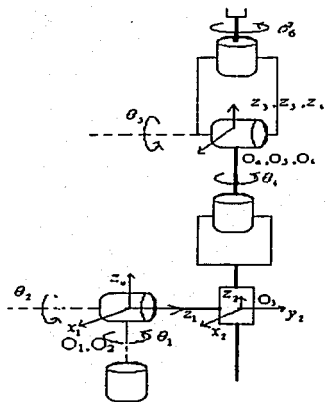
Para describir un brazo completo, consideramos la base del robot como el eslabón 0 y asociada cada junta con uno de los eslabones adyacentes, tal que el número de juntas  $n$  es seguido por el número de eslabones  $n$  ( además no hay junta 0 y la "mano" es actualmente el último eslabón).

Denavit-Hartenberg derivaron un matemático marco de trabajo, utilizando transformadas de coordenadas homogéneas, donde tu insertas parámetros descritos anteriormente y obtienes la posición de la mano en el sistema de coordenadas de la base. La simplicidad ( aunque no probablemente concebible por un común maestro de inglés) es dibujado desde una simple aplicación sucesiva para obtener la descripción de un punto del sistema de coordenadas del eslabón  $n$  en las coordenadas del eslabón  $(n-1)$ . Para conseguir la posición final del efector transformamos el origen del último sistema de coordenadas en las coordenadas antes del último eslabón. Esto es transformado hasta conseguir la posición en la base del sistema de coordenadas.

### 1.3.3 APARTIR DE LA CINEMÁTICA.

La cinemática es usada para describir la posición estática y orientación de los enlaces del manipulador. Hay dos diferentes formas de expresar la posición de cualquier eslabón. Usando el espacio *cartesiano*, el cual consiste de la posición  $(x,y,z)$ , y orientación, la cual puede ser representada por una matriz de  $3 \times 3$  llamada matriz de rotación, o usando el espacio de la junta, para representar la posición por los ángulos de los eslabones del manipulador. La aplicación de la cinemática es la transformación desde el espacio de la unión hasta el espacio cartesiano. Esta transformación depende de la configuración del robot ( i.e., largo del eslabón, posición de las juntas, tipo de cada unión, etc.) en orden para describir la locación de cada eslabón relativo a este próximo, el cuadro prendido a cada eslabón, entonces se especifica un conjunto de parámetros que caracteriza este cuadro. Esta representación es llamada *notación de Denavit-Hartenberg*.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura 1.7 Representación física de un manipulador con seis eslabones.**

La figura muestra físicamente seis eslabones de un robot manipulador.

Los parámetros de Denavit-Hartenberg son:

$a_i$  distancia a lo largo de  $x_{i-1}$  desde  $O_{i-1}$  hasta la intersección de los ejes  $x_i$  y  $z_{i-1}$ .

$d_i$  distancia a lo largo de  $z_{i-1}$  desde  $O_{i-1}$  hasta la intersección de los ejes  $x_i$  y  $z_{i-1}$ .

$\alpha_i$  el ángulo entre  $z_{i-1}$  y  $z_i$  medidos desde  $x_i$ .

$\theta_i$  el ángulo entre  $x_{i-1}$  y  $x_i$  medidos desde  $z_{i-1}$ .  $\theta_i$  es variable si la junta  $i$  es de revolución.

Los parámetros de Denavit – Hartenberg para nuestro prototipo de robot son mostrados en la siguiente tabla. Los parámetros para los últimos tres eslabones son constantes con excepción de 0, las juntas variables y  $d_6$  el parámetro exterior el cual representa la distancia externa entre  $O_3$  y el centro de la muñeca O.  $a_4$   $a_5$  y  $a_6$  son ceros por que la distancia a lo largo de  $x_1$  desde  $O_1$  hasta la intersección de  $x_4$  y  $z_4 - 1$  es cero.

Link	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$a_1$	$\alpha_1$	$d_1$	$\theta_1$
2	$a_2$	$\alpha_2$	$d_2$	$\theta_2$
3	$a_3$	$\alpha_3$	$d_3$	$\theta_3$
4	0	-90	0	$\theta_4$
5	0	+90	0	$\theta_5$
6	0	0	$d_6$	$\theta_6$

Tabla 1: Parámetros simbólicos D-H para el robot.

La correspondiente matriz de transformación es:

$$A_0^6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad [1.1]$$

donde:

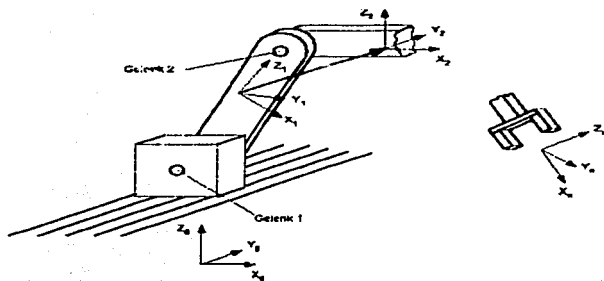
$$A_i = Rot_{z, \alpha_i}; Trans_{x, a_i}; Trans_{z, d_i}; Rot_{x, \theta_i} \quad [1.2]$$

$$A_i = \begin{bmatrix} c(\theta_i) & Ts(\theta_i)c(l_i) & s(\theta_i)s(l_i) & a_i c(\theta_i) \\ s(\theta_i) & c(\theta_i)c(l_i) & Tc(\theta_i)s(l_i) & a_i s(\theta_i) \\ 0 & s(l_i) & c(l_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.3]$$

### 1.3.4 APLICACIÓN DENAVIT-HARTENBERG A UN CUERPO.

El orden para encontrar una transformación desde la punta de la herramienta hasta la base de un manipulador, hemos definido el marco del eslabón y derivado una técnica sistemática, la cual permite describir la cinemática de un robot con n grados de libertad de una única forma. El conjunto de  $4 \times n$  parámetros será suficiente para el propósito.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura 1.8** Eslabones de una cadena cinemática

La figura anterior presenta el primer eslabón de la cadena cinemática. La base y cada eslabón  $i$  de la cadena es asignado a un marco específico  $K_i$ , el cual es compuesto al eslabón. De esta forma la posición y orientación de un marco del eslabón cambia con respecto al próximo comportamiento del marco del eslabón con respecto al movimiento de las juntas de conexión. Así el marco coordinado  $K_i$  puede ser descrito desde el precedente marco del eslabón  $K_{i-1}$  por principio de una transformación homogénea. Esta transformación homogénea incluye el ángulo de la junta (para juntas rotacionarias) o juntas exteriores (para juntas prismáticas).

Finalmente el marco de herramienta  $K_n$  puede ser transformada al marco de la base por la multiplicación de todas las transformaciones del eslabón a través de la cadena cinemática.

De esta forma el orden para transformar cualquier posición / orientación relativo al sistema de la herramienta (e.g. por sensores sujetos en ese lugar) hacia los manipuladores del sistema de la base (e.g. donde es sujetado al piso), la clasificación de la secuencia de transformaciones homogéneas desde la punta al pie  $K_{n-1}$ ,  $K_{n-2}$ , ...,  $K_0$  tiende a ser procesado. La tarea es completar todas las matrices de transformación homogénea para un tipo particular de cadena cinemática, considerando atributos geométricos del eslabón arreglos y tipos de juntas.

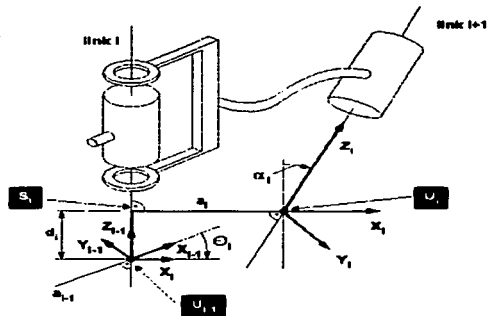


Figura 1.9 Asignación de parámetros D-H.

La figura anterior muestra un detalle de una cadena cinemática, donde dos eslabones son conectados con mediante una junta rotatoria. Esto es usado para mostrar, como parámetros invariantes son obtenidos para describir un eslabón.

Los ejes de rotación para el eslabón  $i$  e  $i+1$  son extendidos hacia delante en líneas rectas  $G_i$ ,  $G_{i+1}$  tienen en común una línea normal  $a_i$ , es definido como el origen del sistema del eslabón  $K_i$ . Además sobre la base del vector  $x_i$  es definido como extensión de una línea normal, como la base del vector  $z_i$  del sistema del eslabón es asumida a ser determinado por una línea recta  $G_i$  y de esa forma describir los ejes de rotación para el eslabón  $i+1$ , ahora dando los vectores  $x_i$  y  $z_i$  permaneciendo la base del vector de este sistema  $y_i$  es seleccionada apropiadamente en orden para crear un correcto manejo del sistema de coordenadas.

Permitiendo asumir, que la misma operación ha sido hecha conduciendo a los eslabones precedentes, en este caso, el sistema de coordenadas  $K_{i-1}$  es determinado con este origen  $U_{i-1}$  localizado sobre la línea recta  $G_i$ .



Ahora somos capaces de derivar algunos parámetros necesarios para la descripción del eslabón. Parámetros  $a_i$  ya introducidos, además del segundo parámetro característico  $d_i$  es definido aquí como una distancia entre el origen  $U_{i-1}$  del sistema  $i-1$  y la intersección  $S_i$  de la línea normal  $a_i$  ( pero este tiempo) con línea recta  $G_i$ .

Obviamente el origen del sistema  $i$  es localizado en el plano, el cual es extendido por el par de juntas de rotación en los vectores  $z_{i-1}$  y  $z_i$ .

Para el eslabón  $i$ , la rotación de este cuerpo rígido  $i$  ( con respecto al cuerpo  $i-1$ ) es dada por el ángulo de rotación  $\theta_i$ . En otras palabras, el ángulo  $\theta_i$  es localizado entre el eje  $x_{i-1}$  y el eje  $x_i$ .

Para las juntas de revolución, parámetros de la junta  $d_i$ ,  $\alpha_i$  y  $a_i$  son constantes. Ellos dependen del diseño de las juntas solo si no es incluido algún movimiento en la junta. La única variante paramétrica para juntas de revolución es el ángulo  $\theta_i$ , el cual describe la posición variable de la junta.

La situación es diferente para juntas prismáticas. Aquí los parámetros  $d_i$  llega a ser variable y describe la posición de la junta traslacional, donde los parámetros  $\theta_i$ ,  $a_i$  y  $\alpha_i$  dependen solo del diseño de la junta.

De cualquier forma, una junta prismática y de revolución pueden ser completamente descritas con solo 4 parámetros.

- $a_i$  largo de la línea normal  $S_i$ ,  $U_i$
- $\alpha_i$  Angulo entre  $z_{i-1}$  y  $z_i$
- $d_i$  largo de la línea  $U_{i-1}$ ,  $S_i$
- $\theta_i$  ángulo entre  $x_{i-1}$  y  $x_i$

Una transformación homogénea  ${}^{i-1}T_i$  trazando el sistema  $K_i$  hacia  $K_{i-1}$  mediante el eslabón actual, puede ser derivado ahora desde la siguiente transformación geométrica mediante las consideraciones del eslabón.

1. rotación alrededor  $z_{i-1}$  con ángulo  $\theta_i$
2. traslación a lo largo  $z_{i-1}$  con desplazamiento  $d_i$
3. traslación a lo largo  $x_{i-1}$  con desplazamiento  $a_i$
4. rotación alrededor  $x_i$  con ángulo  $\alpha_i$

O en una descripción más formal con la ayuda de matrices de transformación homogénea para cada de 4 acciones mencionadas anteriormente.

$${}^{i-1}T_i := \begin{pmatrix} c\theta_i c\phi_i & -\sin\theta_i c\phi_i & 0 & 0 \\ s\theta_i c\phi_i & c\theta_i c\phi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [1.4]$$

Aparentemente las transformaciones homogéneas del eslabón  ${}^{i-1}T_i$  llegan a ser especialmente simples, si el parámetro angular  $\alpha_i$  es puesto a algunos valores específicos, los cuales son multiplicidad de  $\pm \pi/2$ . Como el parámetro  $\alpha_i$  es siempre constante, no afecta el medio a una junta prismática o de revolución considerada, simplificando la transformación del eslabón puede ser hecha a través de la construcción de la junta. Desde el punto de vista físico,  $\alpha_i$  llega a ser una multiplicidad de  $\pm \pi/2$ , si los ejes cercanos son paralelos o perpendiculares a cada uno de los otros.

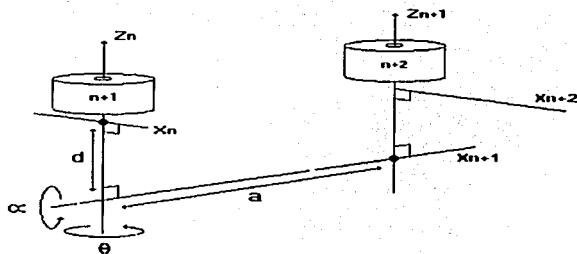
De hecho, cada vez más de los robots industriales son diseñados de acuerdo a estas consideraciones. Observando estas reglas de construcción no son formas restringidas en cualquier demanda práctica sobre el robot. De tal modo algunos cálculos necesarios son facilitados por el controlador del robot. Por ejemplo transformaciones de una tarea cartesiana, descripciones del movimiento de interpolación de la junta, y viceversa.

Una demanda más práctica del diseño del robot ha sido aquí mencionada.

Hay una postura del brazo del robot (de esta cadena cinemática abierta), donde todas las juntas están en posición cero. Esta misma postura es llamada posición cero del brazo. Usualmente esta es una posición de referencia para medidas de la posición de la junta por sensores internos. De esta forma la postura debería ser físicamente accesible para el robot.

### 1.3.5 REPRESENTACIÓN DE DENAVIT-HARTENBERG.

La representación de Denavit-Hartenberg ha llegado a ser una forma común de representar robots y modelar sus movimientos. El método comienza con un sistema aproximado a la asignación y nivelando un sistema de coordenadas ortogonal ( $x, y, z$ ) para cada junta del robot. Es entonces posible contar una junta con el próximo y último ensamble para completar la representación de la geometría del robot. La figura muestra el segundo paso, que describe las transformaciones necesarias para relacionar una junta con la próxima.



**Figura 1.10**  
Descripción de las transformaciones para dos juntas

Los orígenes del sistema de coordenadas al eslabón  $n+1$  y eslabón  $n+2$  están marcados con un punto negro en la figura. Cuatro transformaciones en un específico orden traerán estos sistemas coincidentes uno con cada otro. Por definición, los ejes de coordenadas  $Z_n$  cruzan sin embargo el eslabón  $n+1$ , en breve:

1. Una rotación  $\theta_{n+1}$  acerca del eje  $Z_n$  trae a  $X_n$  paralelo con  $X_{n+1}$ ;
2. Una traslación  $d_{n+1}$  a lo largo del eje  $Z_n$  hace al eje  $x$  colineal;
3. Una traslación  $a_{n+1}$  a lo largo del eje  $X$  hace al eje  $z$  coincidente, y;
4. Una rotación  $\alpha_{n+1}$  acerca del  $X_n$  trae a  $Z_n$  paralelo con  $Z_{n+1}$ ;

En esto se puede notar que cualquiera de estos valores pueden ser, y a menudo son, igual a cero.

Juntas, estas cuatro transformaciones en el orden anterior conducen a una única matriz de transformación homogénea con cuatro variables representando la relación entre estos dos eslabones.

#### 1.4 MODELACIÓN CINEMÁTICA DE UN SISTEMA MECÁNICO DE CADENA ABIERTA.[4]

El multicuerpo a analizar, en esta parte, es una cadena cinemática abierta formada por tres cuerpos rígidos acoplados por medio de juntas rotacionales y su plano de acción es el plano XZ.

El problema consiste en construir las ecuaciones que gobiernan la cinemática de la cadena mostrada en la siguiente figura, el extremo final del tercer eslabón, está obligado, en este caso, a seguir una trayectoria específica descrita en el plano XZ, con el fin de colocar una herramienta de trabajo que simule una operación de un proceso terminado.

