



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

PERSPECTIVAS DE LA ROBOTICA
INDUSTRIAL EN MEXICO

T E S I S

Que para obtener el Título de
ING. MEC. ELECTRICISTA (AREA INDUSTRIAL)

P r e s e n t a

JOSE ESTEBAN MEJIA COVARRUBIAS

Dir de Tesis: Dr. JAIME GOMEZ DE SILVA



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.

I N D I C E

" PERSPECTIVAS DE LA ROBOTICA INDUSTRIAL EN MEXICO "

| | Pag. |
|--|------|
| INTRODUCCION | 2 |
| PRIMERA PARTE.- ASPECTOS TECNOLOGICOS | |
| I.- UNA MAQUINA LLAMADA ROBOT | |
| 1.- INTRODUCCION | 6 |
| 2.- CONTROL MOTOR | |
| 2.1.- MODELO GEOMETRICO | 17 |
| 2.2.- MODELO CINEMATICO | 31 |
| 2.3.- MODELO DINAMICO | 43 |
| 2.4.- ESQUEMAS DE CONTROL | 60 |
| 3.- APRENDIZAJE | |
| 3.1.- ADQUISICION DE TRAYECTORIAS | 75 |
| 3.2.- EVOLUCION DE LA PROGRAMACION | 89 |
| 4.- PERCEPCION SENSORIAL | |
| 4.1.- SENSORES POR CONTACTO | 112 |
| 4.2.- SENSORES DE PROXIMIDAD | 114 |
| 4.3.- TELESENSORES | 115 |
| 5.- INTELIGENCIA ARTIFICIAL | |
| 5.1.- GENERACION DE PLANES DE ACCION | 123 |
| 5.2.- VISION ARTIFICIAL | 125 |
| II.- AREAS DE INVESTIGACION Y PERSPECTIVAS DE DESARROLLO INDUSTRIAL EN MEXICO | 128 |
| SEGUNDA PARTE.- ASPECTOS SOCIO-ECONOMICOS | |
| III.- EL ROBOT COMO HERRAMIENTA DE PRODUCCION | |
| 1.- INTRODUCCION | 138 |
| 2.- EL ROBOT DENTRO DEL DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACION INDUSTRIAL | 147 |
| 3.- METODOLOGIA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA SELECCION E IMPLEMENTACION DE ROBOTS INDUSTRIALES | 156 |
| 4.- APLICACIONES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES | |
| 4.1.- TRAYECTORIAS PUNTO-A-PUNTO | 184 |

| | |
|------------------------------|------|
| | Pag. |
| 4.2.- TRAYECTORIAS CONTINUAS | 186 |
| 4.3.- CONTROL PERCEPTUAL | 190 |
| CONCLUSIONES | 197 |
| BIBLIOGRAFIA | 200 |

INTRODUCCION

Una de las áreas de investigación que más ha sobresalido durante - los últimos años dentro del campo de la Automatización Industrial, tanto por los adelantos tecnológicos alcanzados como por los efectos sociales ocasionados, es sin duda, el área de Robótica Industrial.

La serie de adelantos tecnológicos logrados en esta área ha permitido la obtención de máquinas multifuncionales y reprogramables, - capaces de realizar tareas de inspección, manejo de materiales o - ensamblados automáticos, con gran precisión y exactitud; el ROBOT INDUSTRIAL, cuya máquina ha ocasionado modificaciones en las lí- - neas de producción, proporcionando una gran flexibilidad de funcio- - namiento, característica principal que la distingue de las máqui- - nas automáticas especializadas utilizadas hasta ahora.

Bajo el término de ROBOTICA INDUSTRIAL, se conoce una nueva tecnolo- - gía que se ocupa del diseño, el control, la programación y el es- - tudio de las aplicaciones de los robots industriales.

Una de las características más importantes de esta nueva tecnolo- - gía, es que el industrial ya no solo posee la capacidad de diseñar su sistema productivo, sino también la de diseñar las característi- - cas de funcionamiento de las "operaciones" que integran tal siste- - ma. En base a esto, será tarea indispensable de la persona encar- - gada de diseñar un sistema productivo a base de robots, la de cono- - cer todos los factores, tanto técnicos como socio-económicos, que - determinen el funcionamiento de tales máquinas.

A partir de esto, ha sido conveniente dividir el presente trabajo en dos partes principales: Los Aspectos Tecnológicos y Los Aspec- - tos Socio-Económicos.

Por aspectos tecnológicos se entenderá todo lo relacionado a los - conocimientos científicos y teóricos en que se basa esta nueva tec- - nología. En esta parte se desarrollará un programa general de los - conceptos más importantes que se relacionan con el diseño, control y programación de los robots industriales; así como un estudio de los trabajos desarrollados en las áreas de Inteligencia Artificial y Percepción Sensorial que han permitido la obtención de máquinas denominados Robots inteligentes, los cuales poseen una mayor flexi- - bilidad y son capaces de tener conciencia de su medio ambiente, lo - que les permite tener una mayor iniciativa en la realización de -- sus tareas.

Pero, ¿cual es la posición de México ante esta nueva tecnología?. Para responder un poco a esta pregunta, se presenta un panorama, aunque no exhaustivo pero sí representativo, de los trabajos de investigación que se están realizando en esta área, en algunos de los principales centros de investigación del país.

Otro de los aspectos a considerar en la utilización de esta nueva

tecnología, es saber cuando y cómo se debiera seleccionar a los robots industriales con respecto a los diferentes niveles de automatización existentes. Para lograr este objetivo, se ha elaborado una metodología que sirva de apoyo para la toma de decisiones en la selección e implementación de un robot industrial. Para así, de esta manera, poder aprovechar al máximo los beneficios que pueda proporcionar esta tecnología.

Por otra parte, la introducción de los robots industriales a los sistemas productivos, ha sido el resultado de una serie de cambios que han sufrido los procesos de fabricación desde los inicios de la Revolución Industrial del siglo XIX, hasta nuestros días; cambios que han respondido a una serie de factores tanto económicos como sociales que se han conjuntado en un momento determinado dentro del desarrollo económico de un país.

El objetivo de hacer un estudio de estos cambios socio-económicos, es el de poder determinar si México cuenta con las características socio-económicas que permitan la introducción de esta nueva tecnología a sus sistemas productivos, de tal manera que pueda absorber de una manera positiva las ventajas que puede representar la utilización de esta tecnología hoy disponible y probada en los países industrializados.

L

PRIMERA PARTE :
=====

ASPECTOS TECNOLOGICOS
=====

" La primera revolución industrial hizo posible la utilización a gran escala del motor de vapor, el motor eléctrico y finalmente el motor de combustión interna, reemplazando los músculos del hombre y desplazandolo de algunos puestos de trabajo. De la misma manera, se puede pensar en una segunda revolución industrial que a partir de los avances de la electrónica y de la automatización, ponen a disposición de las máquinas la energía mental almacenada del hombre, devaluando con esto, el cerebro del hombre, al menos en sus decisiones más simples y más frecuentes. Si se considera la realización de ésta segunda revolución, el ser humano de talento mediocre no tendrá otra cosa de que disponer para obtener su supervivencia. Una pregunta inmediata sería saber si formamos una sociedad fundada sobre valores humanos como la compra y venta de mercancías

N. Wiener

I.- UNA MAQUINA LLAMADA ROBOT

LAS LEYES DE LA ROBOTICA

1. - Un robot no debe dañar a un ser humano o, por negligencia, dejar que un ser humano sufra daño.
2. - Un robot debe obedecer las ordenes que le son dadas por un hombre, exceptos cuando éstas contravengan la primera ley.
3. - Un robot debe proteger su propia existencia, hasta donde esta protección no este en conflicto con la primera o segunda ley.

ISAAC ASIMOV

1.- INTRODUCCION

Durante los últimos años, los laboratorios de investigación y de desarrollo en procesos automáticos de fabricación, transporte, distribución, control y cálculo han llegado a un punto en donde las características de funcionamiento han alcanzado un nivel cualitativamente nuevo. Ya no se trata solo de un progreso más en la mecanización sino de un avance dentro del desarrollo tecnológico cuyas consecuencias han traído cambios considerables dentro del comportamiento socio-económico : LA AUTOMATIZACION.

La automatización tiene por sí misma una historia ancestral ; son numerosas las leyendas que atestiguan el deseo del hombre por obtener determinados beneficios como resultados de acciones humanas o animales, por medio de dispositivos artificiales; como el baron Von Kempelen a principios del siglo XIX que logró recorrer el mundo gracias a la creación de un autómeta que pretendía imitar las funciones del ser humano; o las obras de arte de Jacques de Vaucanson que a principios del siglo XVIII pretendía construir un androide con todas las apariencias humanas, pero que por carencias económicas, no logró llevar a cabo. Obras de arte todas ellas, que sirvieron de inspiración a otros diseñadores de la época, aunque nunca obtuvieron resultados tecnológicos concretos.

Para los técnicos de la época antigua oriental u occidental, un automático era aquel sistema que se accionaba a sí mismo, es decir, que disponía de su propia fuente de energía, integrada a sí mismo o a un dispositivo asociado.

A principios del siglo XIX, en sus Principios de la Filosofía del Derecho, Hegel escribió posterior a los trabajos de Adam Smith; "La abstracción de la producción hace al trabajo cada vez más automático y finalmente es posible que el hombre sea excluido del sistema productivo y que la máquina lo reemplace". Esta suposición banal se ha convertido en los últimos años en una realidad.

Si la máquina llega a reemplazar al hombre, será por una razón que Marx había ya definido en su obra "El Capital", y que se refiere a que la máquina es accionada y operada automáticamente.

Los progresos en la tecnología referentes a los procesos de fabricación, iniciados hace más de un siglo, han logrado el desarrollo de dispositivos automáticos que han permitido una mayor utilización de los recursos disponibles. De esta manera, un conjunto de mecanismos automáticos han llegado a formar por sí mismos un gran autómeta que es accionado a sí mismo mediante un motor que se encuentra integrado a su estructura. Autómeta que es capaz de realizar todos los movimientos necesarios para la ejecución de una tarea determinada (pintura, soldadura, ensamblado, etc.) sin la ayuda del hombre.

A partir de esto, en los últimos años, los campos agrícolas, las minas y los laboratorios de investigación científica de los países altamente industrializados, han empezado a utilizar autómatas electromecánicos construidos para realizar labores rutinarias o demasiado peligrosas para el hombre, con notables ventajas económicas y gran confiabilidad. Este tipo de máquinas evoluciona rápidamente e incrementa su número en forma explosiva.

El término autómata de origen griego (que se impulsa o se mueve por sí mismo) define a una máquina que imita los movimientos, las funciones o los actos del ser humano. El término robot por el contrario, proviene de lenguas de origen eslavo y se relaciona con la noción de trabajo. Aunque el término robot es utilizado para describir ciertos dispositivos mecánicos que poseen atributos generalmente asociados con el ser humano, o "humanos" que presentan una conducta similar a las máquinas; se piensa a veces en relación con este término, en Frankenstein o en R2D2 (Artoo Deetoo) de la "Guerra de las Galaxias", versiones modernas del mito de las máquinas antropomorfas.

Por otra parte, el origen de la palabra ROBOT es atribuido a Karel Chapek, en su obra "R.U.R" (Rossum's Universal Robot) escrita a principios de los años veinte (1), en donde utilizaba un humanoide metálico que realizaba trabajos físico-mentales y que describía la situación de los obreros de la época.

De una manera general, el término ROBOT se ha visto desde dos puntos de vista diferentes. La primera se refiere a la figura "idealizada" del robot, que ha sido proporcionada por los escritores de ciencia-ficción y por la otra, el término ROBOT utilizado en ingeniería y en el área industrial, que describe a una clase de máquinas, las cuales son capaces de realizar un determinado número de tareas específicas del hombre. Es importante observar en este caso que la FUNCION y no la APARIENCIA es lo que define al robot.

Estrictamente hablando, un robot es una máquina automática reprogramable que por lo mismo, es capaz de realizar por sí sola una tarea señalada, aún en presencia de cambios en el medio ambiente. Esta máquina no tiene por que ser antropomorfa, aunque un gran número de estas lo es. Tal es el caso de los robots manipuladores, esto es, de las máquinas de arquitectura articulada, generalmente destinadas a ejercer funciones propias de los miembros humanos. Por extensión se aplica el término robot a las máquinas articuladas, sin considerar el grado de automatización que posean. Así, es práctica común emplear indistintamente los términos ROBOT, ROBOT MANIPULADOR o MANIPULADOR.

A través del desarrollo de las investigaciones realizadas en el área de ROBOTICA INDUSTRIAL, han surgido una serie de definiciones para expresar lo que se entiende por ROBOT.

Una primera definición fue propuesta por la "Robot Institute

of America" (RIA), (2) sobre el tema de investigación en robótica; "Un robot es un mecanismo automático, adaptable a un medio ambiente complejo, reemplazando o prolongando una o más funciones del hombre en su acción sobre el medio ambiente". La palabra clave es la palabra "adaptable"; la adaptabilidad permite al robot ejecutar una tarea específica en un medio ambiente variable.

Otra de estas definiciones es la del Webster's que define a un robot como :

- Una máquina con características antropomórficas que realiza funciones mecánicas generalmente asignadas al hombre, pero que carece de sensibilidad

- Un dispositivo automático que realiza funciones generalmente desempeñadas por el hombre y que opera con características similares a la inteligencia humana

- Un dispositivo mecánico guiado por controles automáticos.