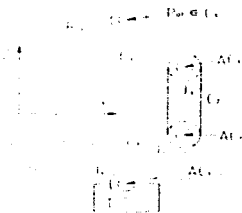


Figura 1.11 Caracterización del robot.

Consideremos el multicuerpo ( $R_0$ ) mostrado en la figura.1, observemos que  $R_0$  puede ser representado por:

$$R_0 = C_1 \cup C_2 \cup C_3$$

[1.5]

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El multicuerpo está montado en el cuerpo  $T$ , mostrado en la figura.1, al cual llamaremos la tierra del sistema. Llamaremos la junta del sistema denotada por  $J_1$  al conjunto de puntos dados por la intersección siguiente:

$$J_1 = T \cup C_1 \quad [1.6]$$

En la tierra se montará un actuador, al cual llamaremos  $AC_1$ , el cual se acoplará al cuerpo  $C_1$  a través de la junta  $J_1$  y del eje del actuador. La junta que conecta al cuerpo  $C_1$  con el cuerpo  $C_2$  se define como:

$$J_2 = C_1 \cap C_2 \quad [1.7]$$

En esta parte del cuerpo se localiza un segundo actuador al cual llamaremos  $AC_2$  y está acoplado a los cuerpos  $C_1$  y  $C_2$  a través de la juntura  $J_2$ .

En esta parte del cuerpo se localiza un segundo actuador al cual llamaremos  $AC_3$  y está acoplado a los cuerpos  $C_1$  y  $C_2$  a través de la juntura  $J_2$ .

Por lo tanto la junta que conecta al cuerpo  $C_2$  con el cuerpo  $C_3$  se define como:

$$J_3 = C_2 \cap C_3 \quad [1.8]$$

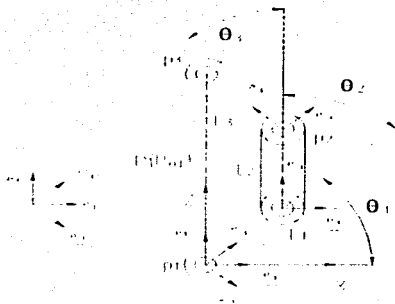
De igual forma en esta parte del cuerpo se localiza un tercer actuador al cual llamaremos  $AC_3$  y está acoplado a los cuerpos  $C_2$  y  $C_3$  a través de la junta  $J_3$ . En este trabajo el multicuerpo  $R_0$  se considerará formado de la siguiente manera.

$$R_0 = C_3 \cup J_3 \cup AC_3 \cup C_2 \cup J_2 \cup AC_2 \cup C_1 \cup J_1 \cup AC_1 \cap T \quad [1.9]$$

Sobre la junta  $J_1$  se define un sistema cartesiano inercial, también sobre el eje  $C_1$  se define un sistema local y sobre la junta  $J_2$ , de igual forma sobre la junta  $J_3$  se define el sistema de referencia del cuerpo  $C_3$ . Los sistemas de referencia asociados a los cuerpos  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , serán llamados en este trabajo las bases móviles y están fijas en los cuerpos  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ . Las longitudes de los cuerpos  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  serán denotadas por  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  según se muestra en la siguiente figura. Por tanto los vectores de posición que unen el centro de la junta  $J_1$

con la junta  $J_2$  y el de la junta  $J_2$  con el centro del ajunta  $J_3$  y de la junta  $J_3$  al punto  $Pot \in C_3$  mostrado en la siguiente figura al cual llamaremos punto final de  $Ro$  están definidos con respecto a las bases locales. Esto es:

$$L_1 = l_1 e_1^i, L_2 = l_2 e_2^j, L_3 = l_3 e_3^k \quad [1.10]$$



**Figura 1.12**  
**Configuración no**  
**deformada de  $Ro$ .**

Observemos que dichos vectores,  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  al fijar los puntos  $p_1 \in J_1$ ,  $p_2 \in J_2$ ,  $p_3 \in J_3$ ,  $Pot \in C_3$  pueden ser también expresados mediante la siguiente diferencia de puntos: Observemos que dichos vectores

$$L_1 = p_2 - p_1, L_2 = p_3 - p_2, L_3 = Pot - p_3 \quad [1.11]$$

También el vector de posición de  $Pot \in C_3$  puede ser expresado como:

$$Ro(Pot) = Pot - p_1 \quad [1.12]$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El vector  $R(P, O) \in \mathcal{R}^3$  es representado a través de la siguiente ecuación:

$$R(P, O) = L_1 + L_2 + L_3 \quad [1.13]$$

#### 1.4.1 ANÁLISIS EN LA CONFIGURACIÓN NO DEFORMADA DE $R_0$ .

Consideremos que el multicuerpo  $R_0$  ocupa la posición mostrada en la figura anterior. Entonces, el vector de posición de  $P, O \in C_3$  esta dada por:

$$R(P, O) = l_1 e_1^* + l_2 e_2^* + l_3 e_3^* \quad [1.4]$$

donde  $l_1, l_2, y l_3 \in \mathcal{R}^1$  y  $e_1^*, e_2^*, e_3^* \in \mathcal{R}^3$

son las bases móviles asociadas con las juntas de nuestro robot en estudio.

En este trabajo consideremos que las bases móviles son rotacionales rígidas de la base inercial fija, de acuerdo a [4], tales rotaciones pueden expresarse, en el caso de cuaterniones unitarios por:

$$e_1^* = \rho(p, e_1) = p * e_1 * p \quad [1.15]$$

$$e_2^* = \rho(q, \rho(p, e_1)) = (q * p) * e_1 (q * p) \quad [1.16]$$

$$e_3^* = \rho(I, \rho(q, \rho(p, e_1))) = I * q * p * e_1 * p * I = q * p * e_1 * p * q \quad [1.17]$$

Donde  $\rho(p, \bullet) : Q \rightarrow Q$ ,  $p \in Q$ . Basándose en las expresiones anteriores puede ser escrita la ecuación de la siguiente forma.

$$R(p, q) = I_1 (p * e_1 * p) + I_2 ((q * p) * e_1 * (q * p)) + I_3 (I * q * p * e_1 * p * q * I) \quad [1.18]$$

También considerando las normas unitarias de los cuaterniones. Esto es.

$$\|p\| = \|q\| = \|I\| = 1 \quad [1.19]$$

Obtenemos las ecuaciones que gobiernan la configuración no deformada de  $R_0$ . Las componentes de los cuaterniones asociados  $p, q \in \mathfrak{H}^4$  son definidas por:

$$\begin{aligned} p \in \mathfrak{H}^4; p &= (p_u, p_v), p_u \in \mathfrak{R}; p_v = \pm \cos \frac{\theta_1}{2} & [1.20] \\ p_v &= \pm \sin \frac{\theta_1}{2} e_2 \\ q \in \mathfrak{H}^4; q &= (q_u, q_v), q_u \in \mathfrak{R}; q_v = \pm \cos \frac{\theta_2}{2} \\ q_v &= \pm \sin \frac{\theta_2}{2} e_2 \\ I \in \mathfrak{H}^4; I &= (I_u, I_v), I_u \in \mathfrak{R}; I_v = \pm \cos \frac{\theta_3}{2} \\ I_v &= \pm \sin \frac{\theta_3}{2} e_2 \end{aligned}$$

#### 1.4.2 PLANTEAMIENTO DE LOS PROBLEMAS CINEMÁTICOS DIRECTO E INVERSO.

En esta parte definiremos dos problemas asociados al multicuerpo en estudio. El primero de ellos, será el problema de la cinemática directa y el segundo corresponde a la cinemática inversa. Tales problemas están asociados a la posición mostrada en la figura siguiente, la cual, será para nosotros la configuración no deformada. Consideremos entonces el siguiente problema.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 1.4.3 PROBLEMA CINEMÁTICO DIRECTO.

Dados  $p = (p_0, 0, p_2, 0)$ ,  $q = (q_0, 0, q_2, 0)$ ,  $l = (l_0, 0, l_2, 0)$  con  $\|p\| = \|q\| = \|l\| = 1$  y  $l_1 \in \mathcal{R}^+$ ,  $l_2 \in \mathcal{R}^+$ ,  $l_3 \in \mathcal{R}^+$ , encuentre  $R(Pot) \in \mathcal{R}^2$  tal que (2.4.11) sea satisfecha.

Presentaremos ahora en esta parte el problema inverso de la cinemática de cuerpos rígidos para el cuerpo en estudio. Esto es:

Dado  $R(Pot) \in \mathcal{R}^2$  y  $l_1 \in \mathcal{R}^+$ ,  $l_2 \in \mathcal{R}^+$ ,  $l_3 \in \mathcal{R}^+$ , encuentre  $p = (p_0, 0, p_2, 0)$ ,  $q = (q_0, 0, q_2, 0)$ ,  $l = (l_0, 0, l_2, 0)$  tal que (2.4.11) sea satisfecha y:

$$p_0^2 + p_2^2 = 1 \quad [1.21]$$

$$q_0^2 + q_2^2 = 1$$

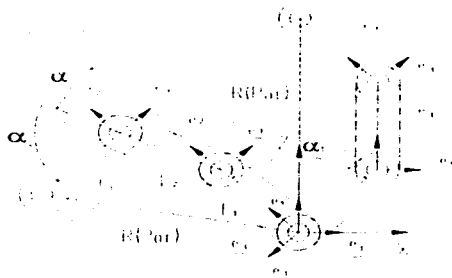
$$l_0^2 + l_2^2 = 1$$

El problema de la cinemática inversa genera 4 ecuaciones algebraicas no lineales con 4 incógnitas del tipo polinomial.

### 1.4.4 ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN DEFORMADA DE $R_0$ .

En esta parte se supone que el robot ( $R_0$ ) ha sido movido de su posición inicial (configuración no deformada) a través de accionamientos de los actuadores  $AC_1$ ,  $AC_2$ ,  $AC_3$  ver figura. El problema ahora consiste en determinar el lugar geométrico que ocupa el extremo final del multicuerpo. La configuración así obtenida se denominará configuración deformada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura 1.13 Configuración deformada de  $R_0$**

Observemos que el vector de posición  $\underline{R}(Pot)''$  correspondiente a la configuración deformada es expresado de la forma siguiente:

$$\underline{R}(Pot)'' = L_1' + L_2' + L_3' \quad [1.22]$$

Los vectores de posición  $L_1, L_2, L_3$  serán para nosotros los vectores deformados los cuales también pueden ser escritos en términos de las bases locales, esto es:

$L_1' = l_1 \cdot \underline{a}_1', L_2' = l_2 \cdot \underline{a}_2', L_3' = l_3 \cdot \underline{a}_3'$ . Las bases  $\underline{a}_1', \underline{a}_2', \underline{a}_3'$  serán para nosotros las bases móviles deformadas. En términos de cuaterniones las bases deformadas se expresan de la forma siguiente.

$$\begin{aligned} a_1' &= \rho(P, e_1') = P * \rho * e_1 * P^{-1} \rho \\ a_2' &= \rho(Q, \rho(P, e_2')) = Q * P * q * \rho * e_2 * (Q * P * q * \rho) \\ a_3' &= \rho(I, \rho(Q, \rho(P, e_3''))) = I * Q * q * \rho * e_3 * (I * Q * P * q * \rho) \end{aligned} \quad [1.23]$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

basándose en (2.4.11) el vector de posición  $R(\text{pot}) \in \mathfrak{R}^2$  puede ser representado de la siguiente forma:

$$R(\text{pot}) = I_1 (P^* p^* e_1 + P^* p) + I_2 (Q^* P^* q^* p^* e_1 (Q^* P^* q^* p)) + I_3 (I^* Q^* P^* q^* p^* e_1 + (I^* Q^* P^* q^* p)) \quad [1.24]$$

también considerando las normas unitarias de los quaterniones  $P, Q, I \in \mathfrak{H}^1$ , esto es:

$$\|P\| = \|Q\| = \|I\| = 1 \quad [1.25]$$

De esta forma obtenemos las ecuaciones que gobiernan la configuración deformada del multicuerpo en estudio

Al igual que en (1.13) los componentes de los quaterniones  $P, Q, I \in \mathfrak{H}^1$  son:

$$\begin{aligned}
 P \in \mathfrak{H}^1: P &= (P_u, P_v), P_u \in \mathfrak{R}: P_u = \pm \text{Cox} \frac{\alpha_1}{2} & [1.26] \\
 P_v \in \mathfrak{R}^3 & & P_v = \pm \text{Sin} \frac{\alpha_1}{2} e_2 \\
 Q \in \mathfrak{H}^1: Q &= (Q_u, Q_v), Q_u \in \mathfrak{R}: Q_u = \pm \text{Cox} \frac{\alpha_2}{2} \\
 Q_v \in \mathfrak{R}^3 & & Q_v = \text{Sin} \frac{\alpha_2}{2} e_2^* \\
 I \in \mathfrak{H}^1: I &= (I_u, I_v), I_u \in \mathfrak{R}: I_u = \pm \text{Cox} \frac{\alpha}{2} \\
 I_v \in \mathfrak{R}^3 & & I_v = \pm \text{Sin} \frac{\alpha}{2} e_2^*
 \end{aligned}$$

Precederemos a plantear el problema cinemático inverso en la configuración deformada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.4.5 PROBLEMA CINEMÁTICO INVERSO EN LA CONFIGURACIÓN DEFORMADA.

Dado  $R(Pot) \in \mathcal{R}^3$  y  $l_1 \in \mathcal{R}^3$ ,  $l_2 \in \mathcal{R}^3$ ,  $l_3 \in \mathcal{R}^3$ , se encuentre  $p = (p_1, 0, p_2, 0)$ ,  $q = (q_1, 0, q_2, 0)$ ,  $i = (i_1, 0, i_2, 0)$  con  $\|p\| = \|q\| = \|i\| = 1$  tal que (2.4.17) sea satisfecha y:

$$\begin{aligned} p_1^2 + p_2^2 &= 1 \\ q_1^2 + q_2^2 &= 1 \\ i_1^2 + i_2^2 &= 1 \end{aligned} \quad [1.27]$$

El problema de la cinemática inversa en la posición deformada genera 4 ecuaciones algebraicas no lineales con 4 incógnitas del tipo polinomial

## CAPITULO II

## 2- DISEÑO CONCEPTUAL Y DE FORMA DE UN MANIPULADOR CON 3 GDL.

[1],[2],[3],[4],[5],[9],[10]

Como todo dispositivo funcional, los robots tienen una estructura formada por sistemas o subsistemas y componentes. Si observamos la forma y el funcionamiento de los diferentes tipos de robots podemos deducir que todos tienen algo en común:

La **estructura o chasis**: es la encargada de darle forma al robot y sostener sus componentes. Puede estar constituida por numerosos materiales, como plásticos, metales, etc. y tener muchas formas diferentes.

Los robots pueden ser del tipo "**endoesqueleto**", donde la estructura es interna y los demás componentes externos, o "**exoesqueleto**", donde la estructura es externa y cubre los demás elementos.

Las formas de las estructuras son de lo más variadas, tanto hasta donde la imaginación y la aplicación que se le va a dar al robot lo permitan.

Las **fuentes de movimiento**: Las fuentes de movimiento son las que le otorgan movimiento al robot. Una de las más utilizadas es el motor eléctrico. Un motor es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotacional que se utiliza para darle movimiento a ruedas y otros medios de locomoción.

En robótica se utilizan motores de CC (corriente continua), servomotores y motores paso a paso.

Una fuente de movimiento nueva que apareció recientemente en el mercado son los músculos eléctricos, basados en un metal especial llamado Nitinol.

Los **medios de transmisión de movimiento**: Cuando las fuentes de movimiento no manejan directamente los medios de locomoción del robot, se precisa una interface o medio de transmisión de movimiento entre estos dos sistemas, que se utiliza para aumentar la

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

fuerza o para cambiar la naturaleza del movimiento, por ejemplo para convertir un movimiento circular en lineal, o para reducir la velocidad de giro.

Se suelen emplear conjuntos de engranajes para tal fin, aunque también se usan ruedas de fricción o poleas y correas.

**Los medios de locomoción:** Los medios de locomoción son sistemas que permiten al robot desplazarse de un sitio a otro si éste debe hacerlo. El más utilizado y simple es el de las ruedas y le siguen en importancia las piernas y las orugas.

**Los medios de agarre:** Algunos robots deben sostener o manipular algunos objetos y para ello emplean dispositivos denominados de manera general medios de agarre.

El más común es la mano mecánica, llamada en inglés "gripper" y derivada de la mano humana.

En los robots industriales se usan mecanismos especiales para sostener herramientas o piezas de formas determinadas.

**La fuente de alimentación:** La fuente de alimentación de los robots depende de la aplicación que se les dé a los mismos, así si el robot se tiene que desplazar autónomamente, se alimentará seguramente con baterías eléctricas recargables, mientras que si no requiere desplazarse o sólo lo debe hacer mínimamente, se puede alimentar mediante corriente alterna a través de un convertidor.

En los robots de juguete o didácticos se pueden emplear baterías comunes o pilas, y en los de muy bajo consumo celdas solares.

Los sensores le permiten al robot a manejarse con cierta inteligencia al interactuar con el medio. Son componentes que detectan o perciben ciertos fenómenos o situaciones.

Estos sensores pretenden en cierta forma imitar los sentidos que tienen los seres vivos.

Entre los diferentes sensores que podemos encontrar están las fotoceldas, los fotodiodos, los micrófonos, los sensores de toque, de presión, de temperatura, de ultrasonidos e incluso cámaras de video como parte importante de una "visión artificial" del robot.

Los circuitos de control: Los circuitos de control son el "cerebro" del robot y en la actualidad están formados por componentes electrónicos más o menos complejos dependiendo de las funciones del robot y de lo que tenga que manejar.

Actualmente los modernos microprocesadores y microcontroladores, así como otros circuitos específicos para el manejo de motores y relés, los conversores A/D y D/A, reguladores de voltaje, simuladores de voz, etc. permiten diseñar y construir tarjetas de control para robots muy eficientes y de costo no muy elevado.

El bajo costo actual de una computadora personal permite utilizarla para controlar robots de cualquier tipo utilizando las grandes ventajas que supone dicho dispositivo.

Pasando al entorno industrial, podemos observar lo siguiente en los dispositivos que se encuentran instalados en muchísimas fábricas:

En los sistemas automáticos de manipulación de piezas u objetos podemos distinguir tres partes estructurales muy bien definidas.

La primera es la **máquina propiamente dicha**, o sea todo el sistema mecánico y los motores o actuadores y el sistema de agarre o sujeción de los objetos.

Los sensores de fuerza, visión y sonido son **detectores** necesarios para que la máquina sepa exactamente el estado de todas las variables que precisa para una correcta actuación.

El sistema de control y el lenguaje de programación forman el sistema de toma automática de decisiones, que incluye la planificación, el control de los movimientos y la interpretación de los datos que aportan los sensores.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Detallando ahora estos elementos podemos ver la estructura de un robot de tipo industrial en la siguiente tabla, observemos que el brazo mecánico es sólo una parte de todo el mecanismo:

- Manipulador, ejecutor o efector final
- El controlador puede ser: de posición, cinemático, dinámico o adaptativo
- Los elementos motrices: pueden ser: Neumáticos, Hidráulicos o Eléctricos
- El elemento terminal: Aprehensor, Herramienta
- Los sensores
- Los ordenadores

**El manipulador, ejecutor o efector final:** (dispositivos de manipulación) brazos, muñecas, manos, herramientas, dispositivos de succión y magnéticos.

El manipulador o brazo son los elementos mecánicos que propician el movimiento del elemento terminal. Los elementos rígidos del brazo están relacionados entre sí mediante articulaciones, las cuales pueden ser giratorias o prismáticas. El número de elementos del brazo y el de las articulaciones que los relacionan determinan los grados de libertad del manipulador, que en los robots industriales suele ser seis.

**El controlador de posición :** es el dispositivo que se encarga de regular el movimiento de los elementos del brazo, y de todo tipo de acciones, cálculos y procesos de información. La complejidad del control varía con los parámetros que se manejan, existiendo varias categorías de controlador:

El controlador de **posición** solo interviene en el control de posición del elemento terminal, pudiendo actuar punto a punto, o bien en modo continuo.

El controlador **cinemático** además de la posición controla la velocidad del brazo.



El controlador **dinámico** tiene en cuenta también las propiedades dinámicas del manipulador, motores y elementos asociados.

El control **adaptativo**, además de lo indicado en los anteriores, también considera la variación de las características del manipulador al variar la posición.

**Desde otra óptica, el controlador puede ser de lazo abierto o de lazo cerrado.**

En el primero se manda una señal de control, pero no se verifica si se ha reproducido con exactitud o se ha cometido un error al ejecutarse. En el segundo caso, existe una realimentación de la salida, cuya información se compara con la señal de mando, tratándose el error, si lo hubiera, de manera adecuada para lograr alcanzar lo que se pretendía con la señal de mando.

Los **elementos motrices o actuadores** (motores neumáticos, mecánicos o eléctricos que suministran la fuerza de entrada para el movimiento de los ejecutores).

Se encargan de mover las articulaciones, a través de cables, poleas, cadenas, engranajes, etc.

Su clasificación se realiza de acuerdo al tipo de energía que utilizan:

Los actuadores **neumáticos** emplean el aire comprimido como fuente de energía y se utilizan para controlar movimientos rápidos pero de no mucha precisión.

Los actuadores **hidráulicos** se utilizan cuando se requiere una gran capacidad de carga, junto con una precisa regulación de velocidad.

Los actuadores **eléctricos** son los que más se utilizan, por su fácil y preciso control, y por las ventajas del funcionamiento mediante energía eléctrica.

El **elemento terminal**: Aprehensor, Herramienta

**Sensores**: detectan la luz, el sonido, las distancias, etc.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Ordenadores de tamaño grande o mediano:** conectados a los actuadores y sensores por cable o radio, o microprocesadores internos (dentro del robot), o una combinación de ambos.



figura 2.1 Controlador de lazo abierto

La tendencia actual es diseñar robots más y más versátiles, capaces de adaptarse a distintos trabajos. Cuanto más general es la aplicación más complejo es el diseño de la máquina y, por lo tanto, más se encarece el mismo.

Sería interesante que los robots fueran:

- \*-Autónomos, es decir, que pudieran desarrollar su tarea de forma independiente.
- \*-Fiables, que siempre realizaran su tarea de la forma esperada.
- \*-Versátiles, que pudieran ser utilizados para variadas tareas sin necesidad de demasiadas modificaciones en su control.

En general hay cuatro tipos distintos de soluciones para los problemas a los que un robot se enfrenta. Dependiendo de las restricciones del problema, un tipo de solución será más apropiado que otro, pero raramente será un tipo aislado de soluciones quien proporcione el mejor resultado.

- Ingeniería del entorno
- Cambio de la forma física del robot
- Cambio del tipo de acciones que el robot lleva a cabo
- Software de control para dirigir el comportamiento del robot

**Ingeniería del entorno.**

Los humanos utilizamos este método continuamente para hacernos la vida más fácil. Cuando estamos diseñando un robot hay ciertas características del entorno que podrían simplificar el diseño del mismo. Por ejemplo un robot de limpieza que en vez de trabajar de día trabajara de noche, evitando así el problema de la gente moviéndose por su entorno.

**Cambio de la forma física del robot.**

La forma de un robot puede tener un gran impacto en sus prestaciones, un robot no cilíndrico con mayor riesgo de quedar atrapado por una disposición desfavorable de obstáculos o de fallar en encontrar un camino en un espacio estrecho o intrincado.

Consideremos dos robots del mismo tamaño uno cilíndrico y el otro cuadrado, ambos encuentran un paso estrecho según se mueven. Un algoritmo sencillo permitirá al robot cilíndrico pasar, el robot choca, gira y lo intenta de nuevo hasta que pasa. Esto es así de simple porque el robot es capaz de girar estando en contacto con el obstáculo.

El robot cuadrado, por el contrario, tiene que retroceder y girar si quiere usar la misma táctica. Por tanto, siempre se requiere un algoritmo más complejo para la navegación de un robot cuadrado que para la de uno cilíndrico. Para entender la razón de esto, tenemos que apelar a un concepto avanzado en robótica conocido como espacio de configuraciones cuyo autor es Tomás Lozano-Pérez.

**Software de control más sofisticado para dirigir el comportamiento del robot**

Un diseño sencillo puede ser suficiente para realizar la tarea encomendada si el software de control es lo suficientemente completo como para resolver todos los problemas a los que se enfrenta.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.1 ANATOMÍA DEL ROBOT.

Se refiere a la construcción física del cuerpo, brazo y muñeca de la máquina. La mayoría de los robots utilizados en las fábricas actuales están montados sobre una base que esta sujeta al suelo. El cuerpo esta unido a la base y un conjunto del brazo esta unido al cuerpo. Al final del brazo esta la muñeca. La muñeca esta constituida por varios componentes que le permiten orientarse en una diversidad de posiciones. Los movimientos relativos entre los diversos componentes del cuerpo, brazo y muñeca son proporcionados por una serie de articulaciones. Estos movimientos de las articulaciones suelen implicar deslizamientos o giros.

El robot industrial es un manipulador de uso general controlado por computador que consiste en algunos elementos rígidos conectados en serie mediante articulaciones prismáticas o de revolución. El final de la década esta fijo a una base soporte, mientras el otro extremo esta libre y equipado con una herramienta para manipular objetos o realizar tareas de montaje. Los movimientos de las articulaciones resultan y producen un movimiento relativo de los distintos elementos. Mecánicamente, un robot se compone de un brazo y una muñeca más una herramienta. Se diseña para alcanzar una pieza de trabajo localizada dentro de su volumen de trabajo.

Un manipulador mecánico consiste en una secuencia de cuerpos rígidos, llamados elementos, conectados mediante articulaciones prismáticas o de revolución. Cada par articulación-elemento constituye un grado de libertad. De aquí que para un manipulador con  $N$  grados de libertad haya  $N$  pares articulación-elemento con el enlace 0 (no considerado parte del robot) unido a una base soporte donde suele establecer un sistema de coordenadas inercial para este sistema dinámico, y el último elemento esta unido a la herramienta. Las articulaciones y elementos se enumeran hacia afuera desde la base; así la articulación primera es el punto de conexión entre el elemento primero y la base soporte. Cada elemento se conecta, a lo mas, a otros dos, así pues no se forman lazos cerrados. [1]

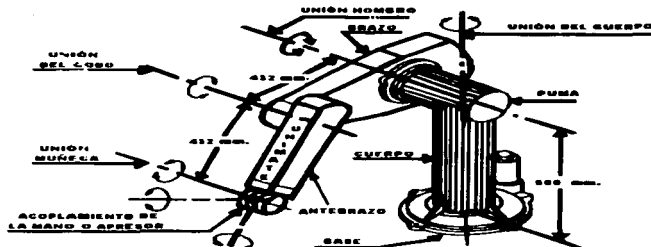


Figura 2.2 Un robot PUMA ilustrando articulaciones y elementos

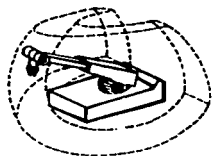
### 2.1.1 VOLUMEN DE TRABAJO.

El volumen de trabajo es el término que se refiere al espacio dentro del cual el robot puede manipular el extremo de su muñeca. El convenio de utilizar el extremo de la muñeca para definir el volumen de trabajo del robot se adopta para evitar la compilación de diferentes tamaños de efectores finales, que podrían unirse a la muñeca del robot. El efector final es una adición al robot básico y no debe contarse como parte del espacio de trabajo del robot. Un efector final largo montado en la muñeca se añadiría significativamente a la extensión del robot en comparación con un efector final más pequeño. Además, el efector final unido a la muñeca podría no ser capaz de alcanzar algunos puntos dentro del volumen normal de trabajo del robot debido a la combinación particular de límites de articulaciones del brazo.

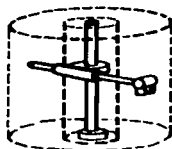
El volumen de trabajo viene determinado por las siguientes características del robot:

1. La configuración física del robot.
2. Los tamaños de los componentes del cuerpo, brazo y de la muñeca.
3. Los límites de movimientos de las articulaciones del robot.

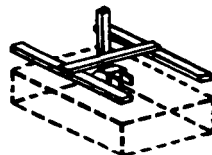
La influencia de la configuración física sobre la forma del volumen de trabajo. Un robot de coordenadas polares tiene un volumen de trabajo que es una esfera parcial, un robot de coordenadas cilíndricas tiene un volumen de trabajo cilíndrico. [1]



POLAR



CILÍNDRICA



CARTESIANA

**Figura 2.3 Configuración física sobre la forma del volumen de trabajo**

El volumen de trabajo es la esfera de influencia de un robot cuyo brazo puede colocar el submontaje de la muñeca en cualquier punto dentro de la esfera. El brazo generalmente se puede mover con tres grados de libertad. La combinación de los movimientos posiciona a la muñeca sobre la pieza de trabajo. La muñeca normalmente consta de tres movimientos giratorios. La combinación de estos tres movimientos orienta la pieza de acuerdo a la configuración del objeto para facilitar su recogida. Estos tres últimos movimientos se denominan a menudo elevación, desviación y giro. Por lo tanto, para un robot con seis articulaciones, el brazo es el mecanismo de posicionamiento, mientras que la muñeca es el mecanismo de orientación.

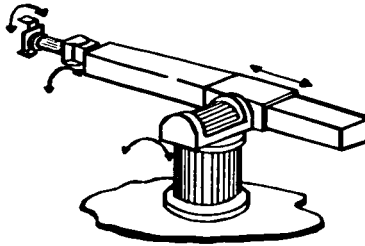
### 2.1.2 COMPONENTES DE UN ROBOT.

Un sistema de robot industrial consta de las siguientes partes:

1.- MANIPULADOR O BRAZO MECÁNICO. Es el conjunto de elementos mecánicos que propician el movimiento del elemento terminal (aprehensor o herramienta). Dentro de la estructura interna del manipulador se alojan, en muchas ocasiones, los elementos motrices.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

engranajes y transmisiones que soportan el movimiento de las cuatro partes que generalmente, suelen conformar el brazo:



**Figura 2.4 Sistema de robot industrial.**

- a) Base o pedestal de fijación.
- b) Cuerpo.
- c) Brazo.
- d) Antebrazo.

**2.- CONTROLADOR.** Es el que se encarga de regular el movimiento de los elementos del manipulador y todo tipo de acciones, cálculos y procesado de información, que se realiza.

La complejidad del control varía según los parámetros que se gobiernan, pudiendo existir las siguientes categorías:

- a) Controlador de posición. Sólo interviene en el control de la posición del elemento terminal.
- b) Control cinemático. Cuando además de la posición se regula la velocidad.

c) Control dinámico. Se tiene en cuenta, también, las propiedades dinámicas del manipulador, motores y elementos asociados.

d) Control adaptativo. Además de lo indicado en los anteriores controles, también se considera la variación de las características del manipulador al variar la posición.

3.- ELEMENTOS MOTRICES O ACTUADORES. Los elementos motrices son los encargados de producir el movimiento de las articulaciones, bien directamente o a través de poleas, cables, cadenas, etc. Se clasifican en tres grandes grupos, atendiendo a la energía que utilizan:

a) Neumáticos.

b) Hidráulicos.

c) Eléctricos.

4.- ELEMENTO TERMINAL (Herramienta o aprehensor). A la muñeca del manipulador se acopla una garra o una herramienta, que será la encargada de materializar el trabajo previsto.

Por lo general, la problemática del elemento terminal radica en que ha de soportar una elevada capacidad de carga y al mismo tiempo conviene que tenga reducido peso y tamaño.

Como consecuencia de la amplia variedad de tareas a las que se destinan los robots, el elemento terminal adopta formas muy diversas en bastantes ocasiones es necesario diseñar el elemento terminal a medida de la operación en la que se aplica. [2]

5.- SENSORES DE INFORMACIÓN EN LOS ROBOTS INTELIGENTES. Los robots de la última generación tienen la capacidad de relacionarse con el entorno y tomar decisiones en tiempo real, para adaptar sus planes de acción a las circunstancias exteriores. La información que reciben les hacen autoprogramables, o sea, alteran su actuación y función de la situación externa lo que supone disponer de un cierto grado de inteligencia artificial.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 2.1.3 CONFIGURACIONES BÁSICAS DE UN ROBOT.