Una de las definiciones más recientes de lo que significa un robot, proporcionada por la RIA (3) dice: "un manipulador funcional, reprogramable, destinado a mover materiales, partes, instrumentos o artefactos especializados, a través de diversos movimientos enfocados a la ejecución de diversas tareas". En esta definición, multifuncional y reprogramable son las palabras claves.

En las definiciones anteriores se puede observar una diferencia en las características de funcionamiento de los diferentes manipuladores que se han diseñado, creando una cierta confusión para poder determinar el grado de automatización que posee cada uno de ellos. Teniendo en consideración este punto, resulta conveniente elaborar una escala de niveles de automatización de los diferentes mecanismos que se han desarrollado desde los inicios de la revolución industrial hasta nuestros días, para poder establecer la diferencia entre uno y otro.

- Herramienta manual accionada por fuerza motriz.- este nivel corresponde a todas aquellas máquinas que son accionadas por una fuerza motriz (motor), reemplazando con esto la acción muscular del hombre sobre el accionamiento de la máquina; sin embargo, el control efectivo de la misma esta bajo su dominio.

- Máquina-herramienta de ciclo de operación invariable (secuencia fija).- en este nivel se encuentran todas las máquinas que son capaces de realizar de una manera repetitiva y automática una operación única (secuencia de trabajo fija) entre límites de funcionamiento determinados. Una de las desventajas más importantes que presentan este tipo de máquinas es que si se desea realizar otro tipo de operación para la cual fue diseñada, es decir, si se quiere variar la secuencia de trabajo, sera necesario realizar modificaciones en su constitución física.

- Máquina de secuencia programable.- una de las ventajas más importantes de este tipo de máquinas con respecto a las anteriores

res es que pueden realizar una serie de operaciones con secuencias variables con solo reprogramar en su memoria los puntos de consigna que integran la operación, que se desea realizar, sin tener que modificar su constitución física.

-Máquinas que modifican su funcionamiento adaptándose a las características del medio ambiente.-uno de los progresos más importantes en el campo de la automatización es la construcción de máquinas que modifican sus funcionamiento (velocidad, posición, dirección, etc.) en base a la información que reciben del medio

ambiente a través de dispositivos llamados sensores, estableciendo sistemas de retroalimentación para generar las señales de control de los diferentes mecanismos que integran la máquina. De esta manera, al tomar la máquina más conciencia de su medio-ambiente adquiere la capacidad de tomar decisiones logrando disponer de una mayor independencia.

De la misma manera, se puede establecer una serie de etapas de desarrollo que han sufrido los robots industriales desde sus inicios hasta los robots más sofisticados que se han desarrollado en la actualidad. En el caso de los robots se habla de generaciones, para designar las etapas de evolución que han sufrido así, se habla de Telemanipuladores, Robots de primera, segunda y tercera generación.

Telemanipulador.-

El telemanipulador o "telecheric" es un dispositivo que permite al operador realizar una tarea a distancia; fue desarrollado durante la segunda guerra mundial para el manejo de materiales radioactivos. Fue diseñado para sustituir las manos del operador y esta integrado por dos manipuladores, de los cuales, uno es controlado directamente por el operador (llamado maestro) y otro geoméricamente similar al primero (llamado esclavo) es colocado en el medio ambiente de trabajo.

Los movimientos del maestro son repetidos por el esclavo el cual se encuentra acoplado, ya sea mecánicamente o electricamente, con un determinado número de grados de libertad para proporcionar una posición y orientación arbitraria al dispositivo. Ya que las señales de acoplamiento pueden ser transmitidas a distancia, esto ha permitido la aplicación de este principio o trabajos que se realizan en ambientes submarinos o espaciales.

En 1947 se desarrolló el primer manipulador servo-electrico, (4) de tal manera que el esclavo era servo-controlado para que siguiera la posición del amo.

En 1948, un año después de haberse introducido el telemanipulador de posición controlada, un nuevo sistema de manipulación fue desarrollado (4) en el cual, las fuerzas ejercidas por el dispositivo de sujeción o herramienta de trabajo podían ser re-

veladas al operador mediante la retro-acción del esclavo, el operador podía detectar de esta manera la fuerza apropiada requerida para sujetar y mover una pieza. A este tipo de dispositivos también se les conoce como manipuladores no-automáticos, distinguiéndose entre ellos los manipuladores de ciclos determinados manualmente de los telemanipuladores. Los primeros son equipos de control manual que eliminan los efectos de la gravedad de las cargas que manejan gracias a un sistema especial de equilibrio; su brazo es guiado directamente por el operador mientras que el brazo de un telemanipulador es guiado a través de un dispositivo electrónico; todos los movimientos efectuados por el operador sobre estos dispositivos, se reproducen fiel e instantáneamente en el brazo colocado a distancia.

Robots de la Primera Generación.-

En esta categoría se encuentran los manipuladores de movimientos integrados mecánicamente o manipuladores de secuencia fija cuya secuencia de movimientos se obtiene por la regulación de dispositivos mecánicos (levas, topes mecánicos, interruptores, etc.) que permiten lograr la posición y orientación de la herramienta colocada en el extremo del brazo del manipulador. El control de un manipulador de este tipo es relativamente simple, pero están muy mal adaptados a cambios en los ciclos de trabajo; la versatilidad es nula y la adaptabilidad es muy mala. Este tipo de manipuladores son utilizados para realizar una función específica cuya secuencia de operaciones (generalmente son movimientos de ida-vuelta para tomar y depositar piezas manufacturadas en una línea de producción), así como sus características de operación no pueden ser modificadas fácilmente.

Robots de la Segunda Generación.-

A principios de la década de los sesentas George Devol presentó lo que llegaría a ser el primer Robot Industrial construido por las sociedades norteamericanas UNIMATION INC. y la AMERICAN MACHINE AND LOUNDRY (4). Joseph Engelberger creador de la UNIMATION y promotor de los robots industriales es considerado como el padre de la robótica moderna, quien estimaba que para 1975, la demanda anual de robots sería de 15 000 unidades.

El primer robot industrial era un dispositivo que combinaba la estructura de eslabones articulados del telemanipulador con -- servo-ejes de una máquina-herramienta de control numérico.

El ROBOT INDUSTRIAL podía aprender la realización de una tarea desplazando su mano a través de la secuencia de posiciones que que integraban la tarea, las cuales serían grabadas en la memoria digital del mecanismo. La ejecución de una tarea consistiría en reproducir esas posiciones mediante el accionamiento de los ejes individuales de las articulaciones del robot. El robot industrial sería ideal para realizar trabajos de tomar y colocar objetos, tales como la carga-descarga de máquinas-herramientas.

Teniendo en cuenta que las operaciones del manipulador pueden

ser cambiadas fácilmente con solo reprogramarlos en su dispositivo de control, son referenciados como "robots de secuencia variable", en oposición con las máquinas automáticas, las cuales no pueden cambiar sus movimientos sin realizar modificaciones en su constitución física. Miles de los manipuladores de la segunda generación están siendo utilizados en la industria automotriz e industria de producción en masa de todo el mundo.

Entre las características fundamentales de este tipo de robots se encuentran el que deben de ser muy precisos y que deben de trabajar en ambientes perfectamente controlados, ya que no cuentan con dispositivos para captar medios ambientes variables desconocidos.

Robots de la Tercera Generación.-

El primer manipulador automático diseñado completamente para ser controlado por computadora e involucrando sensores para obtener información del medio ambiente, fue descrito por Ernst en 1961 (4). Este trabajo, junto con los que surgieron simultáneamente en la época de la primera generación de manipuladores industriales (1971), marcaron el punto de partida para el desarrollo de los robots industriales. Originalmente muchas de las investigaciones estaban bajo los auspicios del área de Inteligencia Artificial; en la actualidad, el énfasis mayor se encuentra enfocado a la AUTOMATIZACION INDUSTRIAL.

Este tipo de manipuladores, con controles y sensores asociados se acercan más al funcionamiento autónomo esperado del robot. La versión industrial utilizada en los inicios de la robótica no contaban con sensores. Estos robots repiten una secuencia de movimientos, los cuales han sido descritos con anterioridad por el usuario. Estas operaciones pueden repetirse indefinidamente sin la intervención del ser humano, sin importar el tiempo de duración de las operaciones a realizar.

Sin embargo, ya que un robot desprovisto de sensores tienen un campo de aplicación más limitado, se ha tratado de incorporar varios tipos de sensores al sistema de funcionamiento del robot. El objetivo que se persigue al utilizar este tipo de sensores es el de proporcionar al robot los sentidos perceptibles más fundamentales del ser humano; visión, audición y tacto, para lograr su integración a las líneas de producción y poder realizar tareas de ensamblado. La información que se obtenga de estos sensores modificará automáticamente el programa de control del manipulador. En la actualidad ya existen en funcionamiento algunos de estos robots de la "tercera generación", y es evidente que este tipo de robots y de futuras generaciones tendrán un potencial casi ilimitado en la realización de las tareas, con lo que desplazarán a la gente de trabajos monótonos, peligrosos y pesados.

En la actualidad, las operaciones que pueden ser realizadas por los robots son verdaderamente considerables.

Para propósitos de apreciación es conveniente dividir al robot

en un grupo de subsistemas o funciones elementales como son: - control, manipulación, percepción sensorial, locomoción, inspección e inteligencia artificial, los cuales se muestran en el diagrama de la figura 1.

El acto de manipular involucra físicamente mover objetos en el medio ambiente de trabajo. El subsistema encargado de esta función consiste de un manipulador (brazo articulado) y de un órgano terminal (OT) el cual es mostrado en la figura 2.

El manipulador realiza funciones análogas a las que realiza el hombre usando sus brazos. El OT es por su parte utilizado para realizar funciones análogas a las que realiza la mano humana.

Por otra parte, existen manipuladores que se encuentran físicamente ligados a la realización de funciones humanas. Algunos de estos manipuladores son utilizados para sustituir órganos humanos perdidos por accidentes (Prótesis) o para complementar el funcionamiento de brazos atrofiados (Ortótesis).

Aunque existe una gran variedad de laboratorios dedicados a la investigación en el campo de la robótica, existe muy poca diferencia en los trabajos realizados, ya que la mayoría de los manipuladores cuentan con seis articulaciones, que generalmente son accionadas por motores de corriente directa o motores hidráulicos. Cada articulación del robot es accionada y controlada independientemente y su posición es transmitida por flechas y/o potenciómetros.

Desde el punto de vista de la mecánica aplicada, los manipuladores son dispositivos sumamente interesantes y que presentan una área de investigación bastante amplia. Generalmente están formados por una cadena abierta de eslabones (figura 2), donde cada par de eslabones representa un grado de libertad.

En comparación con las máquinas convencionales de ciclo cerrado los manipuladores poseen más elementos capaces de tener un movimiento independiente, lo que los hace mucho más versátiles y los coloca en la categoría de dispositivos de propósito general. Es posible utilizarlos como máquinas de ciclo cerrado, reduciendo los problemas y costos de control, pero la convierte en una máquina más limitada.

Un manipulador de propósito general se considera fijo en su base y con 6 grados de libertad; que es el número mínimo para poder colocar al OT en el espacio, especificando una orientación y posición específica. Para controlar el movimiento de un manipulador de este tipo, es necesario controlar la posición de las 6 articulaciones variables con el tiempo. Por otra parte, las propiedades dinámicas varían con la posición y su geometría es complicada, proporcionando un modelo matemático cuyo sistema de ecuaciones es no-lineal con coeficientes variables en el tiempo.