Los robots industriales están disponibles en una amplia gama de tamaños, formas y configuraciones físicas. La gran mayoría de los robots comercialmente disponibles en la actualidad tiene las siguientes configuraciones.

1.- CONFIGURACIÓN POLAR. Utiliza un brazo telescópico que puede elevarse o bajar al rededor de un pivote horizontal. Este pivote está montado sobre una base giratoria. Estas articulaciones proporcionan al robot la capacidad para desplazar su brazo dentro de un espacio esférico, y de aquí la denominación de robot de <<coordenadas esféricas>> que suelen aplicar a este tipo.

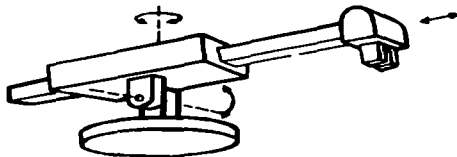
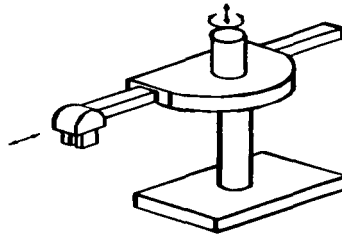


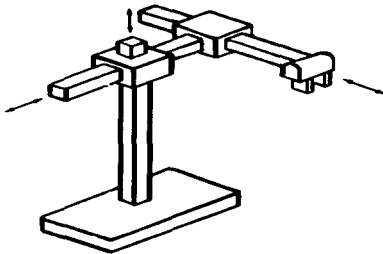
Figura 2.5 Configuración polar

2.- CONFIGURACIÓN CILÍNDRICA. Utiliza una columna vertical y un dispositivo de deslizamiento que puede moverse hacia arriba o abajo a lo largo de la columna. El brazo del robot está unido al dispositivo deslizante de modo que puede moverse en sentido radial con respecto a la columna puede girar.



**Figura 2.6 Configuración cilíndrica**

3.- CONFIGURACIÓN DE COORDENADAS CARTESIANAS. Este tipo de robot utiliza tres dispositivos deslizantes perpendiculares para construir los ejes x, y, z.



**Figura 2.7 Configuración cartesiana**

4.- CONFIGURACIÓN DE BRAZO ARTICULADO. Es similar a la del brazo humano, esta constituido por dos componentes rectos que simulan el brazo o antebrazo humano. Estos componentes están conectados por las articulaciones giratorias que asemejan el

hombro y codo y una muñeca esta al final del brazo del robot. El robot más común de este tipo se conoce robot SCARA

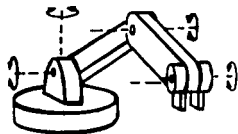


figura 2.8 Configuración de brazo articulado

#### 2.1.4 CAPACIDAD DE MOVIMIENTO DE UN ROBOT.

La colección de las diversas articulaciones se hace a través de elementos rígidos llamados uniones.

La capacidad de movimiento de un robot esta dada por sus uniones o articulaciones.

Toda tarea implica el movimiento de un brazo manipulador por lo tanto la primera función del sistema de control del robot es proporcionar y orientar la muñeca con una velocidad y precisión especificadas.[1]

Los robots industriales están diseñados para realizar un trabajo productivo. El trabajo se realiza permitiendo que el robot desplace su cuerpo, brazo y muñeca mediante una serie de movimientos y posiciones. Unido a la muñeca está el efector final, que se utiliza por el robot para realizar una tarea específica. Los movimientos del robot pueden dividirse en dos categorías generales:

1. Movimientos del brazo y del cuerpo.
2. Movimientos de la muñeca.

Los movimientos de las articulaciones individuales asociadas con estas dos categorías se denominan, a veces, por el término <<grados de libertad>> y un robot industrial típico está dotado de cuatro a seis grados de libertad.



**Figura 2.9 Robot industrial paralelo.**

Los movimientos del robot se realizan por medio de articulaciones accionadas. Tres articulaciones suelen estar asociadas con la acción del brazo y del cuerpo y dos otras articulaciones se suelen emplear para accionar la muñeca. Para la conexión de las diversas articulaciones del manipulador se emplean unos elementos rígidos denominados uniones. En cualquier cadena de unión articulación unión, llamaremos unión de entrada al eslabón que está más próximo a la base en la cadena. La unión de salida es la que se desplaza con respecto a la entrada.

Las articulaciones utilizadas en el diseño de robots industriales suelen implicar un movimiento relativo de las uniones contiguas, movimiento que es lineal o rotacional. Las articulaciones lineales implican un movimiento deslizante o de traslación de las uniones de conexión.

Hay como mínimos, tres tipos de articulación giratoria, que pueden distinguirse en los manipuladores de robots.

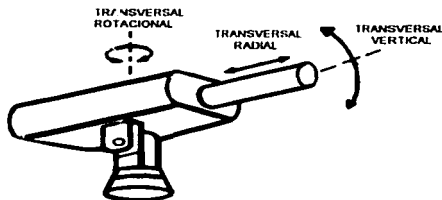
Las articulaciones del brazo y del cuerpo están diseñadas para permitir al robot desplazar su efector final a una posición deseada dentro de los límites del tamaño del robot y de los movimientos de las articulaciones y estas son:



**Figura 2.10 Tipos de articulación giratoria.**

Para robots de configuración polar, cilíndrica o de brazo articulado, los tres grados de libertad asociados con los movimientos del brazo y del cuerpo son:

1. Transversal Vertical.- Es la capacidad para desplazar la muñeca hacia arriba o abajo para proporcionar la postura vertical deseada.
2. Transversal Radial.- Implica la extensión o retracción del brazo desde el centro vertical del robot.
3. Transversal Rotacional.- Es la rotación del brazo alrededor del eje vertical.



**Figura 2.11 Asociación de tres grados de libertad con movimientos del brazo y del cuerpo.**

### 2.1.5 PRECISIÓN DE MOVIMIENTO.

Se define la precisión del movimiento como una ficción de tres categorías:

1) Resolución Espacial.- Esta se define como el más pequeño incremento movimiento en que el robot puede pedir su volumen de trabajo.

La resolución depende de dos factores:

a) La resolución de control del sistema.- Viene determinada por el sistema de medida de realimentación.

b) Las inexactitudes mecánicas.- En los componentes de las uniones y articulaciones del robot y su sistema de medida de realimentación constituye el otro factor que contribuye a la resolución espacial.

2) Exactitud.- Se refiere a la capacidad de un robot para situar el extremo de su muñeca en un punto destino deseado dentro de un menú de trabajo.

La exactitud puede dividirse en términos de resolución espacial, porque la capacidad para alcanzar un punto de destino determinado depende de cuan próximos pueda el robot definir los incrementos de control para cada uno de sus movimientos de las articulaciones.

La exactitud de un robot resulta afectada por dos factores:

a) La exactitud varía dentro del volumen de trabajo

b) La exactitud mejora si el ciclo de movimiento está restringido a un margen de trabajo limitado.

3) Receptividad.- Esta relacionada con la capacidad del robot para situar su efector final en un punto en el espacio que si lo hubiera enseñado con anterioridad.

Se refiere a la capacidad del robot para mover del punto programado cuando se le ordena que lo haga. [1]

### 2.1.6 PROGRAMACIÓN DEL ROBOT.

En su forma más básica, un programa de robot puede definirse como una trayectoria en el espacio a través de la cual se ordena el manipulador que se desplaza. Esta trayectoria incluye también otras acciones tales como controlar el efector final y recibir señales desde los sensores. La finalidad de la programación del robot es "enseñar" estas acciones del robot. [1]

Existen varios métodos empleados para programar robots. Las dos categorías básicas de mayor importancia comercial actual son:

**1.PROGRAMACIÓN GESTUAL:** Consiste en forzar el brazo del robot a desplazarse a través de la secuencia de movimiento requerida y registrar los movimientos a la memoria del controlador. Los métodos gestuales, o directos, se utilizan para programar robots de reproducción. En el caso de robot de reproducción punto, el procedimiento habitual es utilizar una caja de control para impulsar las articulaciones de robot a cada uno de los puntos: en memoria para cada una posterior reproducción. La caja de control esta provista de una serie de conmutadores y mandos para encontrar los movimientos del robot durante el procedimiento de enseñanza. Debido a su facilidad y comodidad y a la amplia gama de aplicaciones adaptables, este método es el más utilizado para los robots de tipo reproducción.

La preocupación principal del programador será cerciorarse de que secuencia de movimiento es la correcta.

**2.PROGRAMACIÓN TEXTUAL:** Utiliza un lenguaje similar al ingles para establecer la lógica y la secuencia de ciclo de trabajo. Una terminal de computadora se utiliza para introducir las instrucciones del programa en el controlador, pero también se emplea una caja de control para definir las posiciones de los diversos puntos en el espacio de trabajo. El lenguaje de programación del robot nombra los puntos como símbolos en el programa y estos símbolos se definen posteriormente mostrando al robot sus posiciones. Además de identificar puntos en el espacio de trabajo, los lenguajes de robot permiten el empleo de

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

cálculos, un flujo lógico detallado y subrutinas en los programas, junto con un más frecuente uso de sensores y comunicaciones.

### 2.1.7 SISTEMAS DE CONTROL Y EJECUCIÓN DINÁMICA.

Un robot es un sistema mecánico cuyo control debe estar encaminado a efectuar una tarea de utilidad. Toda tarea implica el movimiento de un brazo manipulador. Por tanto, la primera función del sistema de control del robot es posesionar y orientar la muñeca (y el efector final) con una velocidad y precisión especificadas.

Se pondrá más énfasis en el estudio de los sistemas mecánicos, ya que el manipulador de robot se encuentra dentro de este grupo.

Cuando se estudia un sistema mecánico se está interesado por la respuesta del sistema para determinadas entradas. Estas entradas incluyen las ordenes de control de sistema y las magnitudes perturbadoras del entorno.

Un sistema se puede dividir en cinco componentes principales:

- 1.- La entrada (o entradas) al sistema.
- 2.- El controlador y los dispositivos de actuación.
- 3.- La instalación (mecanismo o proceso que se controla).
- 4.- La salida (variable controlada).
- 5.- Elementos de retroalimentación (sensores).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 2.1.8 CONTROLADORES.

La función del controlador es comparar la salida real del sistema con la orden de entrada para reducir una señal de control, que reducirá el error a cero o tan cerca como sea posible.

#### 1.CONTROLADOR

Suele estar formado por una comparación de las señales de entrada y salida, un dispositivo de control que determina la acción a realizar y unos actuadores para convertir la acción en movimiento físico. En algunos robots los actuadores no son parte del control. [2]

Los controladores más comunes son:

- 1.- On/Off
- 2.- Proporcional
- 3.- Integral
- 4.- Proporcional más integral
- 5.- Proporcional más derivativo
- 6.- Proporcional más integral más derivativo

### 2.1.9 ACTUACIÓN DE UN ROBOT Y COMPONENTES DE RETROALIMENTACIÓN.

El control de manipulador del robot requiere la aplicación a un sistema mecánico de la teoría de control. Existen diferentes tipos de dispositivos utilizados como componentes de los sistemas de control del robot.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Estos dispositivos se clasifican en cuatro categorías. [4]

1.- Sensores de Posición

2.- Sensores de Velocidad

3.- Actuadores

4.- Dispositivos de transmisión de energía

Los sensores de posición y velocidad se utilizan en la robótica como dispositivos de retroalimentación, es decir nos proporciona los medios necesarios para determinar las posiciones de las articulaciones así como su velocidad. Entre la gran variedad de dispositivos existentes están los potenciómetros, unidades de resolución y codificadores.

2.CONTROL CLÁSICO.

3.CONTROL TODO O NADA.

El controlador <<todo o nada>>, el elemento de control sólo proporciona dos niveles de control: total y nulo. Un ejemplo de este tipo de controlador es el termostato doméstico. Si el error que se presenta en el controlador es  $e(t)$  y la señal de control que proporciona el controlador es  $m(t)$ , entonces el controlador <<todo o nada>> se representa por:

$$m(t) = M1 \text{ para } e(t) > 0$$

$$m(t) = M2 \text{ para } e(t) < 0$$

La mayoría de los controladores de tipo << todo o nada >>, ni  $M1$  ni  $M2$  es igual a cero.

4.CONTROL PROPORCIONAL.

En los casos de que se requiera una acción más suave, puede utilizarse controlador proporcional. Este controlador desarrolla una señal de control proporcional al error.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Esencialmente, actúa como un amplificador con una ganancia  $K_p$ . Su acción se representa por: [1]  $m(t) = K_p e(t)$

Utilizando la notación del operador diferencial introducida con anterioridad, la función de transferencia será:

$$M(s) / E(s) = K_p$$

### 5. CONTROL INTEGRAL.

Es un controlador, al emplear una acción de control integral, la señal de control se modifica a una velocidad proporcional a la señal de error. Es decir, la señal de error es grande, la señal de control se incrementa con gran rapidez; si es pequeña, la señal de control se incrementa con lentitud.

Este proceso puede representarse por:

$$m(t) = K_i \int e(t) dt$$

Donde  $K_i$  es la ganancia del integrador. La correspondiente función de transferencia es:

$$M(s) / E(s) = K_i/s$$

Utilizando  $1/s$  como operador para la integración. Si el error tiende a cero, la salida del controlador permanecería constante.

### 6. CONTROL PROPORCIONAL MÁS INTEGRAL.

Algunas veces es necesario combinar acciones de control. Un controlador proporcional es incapaz de neutralizar una carga en el sistema sin ningún error. Un controlador integral puede proporcionar un error cero, pero suele suministrar una respuesta lenta. Para resolver este problema se utiliza el controlador P I.

Se representa por:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p / T_i \int e(t) dt$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

donde  $T_i$  regula la ganancia del integrador y  $K_p$  ajusta el integrador y la ganancia proporcional. La función de transparencia es:

$$M(s) / E(s) = K_p (1 + 1 / T_i S)$$

### 7. CONTROL PROPORCIONAL MÁS DERIVATIVO.

La acción del control derivativo proporciona una señal de control proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. Puesto que la señal no genera ninguna salida a menos que el error sea cambiado, en raras ocasiones se utiliza sola. El controlador P D se presenta por:  $m(t) = K_p e(t) + K_p T_p \frac{de(t)}{dt}$  y la función de transferencia es:  $M(s) / E(s) = K_p (1 + T_d * S)$ . El efecto de la acción del control derivativo es anticipar cambios en el error y proporcionar una respuesta más rápida a los cambios.

### 8. CONTROL PROPORCIONAL MÁS INTEGRAL MÁS DERIVATIVO.

Tres de las acciones de control se pueden combinar para formar el controlador P-I-D se representa mediante:  $m(t) = K_p e(t) + K_p / T_i \int e(t) dt + K_p * T_d \frac{de(t)}{dt}$  y la función de transferencia es:  $M(s) / E(s) = K_p (1 + 1/T_i S + T_d S)$

El control P-I-D es el tipo de control más general y, con toda probabilidad, es el tipo de controlador más utilizado. Proporciona una respuesta rápida, un buen control de la estabilidad del sistema y un bajo error de régimen permanente. [2]

### 9. CONTROL HEURÍSTICO.

### 10. METODOLOGÍA DE CONTROL DE SISTEMAS DIFUSOS.

Desde las previas discusiones, se puede ver que los elementos principales de diseñar un FLC incluyen:

- 1) Definiendo aporte y rendimiento variables
- 2) Determinando la partición difusa de los espacios de rendimiento y aporte y eligiendo las funciones de miembros para el aporte y las variables lingüísticas de rendimiento. [3]

- 3) Determinar los tipos y la derivación de las reglas difusas de control.
- 4) Diseñando el mecanismo de inferencia, que incluye una implicación difusa y una composición de operador, y la interpretación de frases conectivas AND y ALSO.
- 5) Eligiendo un operador difuso.

El primero y el segundo diseñan los principios que indican, en el diseño de un FLC, sobre como identificar las principales variables estatales de proceso y controlan las variables y determinan un conjunto de términos que está al nivel derecho para describir los valores de cada variable (lingüística). Los tipos diferentes de miembros difusos funcionan, por ejemplo, funciones que tienen la forma triangular, trapezoidal, y de campana, pueden usarse para los valores lingüísticos de cada variable lingüística.

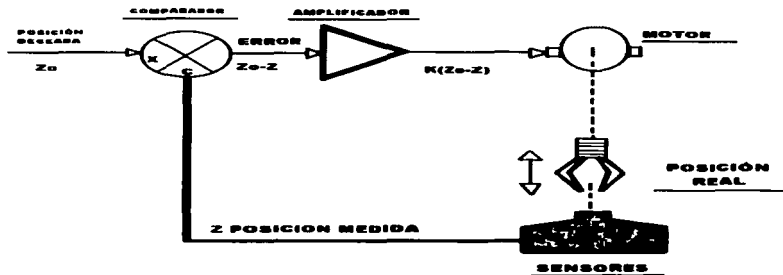


Figura 2.12 Metodología de control de sistemas difusos.

El tercer principio de diseño determina las reglas de control difuso depende de la naturaleza de la planta controlada. En general, hay cuatro de estos métodos para la derivación de

control difuso y estos métodos no son mutuamente privativos. Una combinación de ellos puede ser necesario construir un método efectivo para la derivación de reglas de control difuso.

Para los cuartos y quintos principios de un FLC, no hay metodología sistemática para el diseño de resultados y el motor de inferencia para proveer directivas para estas elecciones.

1. El control y experiencia experta para diseñar conocimiento: El control difuso manda a designar a unos operadores humanos y otro control diseña el conocimiento. Más específicamente, nosotros podemos pedir que un experto humano exprese sus inconformidades desde el punto de vista de implicaciones difusas, que es, para expresar como en IF THEN de reglas difusas. Nosotros podemos pedir también que un control este diseñado para enumerar un número de protocolos con base a su conocimiento sobre el proceso para ser controlado. Finalmente, un procedimiento heurístico de intento y en la cortadura se usan las reglas de control difuso. Este método es el menos estructurado de los cuatro métodos anteriores, y aún es el más usado ampliamente.

2. Modelo de operadores que controlan acciones: Se puede modelar unas acciones diestras de operadores o controlar el comportamiento desde el punto de vista de implicaciones difusas que usan los datos de rendimiento y aporte conectados con sus acciones de control. Entonces se usa obtenido " el modelo de rendimiento de aporte " como un control difuso. La idea en este modo de derivación es que es más fácil de modelar unas acciones de operadores para modelar un proceso desde las variables de aporte.

3. La base de un comportamiento en un análisis difuso o modelo de un proceso controlado: Este método, controla las reglas difusas que se derivan o justifican la base de un modelo difuso o el análisis de comportamiento de un proceso controlado. Si se tiene un modelo difuso de procesos o si se sabe de algunas propiedades útiles del proceso, se puede diseñar o generar un conjunto de control difuso para lograr un resultado óptimo. La modelación difusa, significa la representación de las características dinámicas del proceso por un conjunto de implicaciones de control difusas con aportes, variables estatales, y rendimientos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Existen dos métodos para diseñar el control difuso en el comportamiento de un análisis difuso:

a) Método Heurístico: Un control difuso ignora un comportamiento indeseable de sistema por considerar el control objetivo. Este es hecho por analizar el comportamiento de un proceso controlado. Las técnicas de análisis de comportamiento incluyen la fase planea enfoque, la fase lingüística, el enfoque de colocación de polo, un proporcional integral difuso (PID) que controla el enfoque.

b) Método de control óptimo: Este es básicamente un método determinado que puede determinar sistemáticamente la estructura lingüística y los parámetros de reglas de control difuso que satisfacen el control objetivo y las limitaciones basadas sobre el modelo difuso de un proceso. Los métodos sistemáticos son estudiados comúnmente por medio de ecuaciones correlativas difusas y el control lingüístico manda para modelando difuso que está comprendido de dos fases, específicamente, parámetro e identificación de estructura estimación.

### **2.1.10 MANOS DEL ROBOT (EFECTOR FINAL)**

Las capacidades del robot básico deben aumentarse por medio de dispositivos adicionales los cuales incluyen el instrumental que se une a la muñeca del robot y a los sensores que permiten al robot interactuar con su entorno.

En robótica el término efector final se utiliza para describir la mano o herramienta que esta unida a la muñeca. [1]

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura 2.13 Robot con efectores finales**

### 2.1.11 CATEGORIAS DE EFECTORES FINALES:

1. PINZAS.- Las pinzas se utilizan para agarrar un objeto y sujetarlo durante el ciclo de trabajo del robot.

### 2.1.12 CLASIFICACIÓN DE PINZAS:

- a) *Pinzas simples*.—Es que sólo se monta un dispositivo de agarre unidos en la muñeca del robot.
- b) *Pinzas dobles*.— Esta posee dos dispositivos de agarre unidos a la muñeca y se utiliza para sostener dos objetos distintos.

### 2.1.13 PINZAS MECÁNICAS

Las pinzas mecánicas son un efector final que utiliza dedos mecánicos impulsados por un mecanismo para agarrar una pieza. Los dedos, algunas veces llamados uñas, son los accesorios de la pinza que están en contacto con la pinza.

La función del mecanismo de pinza es trasladar algo a partir de un suministro de energía que origina una acción de agarre de los dedos sobre la pieza. La energía es suministrada por el robot y puede ser neumática, eléctrica, mecánica o hidráulica.



El mecanismo debe ser capaz de abrir y cerrar los dedos y de aplicar la fuerza suficiente contra la pieza para sostenerlo de forma segura cuando se cierre la pinza.

Existen varias formas de clasificación de pinzas mecánicas y de sus mecanismos de actuación. Un método es realizar la clasificación de acuerdo con el tipo de movimiento de los dedos utilizado por la pinza. En esta clasificación las pinzas pueden impulsar la apertura y cierre de los dedos mediante uno de los movimientos siguientes:

1. Movimiento de pivotaje

2. Movimiento lineal o traslación

Las pinzas mecánicas se pueden clasificar de acuerdo al tipo de dispositivo cinemático utilizado para actuar el movimiento del dedo. En esta clasificación se tienen los siguientes tipos:

1. Actuación de articulación.

2. Actuación de engranaje y bastidor.

3. Actuación de leva.

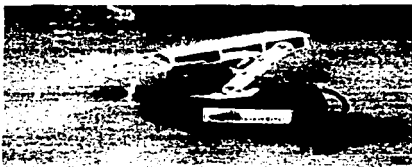
4. Actuación de tornillo.

5. Actuación de cable y polea.

6. Varios.

Además de las pinzas mecánicas, hay una diversidad de otros dispositivos que pueden elevar y sujetar objetos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura 2.14 Robot con pinza mecánica**

1) *PINZAS VENTOSAS*.- También denominadas casquetes de vacío, pueden utilizarse como dispositivos de pinza para manipular algunas clases de objetos. Los requisitos habituales exigidos a los objetos a manipular son que sean planos, suaves y limpios.

Las ventosas utilizadas en este tipo de pinzas de robot suelen ser de material elástico, tal como plástico blando.

2) *PINZAS MAGNÉTICAS*.- Pueden ser un medio muy factible de manipular materiales ferrosos.

3) *PINZAS ADHESIVAS*.- Realizan la acción de agarre pueden utilizarse para manipular tejidos y otros materiales livianos. [3]

4) *GANCHOS Y CUCCHARAS*.- Los ganchos pueden emplearse como efectores finales para manipular contenedores de piezas y para cargar y descargar piezas que cuelguen de transportadores aéreos.

Las cucharas y los calderos pueden utilizarse para manipular algunos materiales en forma de polvo o líquidos.

2. *HERRAMIENTAS*.- Una herramienta se utiliza como un efector final en aplicaciones donde se exige al robot realizar alguna operación especial, algunos ejemplos de herramientas utilizadas como efectores finales en aplicaciones de robot incluyen:

- Herramienta de soldadura por puntos.
- Soplete de soldadura por arco.
- Tobera de pintura por pulverización.
- Husillos giratorios para operaciones tales como: taladro, ranurado cepillado y rectificado.
- Aplicaciones de cemento líquido para montaje.
- Sopletes de calentamiento.
- Herramienta de corte por chorro de agua.

#### 2.1.14 SENSORES ROBÓTICOS.

La función de los sensores del robot se puede dividir en dos categorías:

1. Estado Interno.- Trata con la detección de variables tales como la posición de la articulación del brazo, que se utiliza para encontrar el robot.



figura 2.15 Sensor de estado interno

2. Estado Externo.- Trata con detección de variables tales como alcance, proximidad, contacto y fuerza juegan un papel significativo en la mejora del funcionamiento del robot, se reconoce que la visión es la capacidad sensorial más potente del robot.[4]



**Figura 2.16 Sensor de estado externo**

La visión del robot se puede definir como el proceso de extraer caracterizar, e interpretar información de imágenes de un mundo tridimensional. Este proceso también es conocido como visión de máquina o de computadora, se subdivide en seis áreas principales:



**Figura 2.17 Visión del robot**

1. Sensor.
2. Preprocesamiento.
3. Segmentación.
4. Descripción.
5. Reconocimiento.
6. Interpretación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.1.15 SENSORES, TRANSDUCTORES Y ACTUADORES.

**SENSORES:** Los sensores enviados como dispositivos periféricos incluyen tipos simples como interruptores y tipos complicados como sistemas de visión artificial.

Los sensores se clasifican en:

- a) Sensores Táctiles.- se trata de sensores que corresponden a fuerzas de contacto con otro objeto.



figura 2.18 Sensor táctil.

- b) Sensores de Proximidad y Alcance.- Estos sensores indican cuando un objeto esta cerca de otro objeto antes de que produzca contacto cuando se detecta la distancia entre los objetos se denomina sensores de alcance. [2]

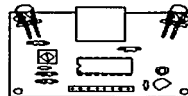


Figura 2.19 Sensor de proximidad y alcance.

- c) Tipos Diversos.- Son sensores como medidores de temperatura de presión.  
d) Visión de Maquinas.- se emplea técnicas de visión artificial.

**2.1.16 TRANSDUCTORES:** Es un dispositivo que transforma un tipo de variable física (fuerza, precisión, temperatura, velocidad, caudal, etc.) en otro. Una transformación común es la que se produce a la tensión eléctrica y a la razón por la que se realiza esta conversión es que es más fácil trabajar con la señal convertida. Algunos de los transductores utilizados con más frecuencia son los calibradores de tensión, los termopares (temperatura), los velocímetros (velocidad) y los tubos Pitot (flujos).

El transductor necesita estar calibrado para ser útil como dispositivo de medida. La calibración es el procedimiento mediante el cual se establece la relación entre la variable medida y la señal de salida convertida.

Los transductores pueden clasificarse en dos tipos básicos; dependiendo de la forma de la señal convertida. Los dos tipos son:

1. *Transductores Analógicos*.- Proporcionan una señal analógica continua, por ejemplo voltaje o corriente eléctrica. Esta señal puede ser tomada como el valor de la variable física que se mide.

2. *Transductores Digitales*.- Producen una señal de salida digital, en la forma de un conjunto de bits de estado en paralelo o formando una serie de pulsaciones que pueden ser conectadas.

**2.1.17 ACTUADORES:** Son dispositivos que proporcionan la fuerza motriz real para las articulaciones del robot. Los actuadores suelen obtener su energía a partir de una de estas tres fuentes: aire comprimido, fluido por presión o electricidad. Estos actuadores reciben el nombre de actuadores neumáticos, hidráulicos o eléctricos, respectivamente. [10]

Los actuadores que describiremos son los neumático e hidráulicos, estos dos obtienen energía mediante el movimiento de fluidos. En el primer caso, el fluido es aire comprimido y en el segundo caso, el fluido suele ser aceite a presión. Por lo general, el funcionamiento de estos actuadores es similar, excepto en su capacidad para contener la presión del fluido.

Los sistemas neumáticos suelen operar a unas 100 libras por pulgada cuadrada y los sistemas hidráulicos de 1000 a 3000 libras por pulgada cuadrada.

**2.1.18 SISTEMA DE IMPULSIÓN DEL ROBOT:** La capacidad para desplazar su cuerpo, brazo y muñeca se proporciona por el sistema de impulsión utilizado para accionar el robot. El sistema de impulsar determina la velocidad de los movimientos del brazo, la resistencia mecánica del robot y su rendimiento dinámico. En cierta medida el sistema de impulsor determina las clases de aplicaciones que vuelven a realizar el robot.

Existen dos clases de impulsión y son:

a) *Impulsión Hidráulica:* Suele estar asociada con los robots más grandes y fuertes.

Una ventaja de sistema hidráulico es proporcionar al robot una mayor velocidad y resistencia mecánica.

Los inconvenientes son que necesita más espacio y muy a menudo tiene fugas de aceite lo que resulta enojoso.

b) *Impulsión eléctrica:* Son menos potentes que los hidráulicos pero en cambio son más pequeños y precisos y además baratos que los hidráulicos.

### 2.1.19 PLANEACIÓN DE MOVIMIENTOS.

Un problema básico en la robótica es la planificación de los movimientos para resolver algunas tareas ya específicas y el control del robot, mientras ejecuta las ordenes necesarias para lograr los objetivos.

Planificar significa decidir en el transcurso de una acción antes de actuar.

Esta parte de la síntesis de acción del robot constituye un problema que puede ser solucionado por un sistema de resolución de problemas que alcanzará cualquier fin establecido, cuando se le de alguna situación inicial. Por lo tanto un plan es la representación del desarrollo de una acción para alcanzar un fin.

Los sistemas de planificación no especifican los movimientos del robot necesarios para lograr una operación. Estos sistemas tienen órdenes de robot tales como el DICKUP (A) y STACK(X, Y) en los que no se especifica el camino del robot.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En un futuro los planificadores de tareas de robots necesitarán una información más detallada sobre los estados intermediarios que la que los sistemas actuales dan, pero a cambio se puede esperar la generación de programas mucho más detalladas.

En otras palabras un planificador de tareas transformaría las especificaciones a nivel de manipulador. Para realizar tal transformación, el planificador de tareas debe tener:

Una descripción de los objetivos a manipular.

El entorno de la tarea.

La forma de llevar a cabo la tarea por el robot.

El estado inicial del entorno

Un estado final (objetivo) deseado.

El resultado que daría un planificador de tareas sería un programa de robot para alcanzar el estado final deseado cuando se ejecuta desde el estado inicial especificado.

Existen tres fases en la planificación de tareas: modelado, especificación de tareas y síntesis del programa de manipulador.

El modelo del mundo para una tarea debe incluir la información siguiente: [2]

- 1) Descripción geométrica de todos los objetos y robots en el entorno de la tarea.
- 2) Descripción física de todos los objetos.
- 3) Descripción cinemática de todos los movimientos.
- 4) Descripción de las características del sensor y del robot.



### 2.1.20 REDUCCIÓN DEL PROBLEMA

La resolución del problema, constituye otro enfoque para resolver el problema. La principal idea de este enfoque es razonar hacia atrás desde el problema a solucionar, estableciendo sucesivamente varios subproblemas triviales cuya solución es obvia.

Un operador reductor de problemas transforma la descripción de un problema en un conjunto de descripciones de problemas reducidos (sucesor). Para un problema dado hay muchos operadores de reducción que son susceptibles de aplicar. Cada uno produce un conjunto alternativo de subproblemas; puede que alguno de los subproblemas no sea solucionable, sin embargo por ello se debe intentar varios operadores para que se produzca un conjunto cuyos componentes sean todos solucionables. Por lo tanto esto requiere de un nuevo proceso de búsqueda.

La reducción del problema a un conjunto de problemas sucesivos se puede expresar de forma conveniente con una estructura tipo grafo.