Muchos manipuladores industriales utilizan modelos más simples de diseño lo que les permite trabajar en coordenadas cilíndri-

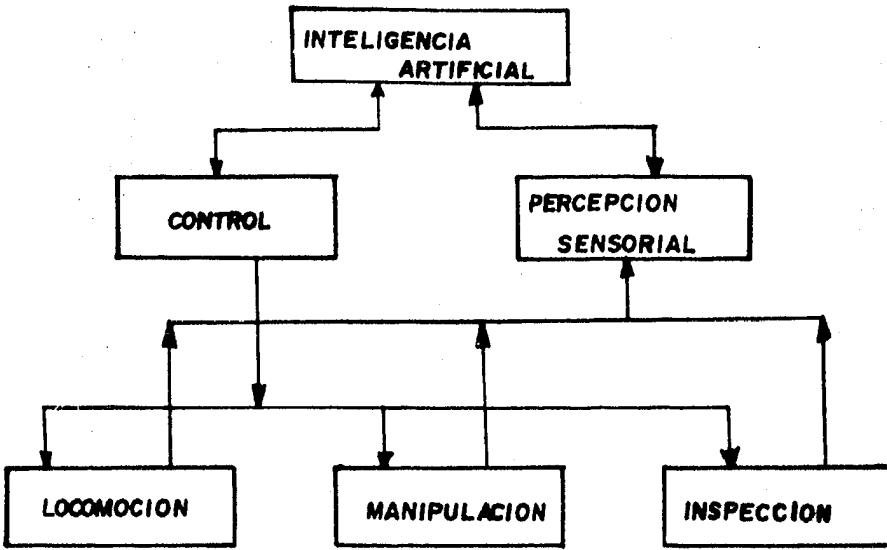


FIG. 1.- FUNCIONES ELEMENTALES

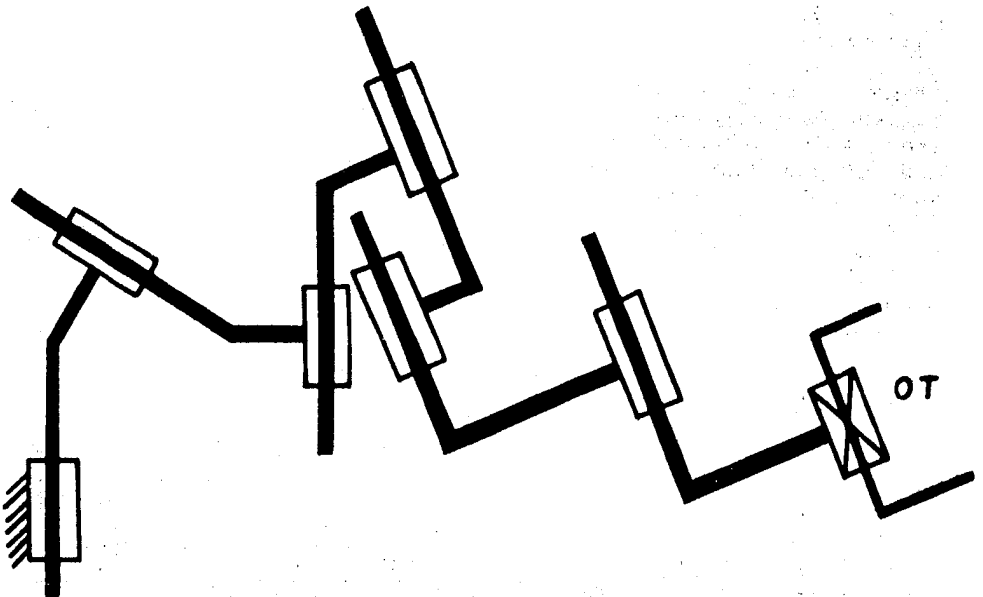


FIG. 2.- DIAGRAMA DE UN MANIPULADOR DE 6 GRADOS DE LIBERTAD

cas, cartesianas o esféricas y simplificar bastante los cálculos de control.

Otra de las áreas que están recibiendo mayor atención en el estudio de los manipuladores es el caso de los grados de libertad redundantes. Muchos manipuladores están contruidos con un número de grados de libertad mayor o menor a 6. Cuando poseen menos de 6 grados, el acoplamiento para la realización de ciertas tareas llega a ser difícil, si no imposible, aunque el control es mucho más sencillo. Para más de 6 grados de libertad, el problema principal consiste en optimizar la utilización de esos grados de libertad extras. Se sabe que existen ciertos sistemas biológicos que poseen más de 6 grados de libertad lo que les permite una mayor eficiencia de movimiento, además de compensación en el caso de multifunciones o desperfectos. En algunas situaciones (trabajos especiales con determinados obstáculos) los grados de libertad extras permiten la realización de determinada tarea.

El diseño de manipuladores presenta una serie de problemas difíciles de resolver. Considerando solamente el sistema articulado (esqueleto) de un manipulador de 6 grados de libertad, en donde cada eslabón está relacionado con 3 parámetros de diseño, proporcionando de esta manera 18 parámetros. Si se toman en cuenta las condiciones dinámicas, habrá otros parámetros adicionales para cada eslabón (masa, tensor de inercia, etc.) además de las propiedades elásticas, incrementándose con esto el número de parámetros en el diseño de un manipulador.

Aún existen muchos problemas sin una solución óptima en el estudio de los mecanismos de un manipulador, presentando áreas de investigación en el análisis, diseño, construcción, control y evaluación de los manipuladores.

Existen algunas formas de locomoción que pueden ser utilizadas cuando se desea mover un dispositivo una distancia más allá de la permitida por una simple manipulación de un robot fijo en su base. Los robots que poseen locomoción son utilizados para realizar tareas que se desarrollan en medios ambientes hostiles y remotos. También son utilizados para realizar la transferencia de grandes cargas, rutinas de trabajo y tareas repetitivas. Los dispositivos para la locomoción de robots han sido contruidos utilizando vehículos con desplazamientos sobre ruedas o sobre rieles. Esta tecnología es bien conocida y parece no tener una relación especial en el campo de la Robótica.

Para que un robot pueda interactuar con el medio ambiente, es necesario que este provisto de sensores, los cuales pueden estar en contacto físico directo con el medio ambiente, tales como sensores para detectar fuerzas o pares de fuerzas y sensores de proximidad; o pueden actuar remotamente, tales como sensores de visión o de sonidos.

Si los manipuladores o cualquier dispositivo robótico opera en un medio ambiente completamente pre-estructurado, puede ser posible controlarlos por medio de alimentación directa con con---

troles no-sensoriales o por corrección. Sin embargo, tales sistemas forman parte de un sistema primitivo y que seguramente no se llamará robot en el futuro.

Los sensores de contacto directo se utilizan para medir la magnitud de las fuerzas y pares de fuerzas que se encuentran en contacto con el OT, ya sea parcial o totalmente. Existen diferentes sensores que han sido diseñados para el OT; básicamente son transductores de fuerzas insertados en el OT. Algunos de estos sensores son capaces de medir las componentes cartesianas de las fuerzas y pares de fuerzas. Los sensores remotos son principalmente sensores de imágenes, sensores de proximidad y sensores de alcance. Varias tecnologías han sido desarrolladas para elaborar sensores remotos, como el rayo laser, dispositivos electro-ópticos y analizadores de audiofrecuencia. Tales sensores son utilizados para identificar objetos en el medio ambiente de trabajo, localización de objetos, inspección de cargas, toma de decisiones y captación de instrucciones. La habilidad de los robots llegará a ser mayor a medida que los sensores lleguen a ser más confiables y versátiles.

La información obtenida en los sensores permite al robot tomar decisiones, planear la ejecución de tareas, control de movimientos e interpretación de datos. Esto funciona principalmente a través de algoritmos y programación heurística similar al funcionamiento de una computadora.

Los puntos anteriores son campo de estudio de lo que se denomina Inteligencia Artificial, que son temas actuales de investigación en los laboratorios de robótica.

La creación de un lenguaje independiente, propio de la robótica industrial, similar al utilizado en las máquinas de control numérico (por ejemplo: APT y PROMO) es hoy en día una tarea esencial si se desea poder automatizar al máximo la cadena completa en la concepción de la fabricación de un producto. Este lenguaje deberá permitir dar a la vez, una descripción explícita ("girar 90° la articulación # 5") y una descripción implícita ("pintar la unidad 2") de la tarea que se va a afectar.

En la actualidad existen ciertos lenguajes explícitos ("VAL", "EMILY", "SIGLA", "WAVE") y unos lenguajes implícitos ("AL", "ROBOT", "APT") con lo que se podría crear un lenguaje estandarizado que sería ideal para optimizar la programación de los robots industriales.

Los robots industriales poseen sistemas de control y memoria, frecuentemente en forma de micro-computadoras, que hace posible programarlos para ejecutar determinadas rutinas de trabajo y, de ser necesario, reprogramarlos para realizar otras enteramente diferentes. El hecho de que el programa de instrucciones pueda modificarse hace que tenga una importancia crucial en la industria, ya que una línea normal de montaje, para operar económicamente y producir gran cantidad de artículos, requiere de cambios sustanciales, como renovar sus máquinas, lo que muchas

veces llega a tomar meses o más. Los robots pueden programarse para realizar una nueva tarea en poco tiempo.

Es perfectamente posible que en el futuro se incorpore a los robots multitud de programas cuya capacidad los haga "rivalizar" con el ser humano. Y puesto que se podrá recurrir a los bancos de datos en fracción de segundos sin importar el lugar en que se encuentren, muchos de estos autómatas no necesitarán andar cargando su "cerebro".

Los robots podrán oír, hablar, ver, tocar, moverse y manipular objetos solamente si poseen la capacidad de controlar todas estas funciones en base a un buen sistema de computación. Los sistemas actuales de robots están logrando controlar todas estas funciones en tiempo real y a una gran velocidad, lo que ha aumentado desmesuradamente su rentabilidad en la industria, disminuyendo los tiempos de fabricación y por lo tanto los costos de producción.

2.- CONTROL MOTOR

=====

"Detrás de cada movimiento del robot existe una serie de evaluaciones geométricas y de ecuaciones complejas que describen la dinámica de sus movimientos; cuya configuración deberá tener en cuenta los objetivos para los cuales será diseñado".

2.1.- MODELO GEOMETRICO.

La obtención de un modelo geométrico de la estructura del manipulador consiste en definir una representación conceptual entre las variables que integran la estructura, relacionándolas entre sí, siguiendo las convenciones y notaciones (Denavit-Harten - - berg) de los diferentes elementos que la integran.

Por otra parte, el modelo geométrico define las ecuaciones matemáticas que relacionan las fuerzas y los pares de fuerzas que se presentan en los movimientos de las articulaciones (posición, velocidad, aceleración), por lo que se puede decir que esta modelización permite determinar los algoritmos necesarios para el control de los diferentes robots industriales.

Para controlar el movimiento de un manipulador es necesario controlar la posición de las articulaciones, variables con el tiempo, y cuyas propiedades dinámicas varían con la posición, además de poseer una geometría complicada, proporcionando, de esta manera, un modelo matemático cuyo sistema de ecuaciones es no lineal con coeficientes variables en el tiempo. La obtención de una solución a dicho sistema de ecuaciones de una manera rápida y sencilla, ha presentado una serie de trabajos de investigación para su realización.

El robot industrial es una estructura mecánica articulada, de cuyos extremos, uno se encuentra fijo a una base de soportes, mientras que el otro se encuentra libre y equipado con una herramienta para manipular objetos o realizar tareas de ensamblado.

La estructura del robot es un sistema mecánico de geometría variable constituida por elementos rígidos llamados eslabones, conectados entre sí, destinada a soportar y a posicionar el órgano terminal del manipulador (parte que se encuentra en contacto directo con la pieza de trabajo: pinza, porta-herramienta...).

En los principios de la Robotica Industrial, los manipuladores que se diseñaban no poseían ninguna semejanza con el ser humano, a pesar de que eran construidos para sustituir tareas realizadas por los miembros humanos. A medida que han ido evolucionando, se les han integrado diferentes dispositivos que presentan mayores ventajas de funcionamiento y que han ido conformando la morfología del ser humano.

A esta tendencia en el diseño de los manipuladores de asemejar se al ser humano, es lo que se denomina Convergencia Morfológica. De esta manera, los robots industriales que se están construyendo en la actualidad son capaces de ver, oír, tocar, moverse y manipular objetos gracias a una serie de dispositivos llamados sensores lo que les permite modificar las características de su funcionamiento, es decir, son capaces de tomar decisiones durante la ejecución de su tarea.

En la mayoría de los casos, la estructura de los manipuladores se asemeja a la morfología del brazo humano, por lo que los diseñadores de robots emplean frecuentemente las palabras hombro, codo, puño, dedos, mano para designar las diferentes partes que integran la estructura del manipulador; sin embargo, aún no existe una forma internacional para terminología, los símbolos y las representaciones de los robots manipuladores.

Los elementos rígidos (eslabones) que integran la estructura del manipulador son acoplados dos a dos mediante dispositivos que aseguran un movimiento relativo entre los dos elementos a fin de modificar la configuración de la estructura, estableciendo una relación fija entre dos articulaciones. A este tipo de mecanismo se les denomina pares cinemáticos. Reuleaux (1) ha clasificado a los pares cinemáticos en dos grupos: pares cinemáticos inferiores, cuando ambos elementos que integran el par, poseen una area o superficie de contacto. Para los pares cinemáticos superiores, el contacto entre los elementos que lo integran describe una línea o un punto. La mayoría de los robots manipuladores que existen actualmente han sido diseñados a partir de pares cinemáticos inferiores para lograr una cadena cinemática abierta, que es el esqueleto del robot, mediante la puesta en serie de estos pares cinemáticos. El acoplamiento de dos cuerpos rígidos permitirá un movimiento relativo entre ellos. Un par cinemático inferior puede poseer de 1 a 3 grados de libertad. Entre los pares cinemáticos inferiores utilizados en el diseño de la estructura mecánica de los robots, se encuentran los siguientes:

El par Prismático o de traslación rectilínea que posee un grado de libertad y su movimiento consiste en una traslación a lo largo de un eje.

El par de Revolución con un grado de libertad y que gira alrededor de un eje.

El par Cilíndrico, compuesto por dos grados de libertad, lo que permite realizar un movimiento de rotación y otro de traslación y posee dos ejes coincidentes. El eje sobre el cual se realiza el movimiento de rotación, es el mismo sobre el cual se realiza el movimiento de traslación.

El par Tornillo o Helicoidal, que posee un grado de libertad y esta provisto de una rotación con desplazamiento longitudinal a lo largo de un eje.

El par Esférico con 3 grados de libertad y que posee 3 movimientos de rotación con respecto a los ejes de un sistema de coordenadas de referencia.

El par Plano con 3 grados de libertad e implementado con 2 movimientos de traslación a lo largo de dos ejes perpendiculares y un movimiento de rotación con respecto a un eje normal al plano formado por los dos ejes anteriores.

La representación esquemática de los pares cinemáticos descritos anteriormente se muestran en la figura 1.