Supóngase que el problema "A" se puede resolver con la resolución de tres subproblemas "B", "C" y "D"; un arco AND quedará marcado sobre todos los arcos de entrada de los nodos "B", "C", y "D". Los nodos "B", "C", y "D" se denominan nodos AND. Por otra parte si el problema "B" se puede resolver con la resolución de cualquiera de los subproblemas "E" y "F" se emplea un arco OR.

En este tipo de resolución se usaron los métodos de búsqueda de primero en anchura y primero en profundidad que son para grafos de tipo OR, con los que quisieron encontrar un camino simple desde el nodo de salida hasta el nodo objetivo. [2]

### 2.1.21 APRENDIZAJE DEL ROBOT.

El aprendizaje con analogía se considera como una solución muy poderosa y se ha aplicado a la planificación de robots, algún sistema de planificación de robots con aprendizaje ha sido ya propuesto, se denomina PULP - I (Tangwongsan y Fu 1979). El sistema emplea la analogía entre una tarea que no ha sido planeada y cualquier tarea similar para reducir la

búsqueda de una solución. En vez de una lógica de predicados se emplea una red semántica como una representación interna de tareas. Inicialmente un conjunto de tareas básicas se almacena en el sistema como conocimiento basado en la experiencia pasada.

Se emplea la analogía de sentencias de las dos tareas para expresar la similitud entre ellas y se determina mediante un proceso de comparación semántico; el algoritmo de comparación mide la " cercanía " semántica, cuanto más pequeño es su valor, más se acercan en significado.

Se determina un plan propuesto, basado en el proceso de medidas semánticas y en la experiencia pasada que se recupera de la información almacenada. Cada plan propuesto es chequeado por sus operadores para asegurarse de su aplicabilidad en el estado del mundo actual. Si el plan no es aplicable, solo hay que rechazarlo. Tras comprobar su aplicabilidad, se pueden considerar varios planes candidatos. Estos planes candidatos se dan en orden ascendente, de acuerdo a una evaluación del valor de su proximidad semántica. El que tenga un valor de diferencia semántica más pequeño tiene la prioridad más alta y debe colocarse al principio de la lista de candidatos. Pero, si no se encuentra ningún candidato el sistema se detiene sin éxito.

La simulación por computadora de PULP-I ha demostrado una mejora significativa en la planeación. Esta mejora no es simplemente la velocidad de planificación sino también la capacidad de crear planes complejos a partir de un ejemplo de tareas básicas ya aprendidos.

[1][2]

## 2.1.22 SISTEMAS EXPERTOS Y LOS ROBOTS.

Los sistemas de computadora diseñados para ver imágenes, oír sonido y entender el lenguaje sólo pueden tener un éxito limitado. Sin embargo, en un área de la inteligencia artificial aquella que razona con el conocimiento en un dominio limitado los programas no sólo pueden aproximarse a la forma de actuar humana, sino que la pueden superar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los sistemas expertos emplean un conjunto de hechos, reglas y otros tipos de conocimientos de un campo determinado así como métodos para aplicar las reglas para hacer inferencia. [9]

Un sistema experto se diferencia de los programas de computadora convencionales en varios aspectos.

En un programa convencional, el conocimiento relativo al problema y los métodos a emplear en estos conocimientos están interrelacionados, de tal forma que es difícil modificar el programa. [2]

En un sistema experto existe, por lo general, una clara separación entre el conocimiento general relativo al problema (el conocimiento base) obtenido de la información sobre el problema actual (los datos de entrada) y los métodos ( la máquina de inferencia) para aplicar el conocimiento general a dicho problema. Con esta separación el programa se puede cambiar con simples modificaciones de conocimiento base.

La denominación de un sistema experto refleja de que, generalmente, estos sistemas se basan en el conocimiento obtenido por personas expertas en una disciplina específica.

La figura 2.20 muestra los componentes básicos de un sistema experto. [5]

**2.1.23 EL PROCESADOR DE LENGUAJE.** Actúa como interfaz de comunicación entre el usuario y el sistema. El usuario interactúa con el sistema experto mediante el lenguaje orientado al problema, que normalmente está en un formato similar al lenguaje natural, aunque con restricciones. El procesador de lenguajes interpreta las entradas suministradas por el usuario, y da formato a la información generada por el sistema.

**2.1.24 EL JUSTIFICADOR.** Se encarga de explicar al usuario las diversas acciones realizadas por el sistema por ejemplo, es capaz de contestar preguntas relativas al camino seguido para llegar a una conclusión; también desempeña un papel crucial en las etapas de diseño y depuración de un sistema experto.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**2.1.25 LA PIZARRA.** Es el espacio de trabajo utilizado para diseñar elementos como pueden ser los datos sobre un problema específico, las hipótesis de trabajo, así como las decisiones intermedias.

**2.1.26 LA BASE DE CONOCIMIENTOS.** Contiene conocimiento procedimental, visual y universal; también contiene las reglas que necesita el sistema para resolver un problema. El mecanismo de control contiene conocimiento general para la resolución del problema, así como estrategias para la resolución de conflictos. El motor de inferencia, contiene la esencia de cómo concordar reglas, conocimiento, algoritmos y hechos actualmente conocidos sobre alguna tarea con el fin de poder llegar a una solución.

**2.1.27 EL CONTROLADOR.** Gestiona todos los recursos necesarios para localizar instancias de los elementos requeridos para que se satisfagan las condiciones del arreglo.

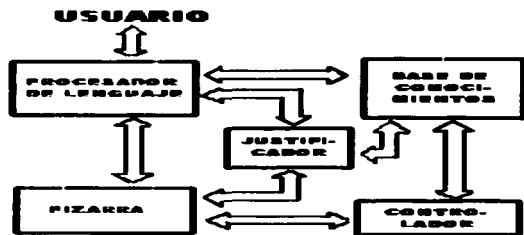


Figura 2.20 Componentes de un sistema experto.

### 2.1.28 ÁREAS DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS EXPERTOS.

Las áreas de aplicación de sistemas expertos incluyen la diagnosis y prescripción médica, automatización del conocimiento médico, interpretación de datos químicos, síntesis biológicas y químicas, descubrimiento de minerales y petróleo, planificación y

programación, ayudas de estrategias militares, localizaciones tácticas de blancos, defensa espacial, control de tráfico aéreo, análisis de circuitos, diseños VLSI, ayuda para determinar los daños de una estructura, selección para la configuración de una computadora, entendimiento del habla, enseñanza asistida por computadora, planificación de procesos de planificación y fabricación de sistemas expertos.

Los sistemas expertos más recientes contienen conocimientos sobre la causalidad y la estructura, estos sistemas son mucho más sólidos que los actuales, que pueden dar respuestas correctas lo suficientemente buenas para que se considere su uso en sistemas autónomos y no sólo como ayudantes inteligentes.

Las nuevas tendencias de estos sistemas, emplean redes semánticas, matrices y otras estructuras de representación de conocimiento, y se adaptan generalmente mejor a un modelado causal. Otro sistema es el que emplea la solución blackboard que combina partes basadas en reglas y no basadas en reglas que trabajan juntas para construir soluciones de manera incremental, de tal manera que cada segmento de programa contribuye con su propia experiencia particular.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO III

## 3- GENERACIÓN DE OBJETOS Y DEL AMBIENTE

## Introducción

Un *universo* es una composición jerárquica que contiene objetos rígidos y objetos articulados. La simulación de un universo se genera utilizando un *modelador*. El desarrollo de un modelado: en 3-D incluye tres fases principales, como se muestra en la figura 3.1.

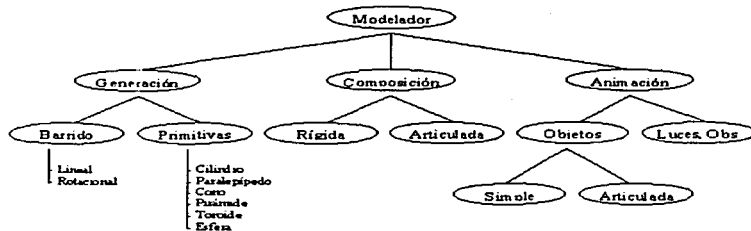


Figura 1. Fases de desarrollo de un Modelador.

Figura 3.1 Fases de desarrollo de un modelador

**Generación de primitivas:** Se crean los objetos geométricos simples, como base de cualquier modelo geométrico. Los objetos simples se crean por primitivas paramétricas de generación, o por barrido lineal o radial.

**Composición:** Se crean los objetos compuestos ensamblando objetos simples. La composición genera objetos más complejos con comportamiento rígido o articulado.

**Animación:** La animación consiste en dotar de movimiento a los objetos dentro del medio ambiente. Esta puede aplicarse a los objetos compuestos en su totalidad o en una de sus articulaciones. La animación incluye movimientos de cámara (punto de vista del observador) y manipulación de las luces.

### 3.1 PRIMITIVAS.

La construcción de ambientes en 3-D es un proceso jerárquico que conduce a la generación de objetos compuestos y animados a partir de puntos en el espacio. En esta sección se describe el modelo de objetos utilizado, así como las primitivas implementadas para la generación de los sólidos de base

#### 3.1.1 MODELO DE OBJETOS.

El total de datos requeridos para representar un objeto se conoce como *modelo de objeto*; la parte de estos datos que se refieren exclusivamente a información geométrica forman el *modelo geométrico*. El modelo de objeto puede contener los parámetros de creación y los atributos visuales tales como color material, índices de reflexión.

Los modelos geométricos más comunes son Geometría Constructiva de Sólidos (*Constructive Solid Geometry* CSG) y Representación por Frontera (*Boundary Representation* B-Rep).

En CSG, los sólidos se representan como composiciones de primitivas instanciadas que están unidos a través de operadores como unión y sustracción. Por lo tanto, en el nivel terminal del árbol residen primitivas geométricas instanciadas.

En B-Rep, los sólidos se representan en términos de sus superficies, y estas, a su vez, se representan en términos de puntos y líneas. En la figura 3.2, se muestra un árbol generado por B-Rep. En la figura 3.3, se muestra la descomposición de un objeto en sus superficies, y estas en líneas y puntos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

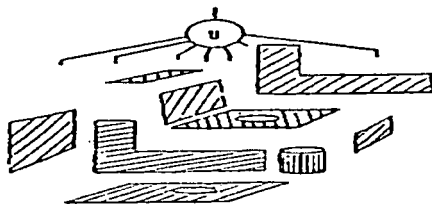


Figura 3.1 Árbol generado por B-Rep.

Figura 3.2 Árbol generado por B-Rep.

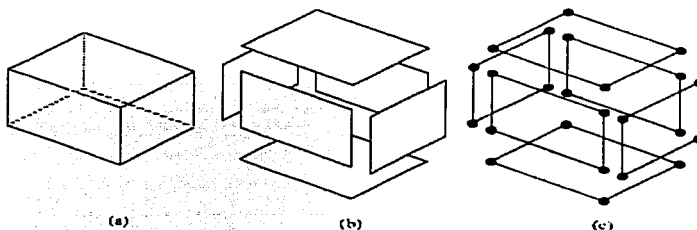


Figura 4. (a) vista de un sólido. (b) las superficies que componen el sólido. (c) las líneas y puntos que forman las superficies.

Figura 3.3 (a) vista de un sólido (b) las superficies que componen el sólido (c) las líneas y puntos que forman las superficies.

En nuestro modelo pretendemos hacer convivir ambos tipos de representaciones. Los objetos se definirán mediante CSG utilizando primitivas, para luego convertirse

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN







a B-Rep para su manipulación y despliegue. Sin embargo, en el estado actual del proyecto, se utiliza únicamente el operador CSCi de unión.

### 3.1.2 GENERACIÓN DE PRIMITIVAS PARAMÉTRICAS.

Las primitivas paramétricas están predefinidas en el universo, y para su generación únicamente se necesita especificar los valores de sus parámetros. Las primitivas paramétricas que se utilizan aportan la diversidad geométrica necesaria para la generación de objetos compuestos más complejos.

Los parámetros de diseño definen las propiedades geométricas de las primitivas. La siguiente tabla muestra las primitivas utilizadas en el proyecto con sus parámetros de diseño:

Primitiva	Vista de Alambre	Parámetros de diseño
Cilindro		radio
Paralelepípedo		Altura longitud sobre eje x longitud sobre eje y longitud sobre eje z
Cono		radio
Cono Truncado		altura radio mayor radio menor
		altura

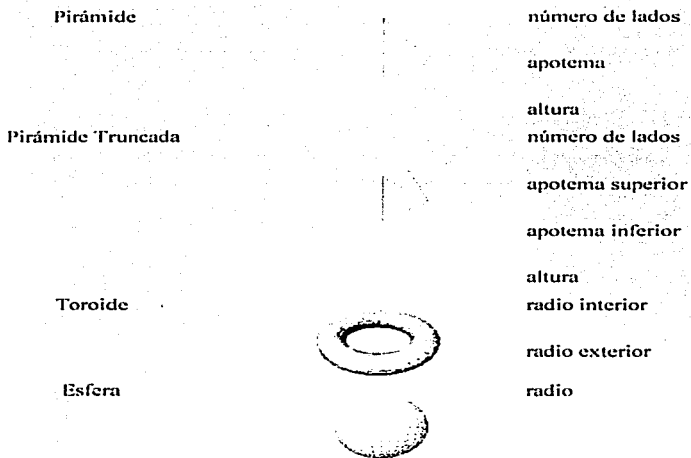


Figura 3.4 Propiedades geométricas de las primitivas

### 3.1.3 GENERACIÓN DE SÓLIDOS POR BARRIDO.

Un sólido de barrido se genera mediante la definición de un polígono, aplicándole un barrido de tipo lineal o radial.

Un sólido de *barrido lineal* se genera en base a la definición de un polígono cerrado. Los parámetros de construcción del sólido son, en este caso, los vértices del polígono la longitud del barrido  $L$ , que indica el desplazamiento a lo largo del eje. El polígono se define sobre el plano  $XY$ , y el barrido se efectúa a lo largo del eje  $Z$ . Este proceso se ilustra en la figura 3.5(1).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Un sólido de *barrido radial* se genera en base a la definición de un polígono. Los parámetros de construcción del sólido son los vértices del. El polígono generador de un barrido radial se define sobre el plano  $YZ$ , de tal manera que el barrido se realizará en torno al eje  $Z$ . Este proceso se ilustra en la figura 3.5(b).

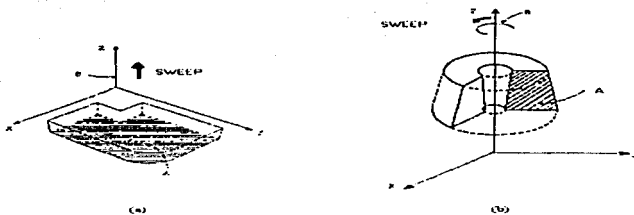


Figura 3.5 (a) barrido lineal (b) barrido radial

Figura 3.5 (a) barrido lineal (b) barrido radial

### 3.1.4 OBJETOS COMPUESTOS.

La siguiente fase en la generación de una escena en 3-D es la definición de agrupamientos de primitivas con el fin de generar objetos más complejos. En la figura 3.6 se muestra un objeto compuesto. La estructura jerárquica que representa las relaciones de unión entre objetos es conocida como árbol de pegado. El árbol de pegado determina las transformaciones que deben aplicarse a cada objeto para conformar el escenario global.

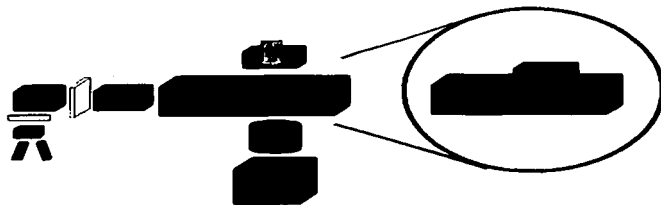


Figura 6. Generación de un objeto compuesto

### Figura 3.6 Generación de objeto compuesto

Los objetos compuestos generados pueden ser rígidos o articulados. Los *objetos rígidos* conservan siempre la posición relativa entre sus componentes. Los *objetos articulados* son unidos a través de articulaciones que permiten rotación o traslación entre componentes. En el árbol de pegado, los objetos articulados están unidos a través de relaciones especiales que conforman una cadena cinemática.