Realizando una clasificación de los pares cinemáticos inferiores tomando como parámetro el número de grados de libertad, se pueden establecer 3 grupos como se muestra en la siguiente tabla :

| TIPO DE PAR | GRUPO | VARIABLES DEL PAR | GRADOS DE LIBERTAD |
|----------------|-------|--------------------------------|--------------------|
| Revolución (R) | I | θ | 1 |
| Prismático (P) | I | x | 1 |
| Helicoidal (H) | I | θ | 1 |
| Cilíndrico (C) | II | x, θ | 2 |
| Esférico (S) | III | $\theta x, \theta y, \theta z$ | 3 |
| Plano (E) | III | y, x, θ | 3 |

De los 6 pares cinemáticos nombrados anteriormente, dos de ellos constituyen un conjunto funcionalmente completo; el par prismático (P) y el par de revolución (R). Por otra parte, es posible obtener los movimientos elementales de los demás pares cinemáticos mediante combinaciones de los pares P y R logrando obtener un sistema mecánicamente funcional. De esta manera, el par esférico se puede construir a partir de 3 pares R con eslabones de longitud cero; el par cilíndrico mediante una combinación RP; el par helicoidal compuesto de un par P y un R unidos mediante un eslabón de una longitud determinada. La asociación de la mayoría de los desplazamientos elementales de los pares cinemáticos que integran la estructura, permiten el posicionamiento y la orientación de un objeto en el espacio. La posición de un punto en el espacio depende de 3 parámetros o de 3 grados de libertad. Considerando solamente las cadenas cinemáticas (brazo del manipulador) compuestas por pares cinemáticos de rotación y traslación, se pueden obtener las 8 siguientes combinaciones posibles: PPP, PPR, PRP, RRP, RPR, PRR, RPP y RRR, que se muestran esquemáticamente en la figura 2.

Un aspecto que se debe de tener en cuenta es que no exista interferencia entre los diferentes movimientos elementales del manipulador, para obtener realmente los 3 grados de libertad que se requieren para el posicionamiento del brazo. Así, cuando 2 pares P son paralelos, la combinación PP producirá en realidad solo un grado de libertad que equivaldría a tener un solo par P. Si consideramos la combinación RRR y los 3 ejes de rotación son paralelos, la combinación permitirá que el punto móvil se mueva en un plano y solo produzca un doble grado de libertad para el posicionamiento de un punto. También se tomará en cuenta el hecho de que la combinación de varios movimientos puede producir un tipo de desplazamiento que puede obtenerse por otra combinación. De esta manera, la combinación PR, tomada en este orden, equivale a obtener los desplazamientos obtenidos por la combinación RP, y obtener de esta manera el par cilíndrico cuando el

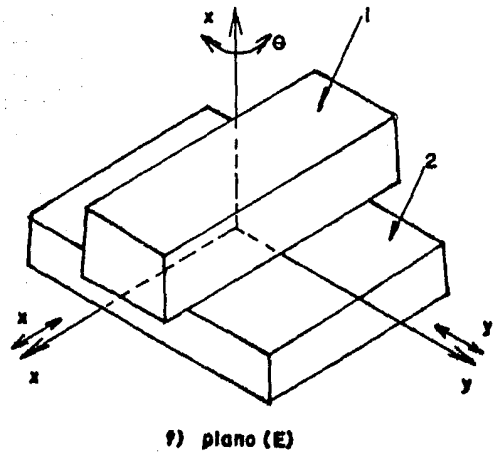
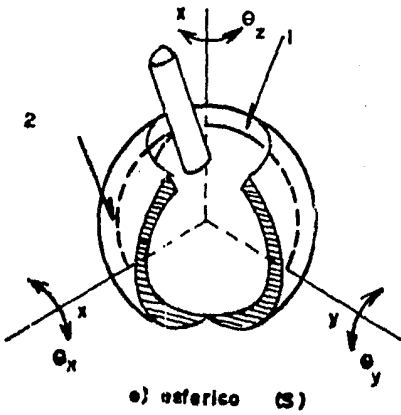
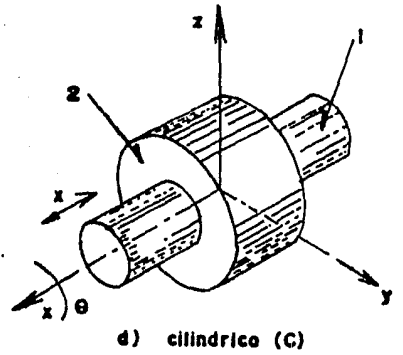
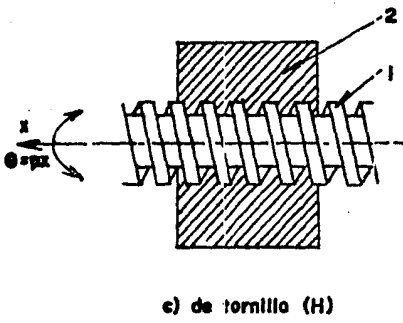
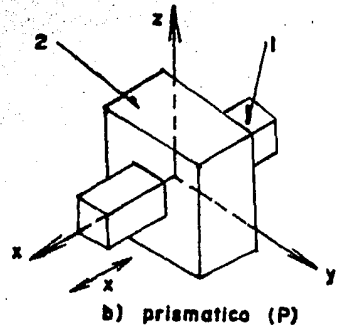
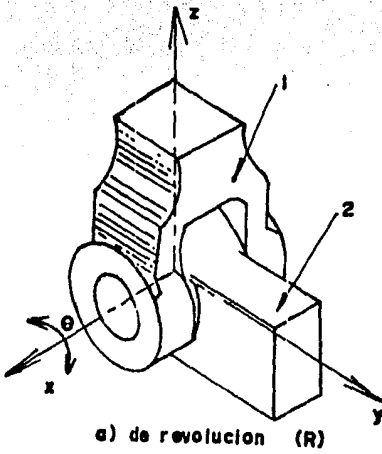


Fig. 1 Pares cinematicos inferiores

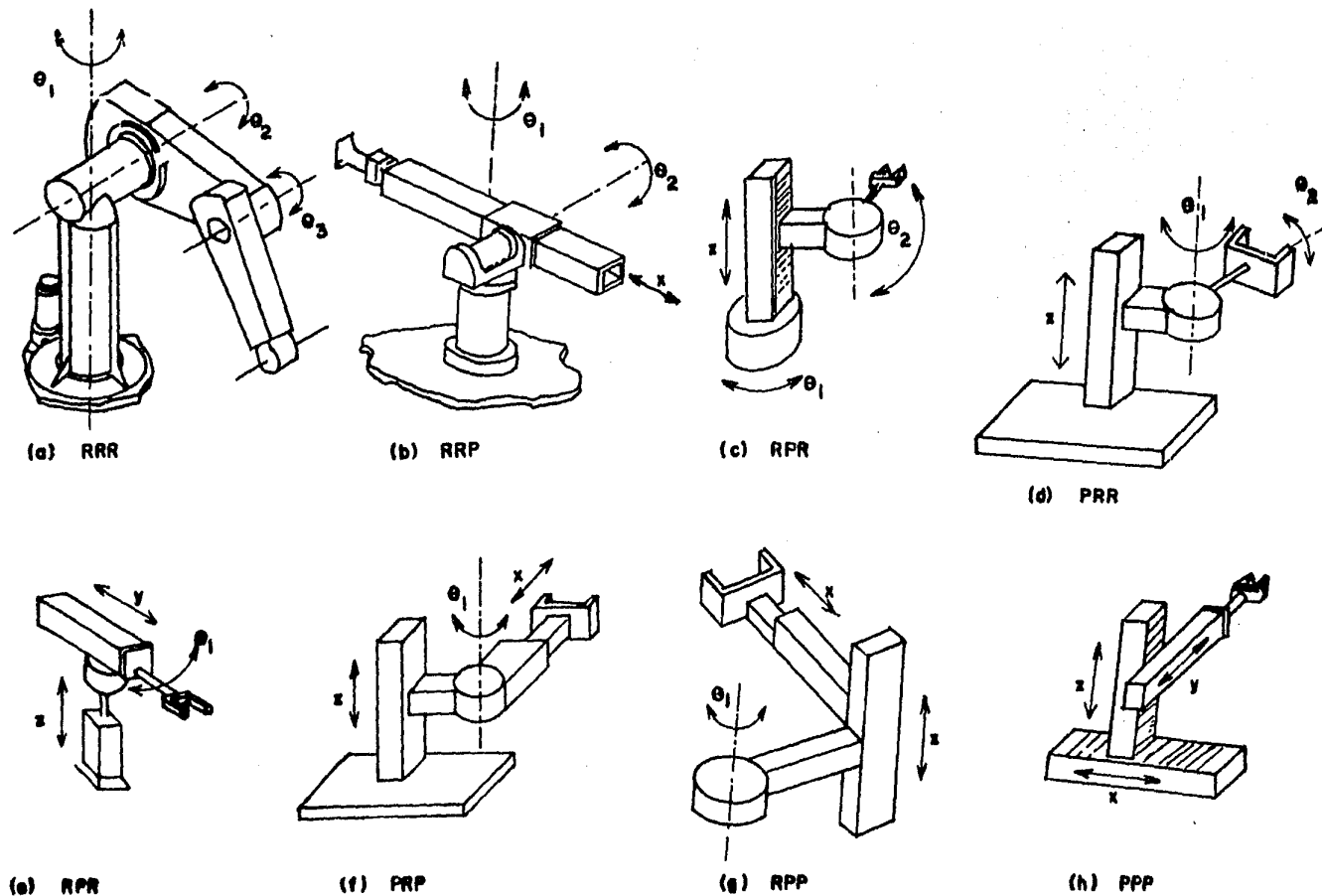


FIG. 2 Arquitectura del sistema de posicionamiento del organe terminal.

eje del par R y la orientación del par P son paralelos.

La orientación de un objeto rígido en el espacio se realiza por medio de un mecanismo que permite la rotación alrededor de 3 ejes ortogonales.

La integración en serie de 3 pares de revolución (R) genera un movimiento esférico a condición de que los 3 ejes de estos pares no sean coplanares. Para la orientación del OT se utilizan las notaciones siguientes: ángulos de Euler (α , β , γ) o los ángulos conocidos como balanceo, derrape y cabeceo (ϕ , θ , ψ).

Para definir el movimiento del OT del manipulador (trayectoria, velocidad, aceleración), el diseñador selecciona un sistema de coordenadas de acuerdo con los grados de libertad que desea que posea el manipulador (figura 3). Sobre este aspecto, el término grados de libertad ha sido utilizado como habitualmente lo definen los constructores de robots; La movilidad del manipulador resulta de un cierto número de movimientos elementales, independientes los unos de los otros, llamados grados de libertad. El grado de dificultad en la solución del problema del control del manipulador, depende en parte de la localización y del número de grados de libertad; es necesario saber distinguir entre todos los movimientos elementales aquellos que corresponden realmente a los grados de libertad. Para posicionar y orientar un objeto indeformable, un manipulador deberá poseer, cuando menos 6 grados de libertad independientes con respecto a su apoyo (3 grados de libertad para la posición y 3 grados para la orientación). Más aún, en el caso de un apoyo móvil, el posicionamiento y la orientación hacen intervenir 6 grados de libertad con respecto a un punto de referencia ligado a tierra (el apoyo puede ser un satélite, un mecanismo submarino, una grúa puente, etc.). De esta manera, un robot puede llegar a poseer hasta 12 grados de libertad.

Los grados de libertad de posicionamiento se materializan por desplazamientos elementales: traslaciones, rotaciones o una combinación de ambos. En el caso de traslación, los desplazamientos se efectúan generalmente siguiendo 3 ejes perpendiculares, y en el caso de rotación, dos ejes son paralelos y el tercero es perpendicular a los dos anteriores. En cuanto a los grados de libertad de orientación, los desplazamientos realizados en una rotación, se deben entender como rotaciones alrededor de 3 ejes perpendiculares y concurrentes; considerando que si 2 ejes de rotación son paralelos, los dos desplazamientos correspondientes no representan más que un solo grado de libertad.

Algunas veces los constructores de robots aumentan el número de grados de libertad de sus manipuladores, ya que tienen en consideración todos los desplazamientos elementales de la estructura (especificando cuando se insertan articulaciones suplementarias para evitar obstáculos que se presentan en el recorrido de su trayectoria), así como los desplazamientos propios de la herramienta (apertura o cerrado de la pinza, rotación de una broca, etc.). La selección, el número y la localización de los grados

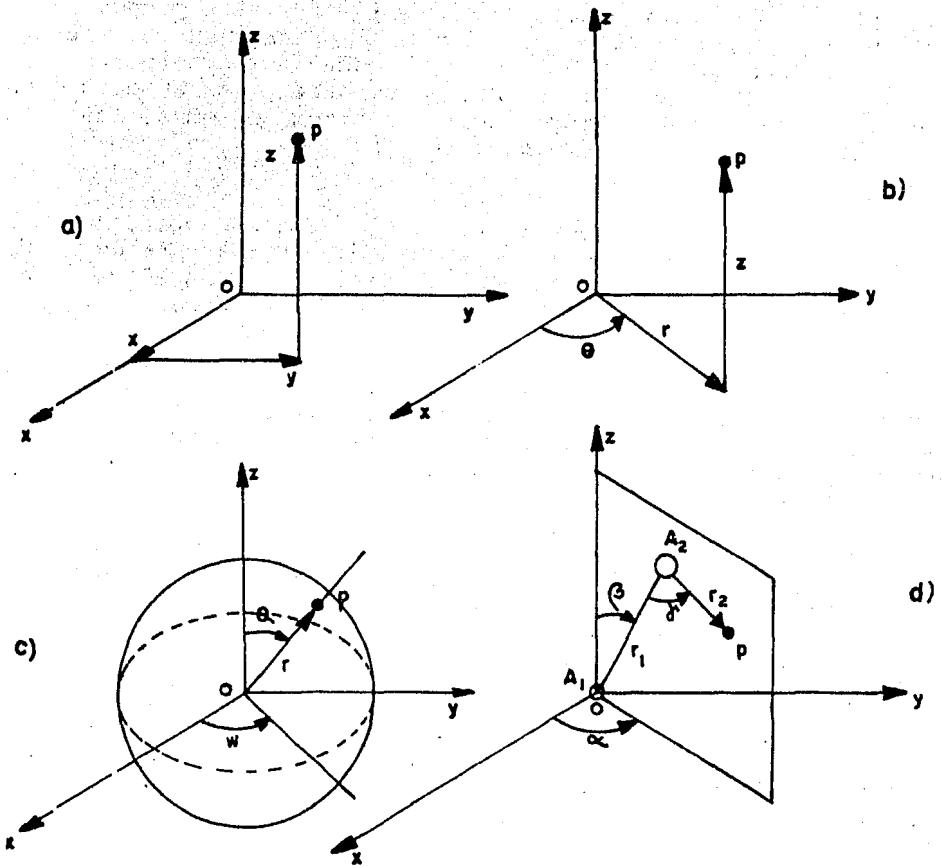


Fig. 3 Posicionamiento de un punto en el espacio en 4 sistemas diferentes de coordenadas

- a) Coordenadas Cartesianas: 3 Traslaciones (x, y, z)
- b) Coordenadas Cilindricas: 2 Traslaciones (r, z) y una Rotacion (θ)
- c) Coordenadas Esfericas: 1 Traslacion (r) y dos Rotaciones (w, θ)
- d) Coordenadas Angulares: 3 Rotaciones (α, β, δ)

Esta figura representa un manipulador con dos eslabones (r_1, r_2) y dos articulaciones (A_1, A_2)

de libertad dependerá por completo de la naturaleza de la tarea a realizar. La figura 4 presenta una clasificación de los principales robots industriales, en función del número de grados de libertad y el número de desplazamientos de rotación.

No obstante, la mayoría de los robots industriales poseen la configuración de la estructura mecánica indicada en la figura 5 en donde los grados de libertad corresponden únicamente a rotación: el hombro gira sobre sí mismo, el brazo y el antebrazo están provistos de una articulación; al nivel del puño, los constructores proponen generalmente uno, dos o tres grados de libertad.

Otro concepto importante en el estudio de los manipuladores es lo que se refiere al espacio de evolución o envolvente de trabajo, que representa el ensamblado de puntos en el espacio, accesibles para su órgano terminal y son determinados por la estructura mecánica del manipulador, teniendo en cuenta la longitud de los elementos rígidos (eslabones), amplitudes máximas de rotación de las articulaciones y los desplazamientos de los brazos telescópicos. De una manera general, una estructura compuesta de grados de libertad de rotación, tendrá un espacio de evolución más amplio que una estructura compuesta por grados de libertad de traslación.

La estructura del manipulador está integrada por eslabones que se mueven a lo largo de 6 ejes de rotación o deslizamiento. Para un robot con 6 grados de libertad, 3 ejes determinan la posición del brazo articulado, determinando de esta manera el área de trabajo (figura 6), mientras que los otros 3 determinan la orientación del OT (figura 7).

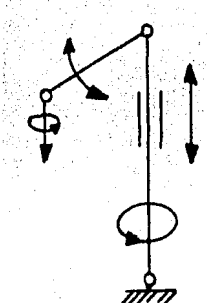
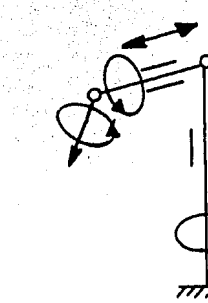
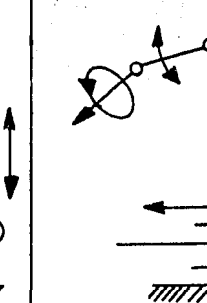
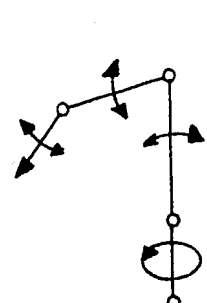
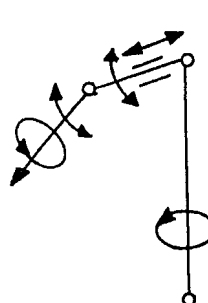
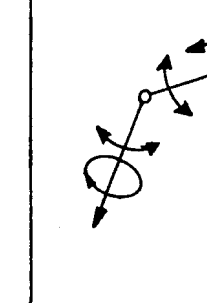
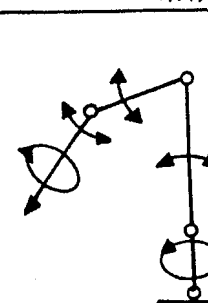
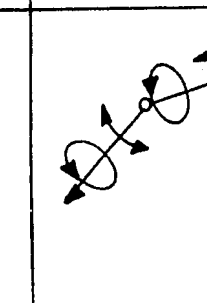
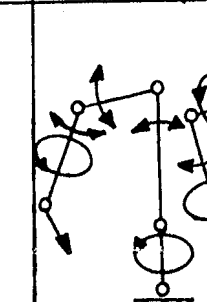
La mano u órgano terminal, generalmente está integrado por una pinza o tenazas, o de una herramienta de propósito especial, seleccionada específicamente para la realización de una tarea dada y es un dispositivo que se encuentra montado sobre el órgano terminal.

La envolvente de trabajo está definida por los movimientos que posee el manipulador. En la mayoría de los casos, la envolvente de trabajo presenta una de las siguientes configuraciones: coordenadas esféricas, cilíndricas y de articulaciones esféricas, dependiendo de la configuración básica del brazo y del número de ejes de movimiento (figura 6).

Los robots de coordenadas cilíndricas incluye a los robots PACER, VERSATRAN, AUTO-PLACE. Su configuración consiste de un brazo horizontal montado sobre una columna vertebral, la cual, en ocasiones, es montada en una base giratoria. El brazo horizontal se mueve hacia adentro y hacia afuera; su carro transportador se mueve hacia arriba y hacia abajo sobre una columna vertical y ambos elementos giran como una sola unidad sobre la base. Por lo tanto, el área de trabajo es una porción de un cilindro.

Los robots UNIMATE y PRAB son ejemplos típicos de los que trabajan con sistemas de coordenadas esféricas. Su configuración

Fig. 4. Clasificación de los robots industriales en base al número de grados de libertad.

| GD DA | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|---|---|
| 3 |  |  |  |
| 4 |  |  |  |
| 5 | |  |  |
| 6 | | |  |

DA: — Desplazamientos angulares

es similar a la torre de un tanque. Un brazo mecánico se mueve hacia adentro y hacia afuera, pivotado en un plano vertical y gira en un plano horizontal sobre la base. La envolvente de trabajo es una porción de una esfera.

El tercer sistema de coordenadas, de articulaciones esféricas o brazo articulado, es utilizado en el diseño de los robots ASEA y CINCINNATI MILACRON. Esta configuración consiste de una base o tronco, un brazo superior y un órgano terminal el cual se mueve en un plano vertical a través del tronco. Una articulación o "codo" se localiza entre el órgano terminal y el brazo superior y una articulación "hombro" es localizada entre el brazo superior y el tronco, el cual posee un movimiento de rotación en un plano horizontal. La envolvente de trabajo se aproxima a una porción de una esfera.

Los elementos anteriores proporcionan al robot un número mayor de grados de libertad, Generalmente se proporcionan tres grados de libertad adicionales a la extremidad del brazo articulado en una unidad comunmente llamada "muñeca". Los ejes de la muñeca son denominados como "balanceo" (rotación en un plano perpendicular al órgano terminal), "deslizamiento", (rotación en un plano vertical a través del brazo) y "Cabeceo" (rotación en un plano horizontal a través del brazo). (figura 7).

Para propósitos prácticos, la descripción de la envolvente de trabajo puede efectuarse mediante los tres siguientes parámetros: grados de rotación alrededor de su eje central (barrido horizontal del brazo); movimiento vertical tanto máximo como mínimo de la extensión del brazo; y la extensión radial del brazo medida a partir del eje central. Aunque es un poco simplificado, permite obtener una idea de cómo determinar la envolvente de trabajo.

Por otra parte, el movimiento de la muñeca puede determinar el tamaño y la forma de la envolvente de trabajo, ya que posee los grados de libertad suficientes para orientar el órgano terminal o herramienta de trabajo del manipulador.

Tomando en cuenta la tarea específica que se desea realizar, se deben considerar los diferentes sistemas de coordenados de funcionamiento, para lograr una mejor selección del manipulador que se requiere. Siendo necesario familiarizar con las capacidades de funcionamiento de los diferentes robots que existe.

Considerando a un robot industrial como un manipulador compuesto mecánicamente de un brazo y un órgano terminal subensamblado, más una herramienta que es diseñado para tomar una pieza localizada en su espacio de trabajo (esfera de influencia para el robot), su brazo articulado podrá relacionar cualquier punto de la esfera con el órgano terminal.

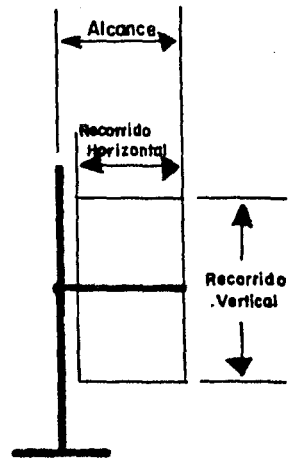
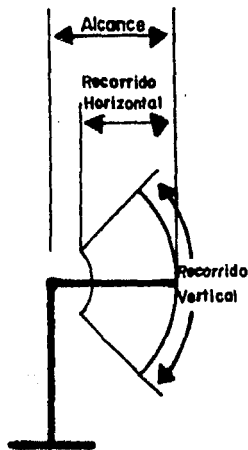
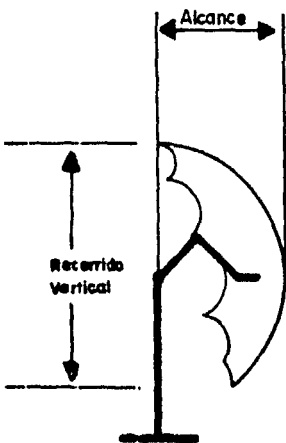
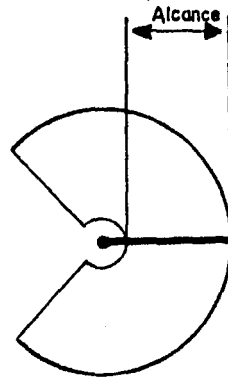
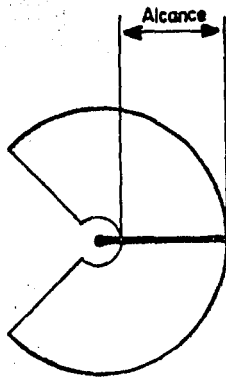
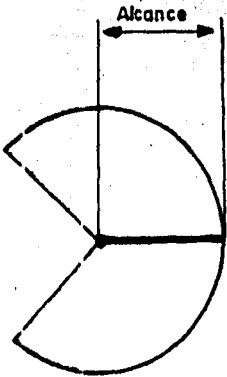
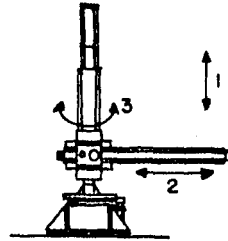
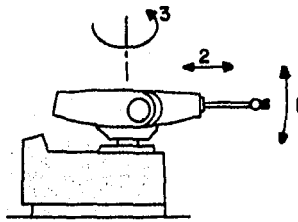
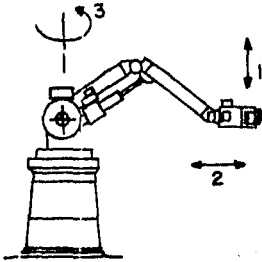
El brazo del manipulador consiste de una serie de elementos rígidos, llamados eslabones, conectados uno a uno, mediante dis-

Fig.6.- Tipos de Configuraciones de Envolventes de Trabajo

Coordenadas de Articulacion

Coordenadas Esfericas

Coordenadas Cilindricas



positivos mecánicos llamados articulaciones accionadas mediante motores hidráulicos o eléctricos.

Para un robot de 6 grados de libertad, el brazo articulado consiste esencialmente de 3 grados de libertad de movimiento para orientar y posicionar el órgano terminal en cualquier punto de su esfera de trabajo, mientras que el órgano terminal consiste básicamente de 3 movimientos de rotación, cuya combinación orienta la herramienta de acuerdo a la configuración del objeto, - para facilitar su manejo. Se dice que el brazo articulado es el mecanismo de posición mientras que el órgano terminal es el mecanismo de orientación.

El estudio de las manipulaciones de un robot se basa en considerar la relación que existe entre objetos. Para describir estas relaciones se hace uso de las transformaciones homogéneas que servirán para describir la posición y orientación relativa entre un eslabón dado y el siguiente.