#### 3.1.5 CADENAS CINEMÁTICAS.

La función realizada por una articulación es la de controlar el movimiento entre los elementos enlazados a ella. Se tiene entonces que un mecanismo manipulador con  $n$  grados de libertad contiene  $n$  articulaciones, ó en términos más formales,  $n$  ejes de movimiento. Un eje de movimiento significa un grado de libertad en el que un cuerpo puede desplazarse. La cinemática es la que se encarga de definir, controlar e implementar el movimiento sobre cuerpos individuales.

Un manipulador consiste de elementos conectados entre sí por articulaciones. Estos elementos usualmente forman una cadena cinemática abierta, cuando se encuentran conectados en serie; sin embargo, es posible que se enlacen de forma paralela. El movimiento permitido por los enlaces puede ser, o una rotación angular, o una traslación rectilínea.

El modelo utilizado para el manejo de las cadenas cinemáticas es el creado por Denavit y Hartenberg [Denavit-Hartenberg 1955]. Este modelo es una técnica sistemática que permite establecer matrices de desplazamiento para cada par adyacente de elementos dentro de una articulación de un mecanismo [McKerow 1991].

La convención D-H se utiliza principalmente en los robots manipuladores, quienes tienen una cadena cinemática abierta en la que cada articulación dentro del mecanismo contiene solamente un grado de libertad, y dicha articulación es prismática o rotacional.

Un ejemplo de un robot manipulador se muestra a continuación. Aquí el objeto compuesto que forma el brazo del robot está integrado por varios cubos unidos con articulaciones prismáticas y rotacionales. Los dedos son parte de la pinza, están unidos a la base por articulaciones rotacionales. Las flechas, en el árbol de pegado de la derecha, muestran la dependencia cinemática entre cada par de piezas.

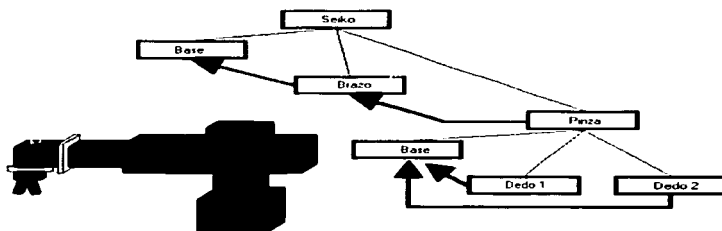


Figura 7 Cadena cinemática de un manipulador

Figura 3.7 Cadena cinemática de un manipulador

## CAPITULO IV

## 4- MANIPULADORES Y ROBOTS.

Los robots industriales tienen características parecidas a las máquinas CN pero una cinemática muy diferente. Las áreas de trabajo, las exigencias específicas y la programación son, así mismo, muy diferentes.

Igual de irreal es la idea de que algún día todo el personal operario de las instalaciones fabriles podría ser substituido por robots. Para que esto tuviera lugar en los próximos años, tendría que comenzar pronto una invasión de robots, lo que de momento no tiene visos de producirse. Las capacidades del ser humano para utilizar todos sus sentidos, sus manos, su permanente capacidad de aprendizaje de modo combinado y flexible para con ello tomar decisiones acertadas, cada vez más lógicas, y actuar como corrector en caso de necesidad no son imitables por los robots. En especial, los sentidos humanos, premisa indispensable para muchas tareas, están completamente ausentes en los robots industriales.

## 4.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES.

Un robot industrial está formado por hasta seis grupos constructivos principales::

1-Mecánica-cinemática

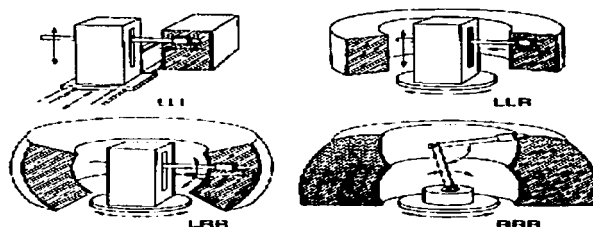


Figura 4.1 Diseño cinemático de los ejes principales de un robot industrial y área de trabajo resultante L = eje lineal R = eje rotatorio

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para la ejecución de los desplazamientos dentro del área de trabajo. Los tres ejes principales o básicos se disponen, según el tipo de robot, como ejes lineales o rotatorios. Como se desprende de las figuras, el modelo de robot de tres ejes rotatorios ofrece una mayor área de trabajo respecto a sus dimensiones mecánicas.



cartesiano



polar

**Figura 4.2**  
**Ejes lineales o**  
**rotatorios**

## 2-Pinza o mano

Para asir, sujetar, transportar y situar en la posición deseada las piezas o herramientas. Normalmente son necesarios para ello tres ejes principales para determinar cualquier punto en las tres coordenadas espaciales, así como tres "ejes de orientación" adicionales en la pinza para colocar la pieza en la posición adecuada mediante giro, inclinación y rotación de la misma:



**Figura 4.3 Tipos de**  
**pinzas**

### 3-Control

Para la introducción y memorización de los distintos procesos de programa teniendo en cuenta las conexiones, prioridades y sucesiones necesarias en los pasos de programa. La programación del proceso de desplazamiento tiene lugar externamente mediante la utilización de un lenguaje de programación textual específico del robot o bien mediante el sistema de aprendizaje in situ. Para determinadas aplicaciones presenta ventajas la combinación de ambos procedimientos, es decir, el desarrollo general del programa se elabora externamente y las distintas posiciones se "aprenden" después en el robot.

### 4-Accionamientos

Para regular el comportamiento de cada eje, así como para mantener su posición. Las exigencias dinámicas de los accionamientos son muy elevadas, teniendo en cuenta las enormes variaciones del comportamiento dinámico del robot, con piezas de distintos pesos y con desplazamientos de diferente magnitud en el área de trabajo.

### 5-Sistemas de medición

Para la medición de la posición o el ángulo de todos los ejes, y de la velocidad de cambio y la aceleración en los distintos ejes. Para ello se utilizan normalmente sistemas de medición incrementales, aunque en algunos casos son también imprescindibles los sistemas de medición absolutos. Esta necesidad se produce, por ejemplo, en robots de soldadura, para reconocer la posición de todos los ejes inmediatamente después de un fallo de la tensión. La utilización mixta de sistemas de medición incrementales y absolutos tiene lugar muy raramente.

### 6-Sensores

Para poder detectar y tener en cuenta influencias perturbadoras como modificaciones de la posición, diferencias en las muestras u otras perturbaciones exteriores que pudieran presentarse.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



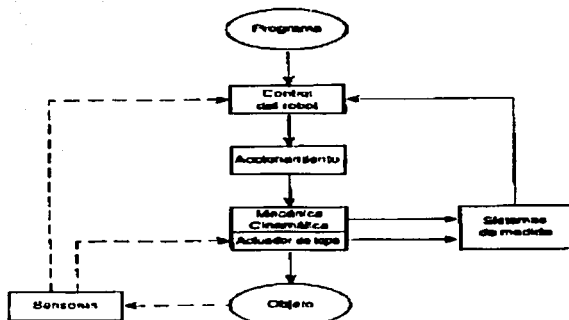
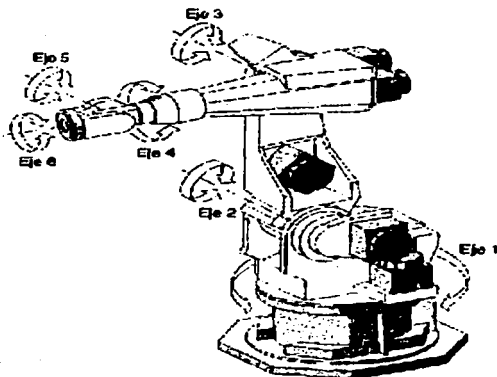


Figura 4.4 Elementos constructivos de un robot industrial

#### 4.2 PROPIEDADES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES.

Según la definición tradicional, los robots industriales son dispositivos de manipulación libremente programables, con diferentes grados de libertad (ejes), que pueden incorporar pinzas o herramientas.

En función del control utilizado están en situación de ejecutar movimientos y tareas más o menos complejas. Su característica básica es la rápida capacidad de adaptación a condiciones secundarias modificadas y a tareas distintas. Para ello, se elaboran en cada caso programas específicos que se memorizan en el control y se invocan y ejecutan, de acuerdo con el desarrollo del proceso, en cualquier secuencia.



**Figura 4.5 Robot universal típico**

La capacidad de los robots industriales en lo que se refiere a radio de acción, trayectorias posibles, velocidad y exactitud depende en primer lugar de su nivel técnico, que es muy variable.

Básicamente se distinguen tres tipos:

#### **1-Unidades de manipulación**

- Ofrecen sólo dos posiciones por eje. Su campo de utilización habitual lo constituyen las tareas de alimentación y montaje en la fabricación en serie, que permanece invariable durante un cierto período de tiempo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2-Robots con control de puntos

- Son prácticamente equivalentes a las máquinas-herramientas con control punto a punto. El brazo del robot se controla por puntos y en las distintas posiciones realiza una tarea determinada. Normalmente, los robots con control de puntos son suficientes para la manipulación de piezas.

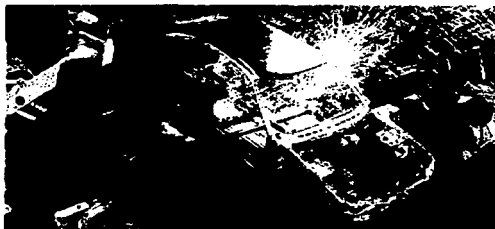


**Figura 4.6 Montaje de chips**

## 3-Robots con control de trayectoria

- Son comparables a las máquinas-herramientas con control de trayectoria, es decir, que el brazo del robot ejecuta desplazamientos de trayectoria programable y asume sobre la curva de trayectoria determinadas tareas como soldadura o pintado por pulverización.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura 4.7 Robots de soldadura**

También es esencial el hecho de que los robots puedan ser sincronizados para la utilización en combinación con máquinas-herramientas. Para ello se emplean señales de entrada de control del robot para poder tener en cuenta los siguientes **estados de la máquina**:

- Bloqueo activado / desactivado.
- Pieza amarrada / desamarrada.
- Palet orientado y bloqueado / desbloqueado.
- Sistemas de desplazamiento preparados / no preparados.
- Puerta del carenado de la máquina abierta / cerrada.
- Almacén intermedio o palc. lleno / vacío, etc.

Las premisas generales para la integración de robots industriales con máquinas-herramienta son muy distintas.

Es esencial que el brazo del robot alcance todas las estaciones de mecanizado y pueda asir todo tipo de piezas, en cuanto a dimensiones y peso, sin el menor problema.

Según el programa, la misma pinza está en situación de asir con mayor o menor fuerza.

### 4.3 CONTROL DE ROBOTS INDUSTRIALES



La condición más importante para la utilización rentable de robots industriales es su flexibilidad, es decir, su capacidad de adaptación a tareas distintas.

En los robots industriales esta propiedad viene determinada esencialmente por el control integrado y su programabilidad.

Los controles numéricos estándar para máquinas-herramientas de arranque son sólo parcialmente apropiados para el control de robots industriales, ya que sus requisitos se diferencian en algunos puntos.

- Resultan igualmente necesarios:
- Capacidad de memoria elevada.
- Posibilidad de subprogramas.
- Posibilidades de corrección de los programas.
- Entradas y salidas para funciones adicionales.
- Elaboración rápida de datos (ciclos de bloque cortos).

Por el contrario, no son necesarios:

- Una pantalla integrada.
- Una interfaz de usuario con teclado
- Funciones S programables.

Son necesarios, adicionalmente:

- Una programación específica del robot.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- La transformación de las coordenadas espaciales programadas en coordenadas de la máquina, es decir, que un algoritmo de transformación efectúe la interpolación lineal y circular de los desplazamientos axiales necesarios.
- Una adaptación automática de la aceleración de los ejes en función del peso de la pieza, la distancia entre puntos, la estabilidad y otros criterios.

#### 4.4 DISEÑO DEL CONTROL DE UN ROBOT.

Se rige por su estructura cinemática y, especialmente, por sus distintas aplicaciones previstas. Se distingue, en base al control, entre:

**4.4.1 DISPOSITIVOS DE ALIMENTACIÓN SENCILLOS** que recorren trayectorias predeterminadas sobre dos o tres, en ocasiones cuatro, ejes según un programa fijo.

La limitación del desplazamiento de los distintos ejes es ajustable mediante topes desplazables, no son posibles las posiciones intermedias (manipuladores).

Estos dispositivos sólo requieren controles de lo más elemental, sin sistema de medición ni regulación del accionamiento de los distintos ejes.

El desplazamiento del eje se acciona normalmente con cilindros neumáticos o hidráulicos, con cuya ayuda el eje puede alcanzar los topes en ambas direcciones.

La programación del proceso de desplazamiento se basa p. ej. en distribuidores de cruce o en elementos neumáticos equivalentes, la llamada fluidica.

Este tipo de robots son dispositivos sencillos, asequibles, y de elevadas velocidades de cambio, gran exactitud de posicionamiento y un máximo de cuatro ejes.

Para el cambio de programa han de fijarse de nuevo los topes y conectarse nuevamente los contactos de los diodos del distribuidor de cruce en función del desarrollo del programa modificado.

Cuando se utilizan autómatas programables es necesaria una adaptación del programa.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### **4.4.2 ROBOTS DE CONTROL POR PUNTOS CON POSICIONES PROGRAMABLES EN TODOS LOS EJES.**

Si bien cada eje está dotado de un sistema de medición y de un servo accionamiento, el desplazamiento programado de los ejes tiene lugar sin conexión de las funciones (interpolación) entre posición y posición.

La programación tiene lugar, a elección, por el procedimiento de aprendizaje o mediante introducción directa de los datos de las distintas posiciones.

El control necesario es sencillo y asequible.

#### **4.4.3 ROBOTS CON CONTROL DE TRAYECTORIA CON DESPLAZAMIENTOS LIBREMENTE PROGRAMABLES EN TODOS LOS EJES.**

Cada eje está dotado de un sistema de medición de posición y un servo accionamiento y puede programarse a cualquier valor entre los topes finales.

También puede programarse la velocidad de avance, de manera que, a diferencia de las unidades de manipulación, también se puede realizar una tarea durante el avance, por ejemplo soldar o recubrir.

#### **4.4.4 ROBOTS DE REPRODUCCIÓN.**

Otra aplicación típica de los robots es el pintado o barnizado.

La tarea consiste en repetir posteriormente y de forma idéntica un desplazamiento de la pistola pulverizadora realizado a mano.

Ello se consigue con controles que:

Registran los desplazamientos como impulsos en una cinta o un disco magnéticos y los repiten, o bien.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Descomponen los cambios de posición de cada eje en muchos vectores unitarios y proceden a la interpolación lineal de las mediciones absolutas de trayectoria.

Con ambos procedimientos se alcanza una muy alta exactitud de repetición de los movimientos originales.

Propiedades de los controles para robot.

De las distintas exigencias hasta ahora citadas se derivan las cinco características esenciales de los controles para robot:

#### 4.5 MEMORIA DE PROGRAMAS.

No sólo contiene el programa completo de desplazamientos y procesos y todas las informaciones adicionales, sino también el **programa fuente** original, mediante el cual se programó el proceso global. Esto tiene la ventaja de que las correcciones y modificaciones posteriores del programa son fáciles de realizar.

Mediante una **interfaz de datos** se garantiza la introducción y salida automática de programas, ficheros y tablas.

Todos los programas memorizados en el control del robot se pueden visualizar en una pantalla e invocar automáticamente en base al **nombre y el número del programa**.

Todos los programas pueden recuperarse o borrarse, así como recargarse automáticamente, uno por uno, mediante disquetes o conexión DNC.