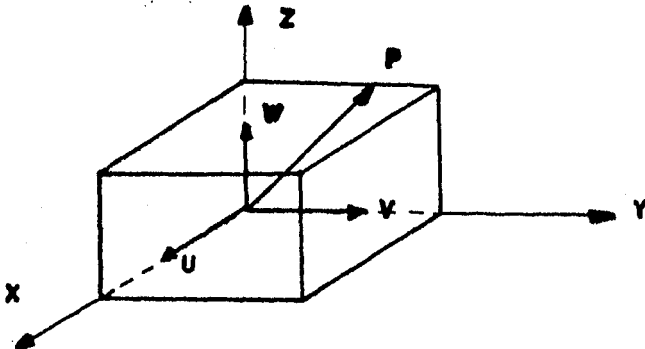
De esta manera, el álgebra matricial y vectorial serán necesarias para desarrollar, de una manera general y sistematizada, u una aproximación que describa y represente la localización de un eslabón del brazo del manipulador con respecto a un marco de referencia fijado. Así, los eslabones pueden girar y/o trasladarse con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, estableciendo un elemento fijo a un sistema de coordenadas de cada articulación.

Las coordenadas homogéneas son usadas para representar un vector de posición en un espacio de 4 dimensiones y las matrices de rotación son aumentadas a matrices homogéneas de transformación de 4 x 4, incluyendo los movimientos de traslación del elemento fijo. Estas representaciones matriciales de un elemento mecánico rígido describen la geometría espacial del brazo del manipulador.

Una transformación en el espacio H es una matriz de 4 x 4 que puede representar traslación, rotación, cambios de escala y de perspectiva. Dado un punto U, su transformación V esta representada por :

$$V = H U \quad \dots (1)$$

Una matriz de rotación de 3 x 3 puede ser definida como una matriz de transformación que opera sobre un vector de posición en un espacio euclidiano de 3 dimensiones, determinando sus coordenadas expresadas en un sistema de coordenadas girado OUVW (cuerpo fijo) con respecto a un sistema de coordenadas de referencia OXYZ. La siguiente figura muestra ambos sistemas de coordenadas:



Físicamente podemos considerar al sistema OUVW como un cuerpo - fijo que sirve de referencia, esto es, que permanezca fijo a un cuerpo y que se mueva con el.

Considerando como vectores unitarios a lo largo de los ejes coordenados de ambos sistemas a (ix, jy, kz) y (iu, jv, kw) , un punto P puede ser representado por sus coordenadas con respecto a ambos sistemas de coordenadas como :

$$P_{uvw} = (P_u, P_v, P_w)^t \quad P_{xyz} = (P_x, P_y, P_z)^t \quad \dots (2)$$

Para facilidad se considera que P permanece fijo con respecto al sistema de coordenadas OUVW. Se desea encontrar una matriz de transformación de 3×3 para realizar la transformación de las coordenadas de P de un sistema a otro, cuando ha girado un cierto ángulo. Es decir :

$$P_{xyz} = A P_{uvw} \quad \dots (3)$$

Tomando en cuenta la definición de las componentes de un vector se tiene lo siguiente :

$$P_{uvw} = P_u iu + P_v jv + P_w kw \quad \dots (4)$$

De donde, por producto escalar de la ecuación 4 se tiene :

$$\begin{aligned} P_x = ix P &= \begin{vmatrix} ix iu P_u + ix jv P_v + ix kw P_w \\ jy iu P_u + jy jv P_v + jy kw P_w \\ kz iu P_u + kz jv P_v + kz kw P_w \end{vmatrix} \\ P_y = jy P &= \\ P_z = kz P &= \end{aligned} \quad \dots (5)$$

Uno de los objetivos de mayor interés en realizar este tipo de transformaciones es poder encontrar las matrices de rotación que representen las rotaciones del sistema de coordenadas OUVW para cada uno de los ejes del sistema de coordenadas de referencia OXYZ. Si el sistema OUVW girara un cierto ángulo θ con respecto al eje OX, el punto P tendría una nueva posición con respecto al sistema de coordenadas de referencia.

De esta manera, la matriz de rotación alrededor del eje OX, para un ángulo θ estaría dada por :

$$P_{xyz} = \text{Rot}(x, \theta) P_{uvw} \quad \dots (6)$$

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{Sen} \theta \\ 0 & \text{Sen} \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \quad \dots (7)$$

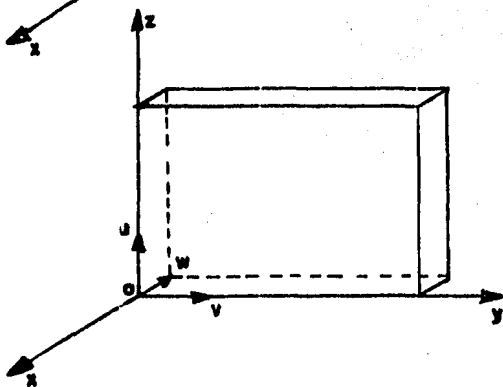
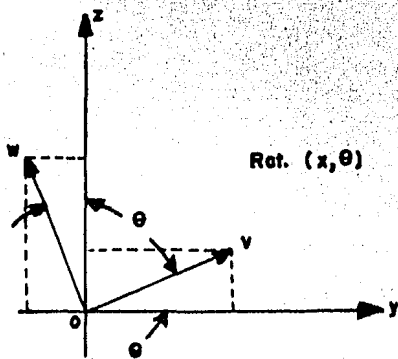
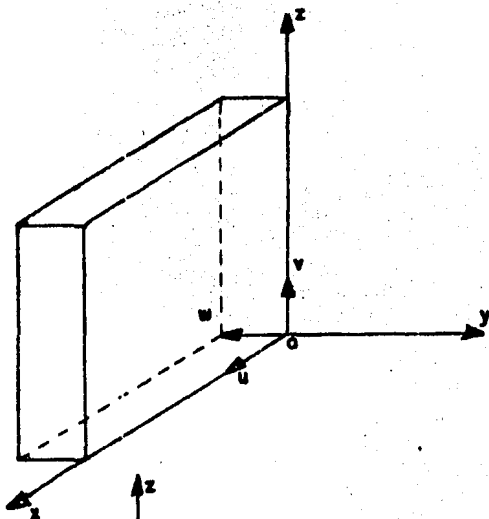
Similarmente se puede obtener la matriz de rotación para los otros dos ejes, obteniéndose lo siguiente:

$$\text{Rot}(y, \theta) = \begin{vmatrix} \cos \theta & 0 & \text{Sen} \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen} \theta & 0 & \cos \theta \end{vmatrix} \quad \text{Rot}(z, \theta) = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\text{Sen} \theta & 0 \\ \text{Sen} \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

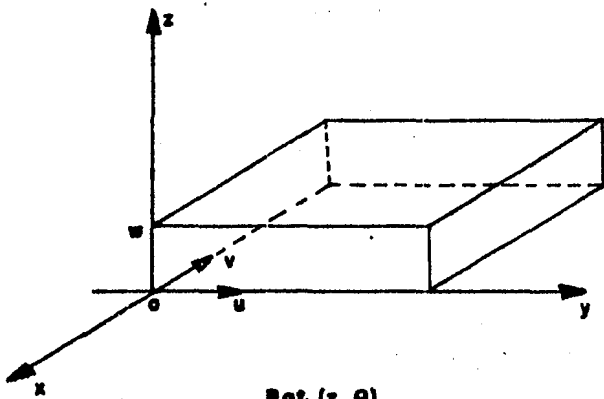
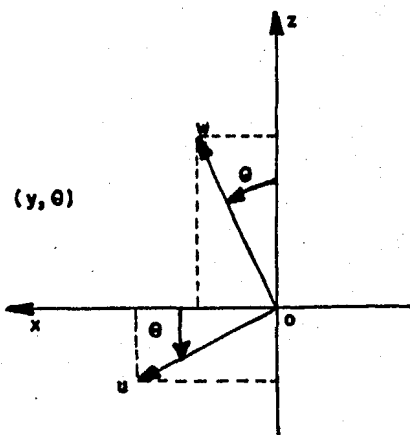
Las matrices $\text{Rot}(x, \theta)$, $\text{Rot}(y, \theta)$, $\text{Rot}(z, \theta)$ son llamadas matrices básicas de rotación.

Sin embargo, las matrices anteriores no presentan la posibilidad de realizar una traslación, por lo que será necesario introducir una cuarta componente para el vector de posición P; para un espacio de 3 dimensiones P estaría expresado como :

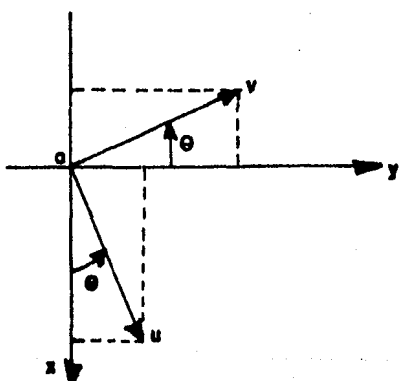
Rotacion de sistemas coordenados



Rot. (y, θ)



Rot. (z, θ)



$$P = (w P_x, w P_y, w P_z, w)^t \dots\dots(8)$$

Se dice que el vector de posición P esta expresado en coordenadas homogéneas, cuya representación permite desarrollar una matriz de transformación que incluya transformaciones de rotación, de traslación, cambios de escala y perspectiva.

La matriz de transformación homogénea será una matriz de 4 x 4 que describe a un vector de posición expresado en coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro. Se puede considerar a esta matriz como 4 submatrices que expresan lo siguiente :

$$H = \begin{vmatrix} R_3 \times 3 & P_3 \times 1 \\ 1 \times 3 & 1 \times 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{Matriz de Rotación} & \text{Vcotor de Traslación} \\ \text{Cambios de Perspectiva} & \text{Factor de Escala} \end{vmatrix} \dots(9)$$

De esta manera, la matriz de rotación con respecto al eje X, cambiaría a :

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}\theta & -\text{Sen}\theta & 0 \\ 0 & \text{Sen}\theta & \text{Cos}\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \dots\dots(10)$$

Se puede proceder de la misma manera para obtener las matrices de rotación con respecto a los ejes Y y Z.

La matriz superior derecha de 3 x 1 de la ecuación 9, tiene la función de trasladar el sistema de coordenadas OUVW, que posee ejes paralelos con respecto al sistema OXYZ, pero cuyo origen está en (dx, dy, dz) con respecto al sistema OXYZ; la matriz de transformación será :

$$\text{Trans}(dx, dy, dz) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \dots\dots(11)$$

La matriz anterior se denomina la matriz básica homogénea de traslación.

La matriz referente a los cambios de perspectiva, es utilizada para el análisis de visión por computadora y para la calibración del modelo por cámara de televisión. Los elementos de esta matriz valen cero para indicar que no existen cambios de perspectiva.

Se han identificado dos sistemas de coordenadas, un sistema de coordenadas fijo OXYZ y el sistema de coordenadas en movimiento OUVW; para describir la relación geométrica entre esos dos sistemas, es necesario utilizar una matriz homogénea de transformación. Si esos dos sistemas de coordenadas son asignados a cada eslabon del brazo del manipulador, es decir, eslabón i-1 y eslabón i, respectivamente, en donde el sistema del eslabón i-1 es el sistema de coordenadas de referencia y el sistema del esla--

bón i es el sistema de coordenadas en movimiento; de esta manera, se puede especificar un punto P_i que permanezca en el eslabón i y expresarlo en el sistema de coordenadas del eslabón i (OUVW) en términos del sistema de coordenadas del eslabón $i-1$ (OXYZ) como :

$$P_{i-1} = H P_i \quad \dots\dots(12)$$

Por otra parte, se puede decir que cada par de eslabón-articulación constituye un grado de libertad. Por lo tanto, para un manipulador de n grados de libertad habrá n pares de eslabón-articulación, los cuales se encuentran ligados a una base en donde se considera generalmente un sistema inercial de referencia para este sistema dinámico de elementos y el último eslabón esta sujeto a una herramienta (órgano terminal).

Los eslabones y las articulaciones son numeradas a partir de la base, es decir, la articulación 1 estara conectada entre el eslabón 1 y la base del manipulador. Cada eslabón esta conectado a otros dos de manera que no se llega a establecer una cadena cinemática cerrada.

A continuación se establece un sistema de coordenadas para cada articulación (conexión de dos elementos), el cual posee dos ejes normales, que corresponden a cada eslabón. La posición relativa de la unión de estos dos elementos (eslabón $i-1$ y eslabón i , figura 8) está dada por la distancia D_i , medida a lo largo de los ejes de las articulaciones entre los ejes normales.

El ángulo θ_i de la articulación i entre los ejes normales es medido en un plano normal a los ejes de la articulación. Donde D_i y θ_i son llamados la distancia y el ángulo entre los eslabones adyacentes respectivamente, y determinan la posición relativa del eslabón próximo. Un eslabón i ($i=1,2,3,\dots,6$) es conectado a otros dos eslabones cuando mucho (eslabón $i-1$ y eslabón $i+1$); de esta manera, dos sistemas de ejes para las articulaciones son establecidos al final de ambos eslabones.

El significado de los eslabones desde una perspectiva cinemática es que mantienen una configuración fija entre sus articulaciones. Esto se puede representar por medio de 2 parámetros; A_i y α_i ; donde A_i es la distancia más corta medida a lo largo de 2 ejes normales entre los ejes de las articulaciones y α_i es el ángulo entre los ejes de las articulaciones medido en un plano perpendicular a A_i . Por lo tanto, A_i y α_i pueden llamarse la longitud y el ángulo de torsión del eslabón i y sirven para determinar su estructura.

En resumen existen 4 parámetros A_i , α_i , D_i , θ_i que se encuentran asociados a cada eslabón del manipulador. Si se establece una convención de signos para cada parámetro, estos parámetros constituirán un conjunto mínimo suficiente de elementos para determinar la configuración cinemática completa de cada eslabón que componen el brazo del manipulador. Note que estos 4 parámetros se presentan en pares : los parámetros del eslabón (A_i, α_i) que determinan la estructura de cada eslabón y los parámetros de la articulación (D_i, θ_i) que determinan la posición relativa del eslabón próximo.

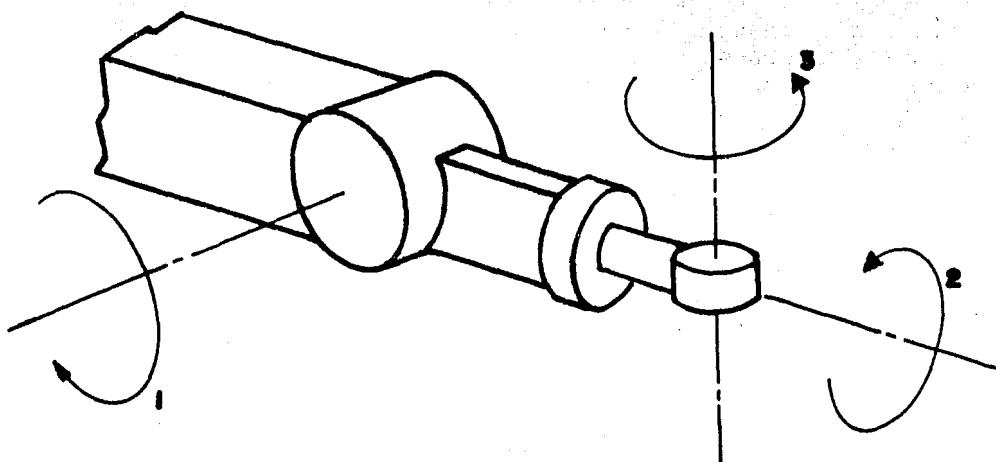


Fig.7 Orientacion del OT (3 grados de libertad)

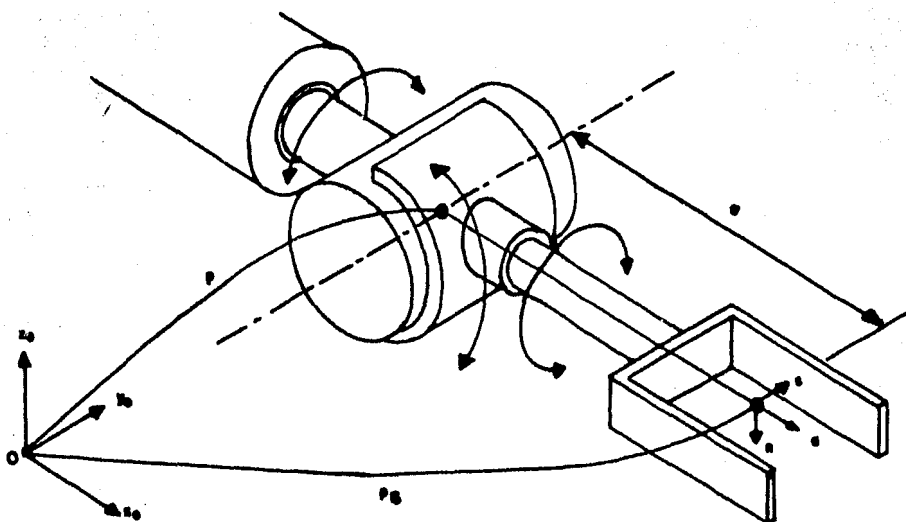


Fig. 10 Representacion esquematica de la Matriz H

Para describir las relaciones de traslación y rotación entre eslabones adyacentes, DENAVIT y HARTENBERG (D-H) (2) propusieron un método matricial para establecer sistemáticamente un sistema de coordenadas (cuerpo fijo-de referencia) para cada eslabón de una cadena articulada. La representación D-H propone una matriz de transformación para representar el sistema de coordenadas de cada eslabón en una articulación con respecto a los sistemas de coordenadas establecidos anteriormente. De esta manera, a través de transformaciones secuenciales, se puede transformar el resultado expresado en coordenadas iniciales y expresarlo en coordenadas de base, lo cual complementa la referencia inicial de este sistema dinámico.

Un sistema de coordenadas ortonormales cartesianas (X_i, Y_i, Z_i) puede establecerse para cada eslabón en su línea central de la articulación correspondiente, donde $i=1,2,3\dots n$ (donde n es el número de grados de libertad) más el sistema coordinado de la base de la estructura. Ya que una articulación con rotación tiene un solo grado de libertad, cada sistema de referencia, (X_i, Y_i, Z_i) del brazo de un robot, corresponde a la articulación ($i+1$) y es fijado en el eslabón i .

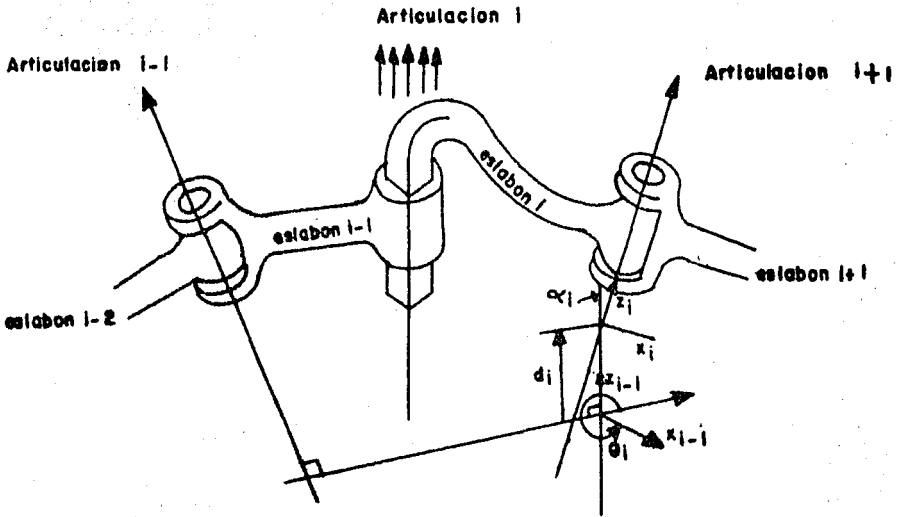
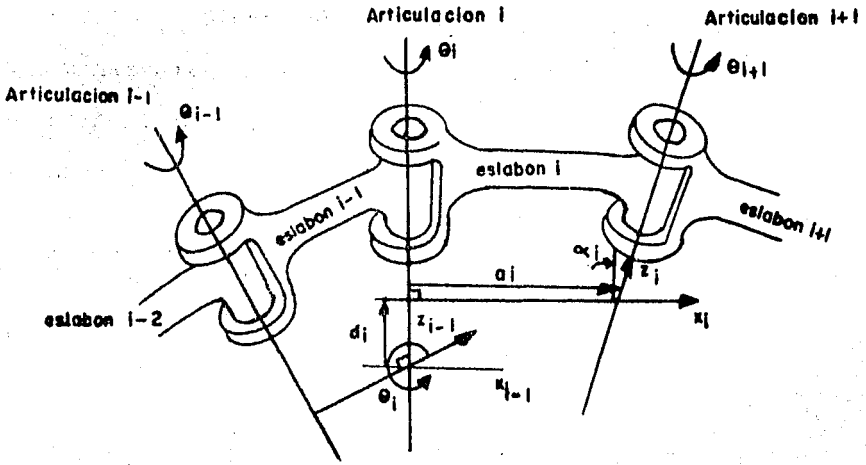
Cuando el elemento accionador activa la articulación i , el eslabón i se moverá con respecto al eslabón ($i-1$). Ya que el sistema de coordenadas i -ésimo es colocado en el eslabón i , se moverá junto con él. Por lo tanto, el i -ésimo sistema de coordenadas de referencia se moverá con el órgano terminal (OT) (eslabón n). Las coordenadas de base son definidas como las coordenadas de referencia 0-ésimas (X_0, Y_0, Z_0), el cual también corresponde al sistema de coordenadas inercial del brazo del robot.

De esta manera, el brazo del robot PUMA 560 (figura 9) tendrá 7 sistemas de coordenadas de referencia llamados (X_0, Y_0, Z_0), (X_1, Y_1, Z_1), ..., (X_6, Y_6, Z_6). Cada sistema de coordenadas es establecido y determinado en base a las 3 reglas siguientes:

- El eje Z_{i-1} está ligado a lo largo del eje de movimiento de la i -ésima articulación
- El eje X_i es normal al eje Z_{i-1} apuntando lejos de este
- El eje Y_i completa el sistema de coordenadas con las características que se requiere.

Con estas reglas básicas para establecer un sistema de coordenadas ortonormales para cada eslabón y la interpretación geométrica de los parámetros de las articulaciones y eslabones, se puede establecer un procedimiento para elaborar un algoritmo que sirva para establecer los sistemas de coordenadas de referencia del manipulador.

Una vez establecidos los sistemas de coordenadas D-H para cada eslabón, puede desarrollarse fácilmente una matriz homogénea de transformación relacionando el sistema i -ésimo de coordenadas con el sistema $i-1$. Observando la figura 8, el punto R_i expresado en el sistema de coordenadas i , puede expresarse fácilmente con respecto al sistema $i-1$ como R_{i-1} , realizando las siguientes transformaciones:



Parametros del eslabon (d, α) para una articulacion prismatica

Fig. 8 Parametros de eslabones y articulaciones

- Una rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i , alineando el eje X_{i-1} con el eje X_i
- Una traslación a lo largo del eje Z_{i-1} una distancia D_i , haciendo que el eje X_{i-1} coincida con el eje X_i
- Una traslación a lo largo del eje X_i una distancia A_i haciendo que coincidan los dos orígenes
- Una rotación alrededor del eje X_i un ángulo α_i logrando que coincidan los dos sistemas de coordenadas.

Cada una de estas 4 operaciones pueden ser expresadas por una matriz homogénea básica de rotación/traslación y el producto de estas cuatro matrices da como resultado una matriz homogénea de transformación compuesta, A_{i-1} conocida como la matriz de transformación D-H para sistemas de coordenadas de referencia adyacentes. Así :

$$A_{i-1} = \begin{vmatrix} C \theta_i & -C \alpha_i S \theta_i & S \alpha_i S \theta_i & A_i & C \theta_i \\ S \theta_i & C \alpha_i C \theta_i & -S \alpha_i C \theta_i & A_i & S \theta_i \\ 0 & S \alpha_i & C \alpha_i & D_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Donde $C \theta_i = \cos \theta_i$; $S \theta_i = \sin \theta_i$, A_i , D_i son constantes mientras que θ_i es la variable de una articulación de revolución. Para una articulación prismática, sus variables son D_i , mientras que sus constantes son α_i , A_i , θ_i y la matriz A_{i-1} se transforma en:

$$A_{i-1} = \begin{vmatrix} C \theta_i & -C \alpha_i S \theta_i & S \alpha_i S \theta_i & 0 \\ S \theta_i & C \alpha_i C \theta_i & -S \alpha_i C \theta_i & 0 \\ 0 & S \alpha_i & C \alpha_i & D_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Usando la matriz anterior se puede relacionar el punto P_i con el resto del eslabón i y expresarlo en coordenadas homogéneas con respecto al sistema de coordenadas i y al sistema $i-1$ establecido en el eslabón $i-1$, mediante la siguiente transformación:

$$P_{i-1} = A_{i-1} P_i \quad \dots\dots(13)$$

De esta manera, la posición y orientación del segundo eslabón en relación con el sistema de coordenadas de referencia esta dada por :

$$H_2 = A_1 A_2 \quad \dots\dots(14)$$

Similarmente, para un manipulador de 6 eslabones, su posición y orientación estará dada por :

$$T_6 = H = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad \dots\dots(15)$$

Considerando que cualquier manipulador esta integrado por una serie de eslabones conectados entre sí por medio de articulaciones y asignando un marco de coordenadas en cada eslabón y utilizando transformaciones homogéneas se puede describir la posición y orientación relativa entre los diferentes marcos

de coordenadas.

Las transformaciones homogéneas describen la relación entre un eslabón dado y el siguiente mediante la matriz A (D-H) donde T_6 representa la posición y orientación de un manipulador de 6 grados de libertad.