##### 4.5.1 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA.

La mayor parte de los controles para robot no utilizan la estructura de programación según DIN 66 025, habitual en los controles de las máquinas-herramientas. Las órdenes de desplazamiento, trayectoria, velocidad y deceleración o detención se introducen en un lenguaje de programación especial y específico para robots.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



También son necesarias otras funciones de control, como

- Transformación de coordenadas espaciales en coordenadas de máquinas.
- Seguimiento de piezas desplazadas.
- Apilamiento y palletización de las piezas.
- Respeto de las prioridades.
- Procesamiento de las señales de los sensores.

#### 4.5.2 PROGRAMACIÓN.

Actualmente la programación de los robots industriales se realiza normalmente mediante el procedimiento mixto.

El programador fija en primer lugar el proceso general de los desplazamientos mediante un lenguaje de programación textual específico de robots, dejando abiertas las posiciones no exactamente definibles.

Estas posiciones se introducen después por aprendizaje in situ, es decir, el usuario/programador lleva la herramienta o la pinza, por seguimiento manual, a la posición correcta y la transfiere al programa de procesamiento mediante la pulsación de una tecla.

El robot queda listo para su funcionamiento en cuanto se han introducido todas las posiciones abiertas.

Los desplazamientos complicados, por ejemplo a lo largo de una trayectoria no definible matemáticamente, pueden introducirse también por este método como sucesión de puntos. En el funcionamiento automático del futuro, los distintos puntos serán sobrepasados en rápida sucesión y sin detenciones.

Los controles de robots modernos ofrecen además la posibilidad de corregir distintas posiciones, o incluso el desarrollo total, de manera sencilla. Con este objetivo se puede conectar transitoriamente un dispositivo de entrada con interfaz de usuario.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Dado que este dispositivo no es necesario para el funcionamiento automático, una misma unidad queda disponible para distintos robots. Los robots de configuración cilíndrica, esférica o articulada requieren un control con programa de conversión para transformar las posiciones y los desplazamientos programados de coordenadas espaciales a coordenadas de máquina (y viceversa). Sólo mediante esta función se pueden programar de modo sencillo las rectas o círculos y mantener la velocidad de trayectoria constante sobre el trayecto completo.

Existe además la necesidad de que el robot lleve una herramienta, como una pistola de soldadura, a lo largo de toda la trayectoria y manteniendo constantemente un ángulo determinado. Esta función se denomina **orientación** y precisa una gran cantidad de cálculo en el control del robot.

El control ha de estar además en situación de satisfacer esta exigencia para cualquier cinemática del robot.

Otra tarea del control de un robot industrial es la **sincronización** para trabajar sobre objetos en movimiento, es decir, que el objeto tratado por el robot no está detenido, sino que se desplaza constantemente, p. ej. sobre una cinta sinfín que pasa por delante del robot. En este caso se ha de registrar constantemente la situación de la pieza y el control la ha de tener en cuenta para el desplazamiento de los ejes del robot.

Se dispone también de sistemas de programación potentes, similares a los de CAD, con simulación gráfica dinámica en pantalla del proceso de los desplazamientos.

Estos sistemas ofrecen también funciones de zoom para el mejor reconocimiento de detalles, así como las vistas desde cualquier ángulo.

Según indica la experiencia, en la mayor parte de los casos es inevitable una corrección para el afinamiento del programa, de manera que el usuario debería prestar atención a disponer de una buena capacidad de edición.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 4.5.3 CONEXIONES LÓGICAS.

Entre ellas se encuentran las funciones de espera en una posición de seguridad prefijada, las condiciones de detención por emergencia, la salida de señales a posiciones o partes de programa determinados y las instrucciones especiales.

Se han de incluir entre ellas los tiempos de espera condicionados por el proceso, las condiciones de colisión y los saltos de programa, que deben añadirse en función de la aplicación concreta del robot.

La recepción del robot a señales internas o externas no está contenida de modo estándar en el programa de funcionamiento del control del robot, ya que se rige por el caso específico y puede ser definida por el usuario especialmente para cada instalación.

### 4.5.4 CONEXIÓN DE SENSORES.

Los sensores utilizados en la robótica tienen distintas tareas, normalmente de corrección, y sus señales deben ser procesadas lo más rápidamente posible por el control del robot.

## 4.6 POSIBILIDADES DE APLICACIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES.

El concepto de robot industrial nació en 1945 por una solicitud de patente de Georg C. Devol. En ella se describe el diseño de un brazo mecánico con control digital y su utilización en lugar de la mano de obra en algunos casos de aplicación elemental en la industria: la también llamada "manipulación de material".

Entre ellos están la carga y descarga de máquinas-herramienta, es decir, la alimentación y recogida de piezas en la siguiente secuencia:

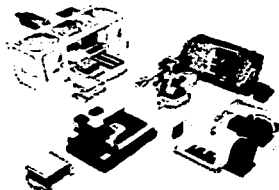
- Recogida desde un palet.
- Espera hasta la finalización de la pieza que se está mecanizando.
- Toma y extracción de la pieza terminada.
- Carga de la siguiente pieza que mecanizar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Colocación de la pieza terminada sobre otro palet o transferencia a otra estación de mecanizado posterior.

Se llegó así a la disposición clásica del robot en el centro de las máquinas y estaciones de paletizado dispuestas circularmente.

Las piezas en bruto se introducen, por ejemplo, en la máquina para la mecanización de los extremos y luego, sucesivamente, se amarran en dos tornos, a continuación se recogen y se transportan a la taladradora, para seguidamente medirlas y, finalmente, apilarlas en los palets para piezas terminadas. El número de máquinas alimentadas por un robot viene determinado por los tiempos de ciclo del mecanizado.



**Figura 4.8 Multifuncionalidad de un robot industrial**

La productividad global de la célula de producción no debe verse perjudicada por la multij.licitud de tareas del robot.

Si el tiempo de ciclo por pieza es muy grande y la disposición circular de las máquinas en el área de trabajo del robot no es suficiente para la colocación de más máquinas, se pasará a la disposición lineal.

La guía de la trayectoria para el desplazamiento longitudinal del robot puede tanto estar colocada en el suelo como suspendida sobre las máquinas. Si la cadencia de las máquinas-herramientas es demasiado corta para un robot industrial, podrían utilizarse más robots para la carga y descarga de las máquinas.

Además, cada robot podría disponer de dos pinzas en lugar de una, capaces de asir independientemente entre sí la pieza en bruto y la pieza terminada. De este modo es posible una manipulación rápida en todas las máquinas de las piezas mecanizadas y sin mecanizar y se reduce el tiempo de ocupación del robot.

- Los robots se utilizan también crecientemente para el **desbarbado de piezas mecanizadas**. Para esta tarea se han de cumplir **tres condiciones**: Una cinemática con **estabilidad mecánica** suficiente.
- Un **control de trayectoria** que garantice un desplazamiento permanente y sea programable **por aprendizaje**.

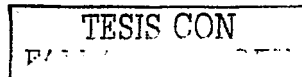
Herramientas o pinzas que dispongan de una **elasticidad pasiva** limitada o bien que se **giren de modo controlado** durante el mecanizado con la ayuda de un sensor de fuerzas.

#### 4.6.1 CRITERIOS PARA LA UTILIZACIÓN DE ROBOTS INDUSTRIALES.

En muchos casos es deseable, por razones laborales o de rentabilidad, separar al hombre de la máquina a la que atiende y que le opone su ritmo .

Contemplado de modo realista, ello no significa otra cosa que la implantación de puestos de trabajo más humanos en un caso o la sustitución del ser humano, propenso al cansancio y a las indisposiciones, en el otro.

Si, por ejemplo, ya no es capaz de soportar el ritmo, incrementado a límites inhumanos, de la máquina o si las condiciones ambientales en el puesto de trabajo ya no son admisibles por calor, vapores o peligros en general, ello podría ser una situación típica para la utilización de un robot industrial.



El ser humano queda liberado de tareas insanas, monótonas o peligrosas y los caros dispositivos de producción pueden ser utilizados con más eficiencia o no tienen que ser renovados para alcanzar la producción máxima.

La actividad en el taller vuelve a tener mayor valor para la persona y, al mismo tiempo, se incrementan la seguridad del puesto de trabajo y de la empresa en la competencia a nivel mundial.

El personal del taller prepara durante el turno de día las piezas y herramientas, repara piezas defectuosas o cambia piezas de repuesto, controla niveles de aceite, refrigerante y evacuación de virutas, y prepara el turno de noche sin personal.

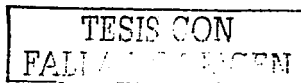
Los ordenadores controlan el proceso completo de fabricación, verifican las dimensiones de las piezas fabricadas, ajustan automáticamente los valores de compensación de las herramientas y registran las incidencias acaecidas durante las 24 horas de la jornada de producción.

### Resumen.

Como se desprende de un estudio del mercado, el interesado puede elegir actualmente entre más de 100 tipos de robots de 50 fabricantes. Los distintos modelos se diferencian fundamentalmente según:

- Dimensiones y capacidad de carga del robot.
- Cinemática y número de ejes.
- Características de control y
- Posibilidades de utilización del dispositivo completo.

Es de destacar que los fabricantes de robots ofrecen sus dispositivos sólo con un control, ahorrando al comprador el dilema de la elección. Ello es comprensible teniendo en cuenta el enorme gasto necesario para el desarrollo del software para la adaptación óptima del control a cada robot concreto.



Si bien los robots de control numérico utilizan en principio el mismo concepto de control que las máquinas CN, en el área de funciones y, especialmente, en la programación, existen notables diferencias. No obstante, los robots para una sola tarea, la carga y descarga de máquinas, también pueden ser controlados directamente por el CNC de la máquina-herramienta.

Cada grado de libertad del robot corresponde a un eje CN de la máquina-herramienta, con su propio servo accionamiento y sistema de medición.

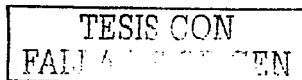
En los sistemas de fabricación flexible, los robots trabajan conjuntamente con las máquinas CN o bien se utilizan directamente para la mecanización de piezas. Cada vez se utilizan más robots también en el montaje automático de piezas. El tipo de control utilizado depende en primer lugar de la tarea del robot.

Del mismo modo que una máquina-herramienta de control numérico, el robot parte del hecho de que las condiciones del entorno permanecen siempre inalteradas. En las máquinas de control numérico, las herramientas defectuosas, los topes sueltos o la falta de refrigerante pueden llevar a piezas defectuosas, roturas de herramientas e incluso a daños en la máquina. Por ello son necesarios los dispositivos de supervisión adecuados.

Cuando un robot industrial está programado para la soldadura de una carrocería de automóvil, el programa se desarrolla normalmente aunque la pieza se encuentre desplazada respecto su posición normal e incluso si no se encuentra allí. La consecuencia sería un daño en la pieza o en el robot. La recopilación y observación exactas de las condiciones de proceso son aún más necesarias en el caso de los robots industriales que en el de las máquinas-herramientas CN.

Para conseguir un desarrollo de la fabricación automática exento de problemas los robots industriales precisan los adecuados sensores. Con su ayuda, se pueden detectar y corregir inmediatamente situaciones problemáticas o de peligro y evitar daños mayores o paradas.

Si pretendiéramos prever sensores para todas las posibilidades de error que pudieran presentarse, los costes serían impagables. Por ello, si a pesar de haber tomado todas las



medidas se producen perturbaciones, debe intervenir el operario para eliminar las causas y sus consecuencias. El personal del taller prepara durante el turno de día las piezas y herramientas, repara piezas defectuosas o cambia piezas de repuesto, controla niveles de aceite, refrigerante y evacuación de virutas, y prepara el turno de noche sin personal.

Los ordenadores controlan el proceso completo de fabricación, verifican las dimensiones de las piezas fabricadas, ajustan automáticamente los valores de compensación de las herramientas y registran las incidencias acaecidas durante las 24 horas de la jornada de producción

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## 5.-CONCLUSIONES

Con el estudio y preparación de cada individuo conforme a sus propias capacidades se puede solucionar un problema tan grande de la gente que tiene escasas posibilidades de usar tan genial disciplina o que se ha visto desplazada en sus empleos por la automatización de las industrias. De la insistencia por parte de científicos y principalmente de los ingenieros por desarrollar más esta área tecnológica surge el problema ya mencionado.

Y es a causa de las necesidades que la ciencia y la tecnología no se estanca; por eso es necesario erradicar en lo posible la mayor parte de problemas para que sin excepción todos podamos gozar de los beneficios de la robótica.

Este es el fin, que en un futuro nosotros como ingenieros encontremos la solución del problema y no haya perjudicados, pues en la actualidad existen y seguirán existiendo más y mejores tecnologías que se fabricaran con el propósito de beneficiar a la humanidad y no de perjudicarla.

Los robots industriales ocupan un lugar destacado dentro de la automatización de la producción y su papel se ha ido consolidando en los últimos años. Después de un descenso en las ventas, en el conjunto del mundo que tuvo su estancamiento en 1993, el mercado de robots ha seguido una evolución creciente. No obstante, la industria automotriz continúa siendo el sector mayoritario en cuanto a utilización de robots. Si bien la soldadura en sus diversos tipos sigue siendo un campo muy importante de aplicación, el número de robots dedicados al montaje en el conjunto del mundo es mayoritario. En nuestro país, la introducción de los robots en aplicaciones más específicas es todavía muy reducida y constituye una asignatura pendiente de nuestra industria.

Aunque resulta difícil hacer previsiones de futuro en el desarrollo de la robótica, algunos temas destacan de manera clara: las exigencias crecientes de fiabilidad y eficiencia, la interfase hombre-máquina a través de sistemas gráficos y programación fuera de línea, la importancia creciente de los sensores y de la integración sensorial, la interconexión entre máquinas, la coordinación entre robots y otras máquinas, y la tele-operación. Igualmente, es importante mencionar los nuevos campos en expansión de aplicación de la robótica

TESIS ON  
FALLA DE ORIGEN

## CONCLUSIONES

---

como la exploración, la agricultura, la industria alimentaria y la medicina, que complementarán en el futuro la ya tradicional robótica industrial.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

6.-BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Robótica Industrial: Tecnología, Programación y Aplicaciones. Groover Mikel P., Weiss Mitcheli, Roger N, y Odney Nicholas G. Mc. Graw Hill, 1990.
- [2]. Robótica: Control, Detección, Visión e Inteligencia Fuk. S., Gonzales R. C., Lee C. S. G. Mc. Graw Hill, 1988.
- [3]. Robótica Práctica Tecnología y Aplicaciones José Ma. Angulo Usategui. Paraninfo Madrid, 1986.
- [4]. Información Técnica y Manual de Prácticas Micro Robot 2000 Alecoop Edición Mc. Graw Hill.
- [5]. Introducción a la Computación y a la Programación Estructurada Guillermo Levine 2ª Edición, 1994. Mc Graw Hill.
- [6]. Tratamiento Digital de Imágenes Rafael C Gonzáles y Richard E. Woods. Addison-Wesley/ Díaz de Santos, 1992.
- [7]. Digital Image Processing Pratt W. K. Wilwy, 1991.
- [8]. Informática Básica E. Alcalde, M. García y S. Pañuelas Mc. Graw Hill.
- [9]. Diccionario de Computación. Alan Freedman 5ª Edición, 1989. Mc. Graw Hill.
- [10]. Información sobre Robótica. <http://www.cybernomo.com/scm/acceso/sensor.htm>
- [11]. Imágenes sobre Robots. <http://www.ciencias.ens.vabc.mx/~agomez/ia>
- [12]. Información sobre visión <http://www.bucanero.ugr.es/wwwcurso/ccordoba/node1.html>
- [13]. Información sobre Robótica.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFIA

---

- [14] *World Robotics 1998*. United Nations and International Federation of Robotics (IFR). New York and Geneva, 1998. 299 pp. ISBN 92-1-100791-7
- [15] *Proceedings 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Press, 1997. 3,876 pp. ISBN 0-7803-3612-7
- [16] *Proceedings 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Press, 1998. 4,008 pp. ISBN 0-7803-4758-7 (CD-ROM) 0-7803-4300-X (paper)
- [17] *Proceedings 28<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Robots (ISIR)*. Detroit, 1997. pp. ISBN
- [18] *Proceedings 28<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Robots (ISIR)*. Birmingham, 1998. pp. ISBN

TECIS CON  
FALLA DE ORIGEN