Un manipulador tiene como función el realizar las operaciones del brazo humano, es decir, colocar un objeto en el espacio de tal manera que observe una posición y orientación prescritas en un tiempo también prescrito. Se considera que el objeto es modelable como un cuerpo rígido, por lo que su posición y orientación pueden describirse mediante 6 parámetros: 3 coordenadas de uno de sus puntos y 3 ángulos llamados ángulos de Euler, que dando el vector de coordenadas de manipulación como:

$$r = (P_x, P_y, P_z, \alpha, \beta, \gamma)^t \quad \dots\dots(16)$$

Por otra parte la posición y orientación de un punto en el espacio puede ser representada por una matriz de 4 x 4, que se encuentra esquematizada en la figura 10, expresada como:

$$H = \begin{vmatrix} n & s & a & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots\dots(17)$$

donde P es el vector de posición de un punto en el espacio cuyas coordenadas son (P_x, P_y, P_z) y n, s, a son los vectores unitarios que describen la orientación del órgano terminal y que son direccionados como sigue: el vector Z está ligado a la aproximación de un objeto y es conocido como el vector de aproximación (a), el vector de deslizamiento (s) y finalmente un vector normal (n) que integran un conjunto de vectores ortonormales que se rigen por la regla de la mano derecha. Quedando la expresión 17 de la siguiente manera:

$$H = \begin{vmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots\dots(18)$$

Igualando las expresiones 15 y 18 se obtiene una relación entre la posición y orientación del órgano terminal y las coordenadas internas del manipulador $(\theta_i, D_i, A_i, \alpha_i)$, además de proporcionar el modelo geométrico que rige el comportamiento del manipulador:

$$r = f(\theta) \quad \dots\dots(19)$$

Otra manera de especificar la orientación del OT, es obtenida mediante una serie de rotaciones alrededor de los ejes X, Y, Z. Por conveniencia, la orientación es definida en términos de los ángulos de Euler, con rotaciones con respecto a las coordenadas de base (X_0, Y_0, Z_0) , como lo expresa la relación 16.

Para una traslación correspondiente del punto P, el origen del sistema de base coincidirá con el sistema (n, s, a) como lo muestra la figura 10, si:

- Si X_0 es girado un ángulo α alrededor de Z_0 tal que X_0 coincide con N_0 , en donde N_0 es un vector alojado en el plano (X_0, Y_0) y es normal a a
- El siguiente Z_0 es girado un ángulo β con respecto a n
- Finalmente, N_0 es girado un ángulo γ alrededor de a

Por lo tanto, la expresión 17 cambiará a :

$$H = \begin{vmatrix} \text{Cos}\alpha \text{ Cos}\gamma & -\text{Sen}\alpha \text{ Cos}\beta \text{ Sen}\gamma & -\text{Cos}\alpha \text{ Sen}\gamma & -\text{Sen}\alpha \text{ Cos}\beta \text{ Cos}\gamma \\ \text{Sen}\alpha \text{ Cos}\gamma & +\text{Cos}\beta \text{ Cos}\gamma \text{ Sen}\alpha & -\text{Sen}\alpha \text{ Sen}\gamma & +\text{Cos}\alpha \text{ Cos}\beta \text{ Cos}\gamma \\ & \text{Sen}\beta \text{ Sen}\gamma & & \text{Sen}\beta \text{ Cos}\gamma \\ & 0 & & 0 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \text{Sen}\alpha \text{ Sen}\beta & P_x \\ -\text{Cos}\alpha \text{ Sen}\beta & P_y \\ \text{Cos}\beta & P_z \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \dots\dots\dots(20)$$

Igualando las expresiones 15 y 20 se obtiene nuevamente la relación que define el modelo geométrico del manipulador, indicado en la expresión 19.

Finalmente, existe otra forma de definir la orientación del órgano terminal, mediante una notación utilizada en aviación, expresada como balanceo, deslizamiento y cabeceo, que equivale a realizar una rotación θ con respecto al eje Z, una rotación ϕ alrededor del eje Y y una rotación ψ con respecto al eje X.

Especificando el orden de las rotaciones tendremos :

$$H(\phi, \theta, \psi) = \text{Rot}(z, \phi) \text{Rot}(y, \theta) \text{Rot}(x, \psi)$$

$$H = \begin{vmatrix} \text{Cos}\phi \text{ Cos}\theta & \text{Cos}\phi \text{ Sen}\theta \text{ Sen}\psi & -\text{Sen}\phi \text{ Cos}\psi & \text{Cos}\phi \text{ Sen}\theta \text{ Cos}\psi + \\ \text{Sen}\phi \text{ Cos}\theta & \text{Sen}\phi \text{ Sen}\theta \text{ Sen}\psi & +\text{Cos}\phi \text{ Cos}\psi & \text{Sen}\phi \text{ Sen}\theta \text{ Cos}\psi - \\ -\text{Sen}\theta & \text{Cos}\theta \text{ Sen}\psi & & \\ 0 & 0 & & \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} +\text{Sen}\phi \text{ Sen}\psi & P_x \\ -\text{Cos}\phi \text{ Sen}\psi & P_y \\ \text{Cos}\theta \text{ Cos}\psi & P_z \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \dots\dots\dots(21)$$

Igualando las expresiones 15 y 21 se obtiene nuevamente la relación que define el modelo geométrico del manipulador:

$$r = f(\theta)$$

2.2.- MODELO CINEMATICO

En los últimos años, los robots industriales han aumentado desmesuradamente su utilización en operaciones de manejo de materiales, pintura, soldadura, ensamblado, etc., operaciones que eran realizadas por máquinas de propósitos especiales, cuya inflexibilidad a cambios de operación, permitió la evolución de los manipuladores controlados por computadora (mini o micro-computadoras, lo que llega a representar notables ventajas económicas además de altos niveles de calidad.

Para poder obtener el máximo beneficio que puede representar la utilización de un robot industrial, es necesario elaborar los adecuados sistemas de control que tomen en consideración las características de funcionamiento, con el fin de determinar el conjunto de ecuaciones matemáticas que permitan simular por medio de la computadora el movimiento del brazo del manipulador.

De una manera general, el problema del control consiste en obtener modelos adecuados al brazo físico del robot para diseñar los dispositivos de control, especificando las leyes o estrategias específicas para obtener la respuesta y el rendimiento deseados.

Una manera de obtener las ecuaciones matemáticas que describan el funcionamiento del brazo del robot es a través del ANALISIS CINEMATICO.

Se sabe que un manipulador consiste de una serie de eslabones conectados entre sí por medio de dispositivos mecánicos llamados articulaciones, formando una cadena cinemática abierta que pueda ser analizada por el método desarrollado por DENAVIT-HARTENBERG. Los resultados obtenidos por este método son las ecuaciones que expresan la posición y orientación del OT en términos de los sistemas de coordenadas de cada articulación. Estas ecuaciones expresan el comportamiento de cualquier manipulador, independientemente del número de eslabones y grados de libertad.

Dada una posición y orientación deseada para el OT, será necesario determinar las coordenadas requeridas para cada articulación. Para una posición dada, correspondiente a un conjunto de coordenadas de las articulaciones, habrá un número determinado de configuraciones de los eslabones, las cuales colocan al OT en la misma posición y orientación. Sin embargo, solamente una corresponderá a la configuración deseada.

El análisis cinemático toma en consideración la geometría y el movimiento del brazo del robot, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia (X_0, Y_0, Z_0) como una función del tiempo, sin tomar en cuenta las fuerzas y los momentos que originan el movimiento del manipulador.

La solución al problema cinemático se puede obtener por métodos trigonométricos simples, cuando la geometría del manipulador de que se trate sea simple (2 o 3 articulaciones). Sin embargo, para un manipulador con 6 grados de libertad, donde la complejidad

dad para la obtención de una solución de las ecuaciones cinemáticas impida la utilización de estos métodos, siendo necesario elaborar un método para obtener una solución al problema cinemático basándose en el análisis propuesto por D-H y lograr un control efectivo del manipulador.

El análisis cinemático se puede considerar desde dos puntos de vista diferentes: el problema cinemático inverso y el problema cinemático directo. El problema cinemático directo consiste en encontrar la posición y orientación del OT con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, fijado en la base del manipulador, dado un cierto vector que contenga los ángulos de las articulaciones $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$, donde n representa el número de grados de libertad de que está provisto el brazo del manipulador.

El problema cinemático inverso consiste en calcular las diferentes variables de las articulaciones (θ_i) para una posición y orientación dada, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, el problema consiste básicamente en determinar las variables de las articulaciones que proporcionen las diferentes posiciones y orientaciones que integran la secuencia de operaciones durante la ejecución de una tarea dada. De esta manera, el análisis cinemático se reduce básicamente a resolver el problema cinemático inverso, que permita controlar la posición y orientación del OT para alcanzar un objeto dado. Sin embargo, la obtención de una solución para diferentes ángulos de las articulaciones, llega a representar un problema muy difícil de resolver. A partir de la siguiente expresión:

$$\theta = f^{-1}(r)$$

se puede obtener una relación lineal, considerando el modelo variacional $\delta r = J(\theta) \delta(\theta)$, donde $J(\theta)$ representa el jacobiano para $f(\theta)$. Finalmente, se puede obtener la relación inversa:

$$\delta \theta = J^{-1}(\theta) \delta r$$

que permite obtener una solución más simple siempre y cuando J^{-1} exista, ya que para cuando el manipulador adquiere una posición degenerada, no se puede obtener dicha expresión.

A continuación se presenta el método desarrollado por R.P. Paul (1) para manipuladores sencillos, que permite obtener una solución para los diferentes ángulos de las articulaciones.

Teniendo en consideración que cualquier manipulador está integrado por una serie de eslabones conectados entre sí, será necesario asignar marcos de coordenadas a las diferentes articulaciones (unión de eslabones), con el fin de obtener una matriz que relacione el movimiento de la articulación $i-1$ con respecto a la articulación i .

Para la obtención de esta matriz (matriz A), se hace uso de las transformaciones homogéneas, que describen la relación entre un eslabón dado y el siguiente. La matriz A es una matriz simple de transformación homogénea que describe la rotación y traslación relativa entre los sistemas de coordenadas de las diferentes ar-

ticulaciones.

De esta manera, la matriz de transformación para una articulación de revolución, esta dada como :

$$A_{i-1} = \begin{vmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & A_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & A_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & D_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

En otras palabras, un matriz homogénea representa geoméricamente la localización de un sistema de coordenadas (posición y orientación) girado o trasladado con respecto a un sistema de coordenadas de referencia.

Para un manipulador con 6 grados de libertad, la posición y orientación del eslabón final con respecto a la base esta dado por :

$$T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad \dots\dots(1)$$

De una manera general, T_6 representa la posición y orientación del último punto del eslabón i con respecto al sistema de coordenadas de base, en donde T_6 es el producto en cadena de las matrices sucesivas de transformación de coordenadas de A_{i-1} , expresado como :

$$T_0^i = A_0^1 * A_1^2 * \dots * A_{i-1}^i = \prod_{j=1}^i A_{j-1}^j$$

para $i = 1, 2, 3, \dots$

$$T_0^i = \begin{vmatrix} X_i & Y_i & Z_i & P_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_0^i & P_0^i \\ \hline 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

Para el caso de $i = 6$, obtenemos la matriz $T_6 = H$ que es utilizada frecuentemente en el análisis cinemático, y se denomina como "Matriz Cinemática del Brazo del Robot". Considerando la matriz T_6 como :

$$T_6 = \begin{vmatrix} x_6 & y_6 & z_6 & P_6 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n & s & a & P \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ \hline n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

donde :

- n = vector normal a la mano y es ortogonal a los dedos del OT
- s = vector de deslizamiento, apunta en la dirección del movimiento de los dedos (abrir o cerrar la tenaza)
- a = vector de aproximación, apunta en la dirección normal de la palma de la mano
- P = vector de posición de coordenadas P_x, P_y, P_z , que va del origen del sistema de coordenadas de base al origen del sistema de coordenadas de la mano y se localiza generalmente en el centroide del espacio comprendido entre los dedos.

El producto de las matrices A_i se realiza comenzando por el último eslabón y retrocediendo hacia la base, es decir :

$$U_5 \Delta A_4^5 * A_5^6 = \begin{vmatrix} U_6 \Delta A_5^6 & & & \\ C_5 S_6 & C_5 S_6 & S_5 & D_6 S_5 \\ S_5 C_6 & -S_5 S_6 & -C_5 & -D_6 C_5 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

hasta llegar a obtener $U_1 = T_6$. Considerando la expresión 3 se llega a obtener las siguientes expresiones :

$$n_x = C_1 \{ C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6) - S_{23} S_5 C_6 \} - S_1 (S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6) \quad . (4)$$

$$n_y = S_1 \{ C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6) - S_{23} S_5 C_6 \} + C_1 (S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6) \quad . (5)$$

$$n_z = -S_{23} \{ C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6 \} - C_{23} S_5 S_6 \quad . (6)$$

$$s_x = C_1 \{ -C_{23} (C_4 C_5 C_6 + S_4 S_6) + S_{23} S_5 S_6 \} - S_1 (-S_4 C_5 C_6 + C_4 C_6) \quad . (7)$$

$$s_y = S_1 \{ -C_{23} (C_4 C_5 C_6 + S_4 C_6) + S_{23} S_5 S_6 \} + C_1 (-S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6) \quad . (8)$$

$$s_z = S_{23} (C_4 C_5 C_6 + S_4 C_6) + C_{23} S_5 S_6 \quad . (9)$$

$$a_x = C_1 (C_{23} C_4 S_5 + S_{23} C_5) - S_1 S_4 S_5 \quad . (10)$$

$$a_y = S_1 (C_{23} C_4 S_5 + S_{23} C_5) + C_1 S_4 S_5 \quad . (11)$$

$$a_z = -S_{23} C_4 S_5 + C_{23} C_5 \quad . (12)$$

$$p_x = C_1 (D_4 S_{23} + A_3 C_{23} + A_2 C_2) - S_1 D_3 \quad . (13)$$

$$p_y = S_1 (D_4 S_{23} + A_3 C_{23} + A_2 C_2) + C_1 D_3 \quad . (14)$$

$$p_z = -(-D_4 C_{23} + A_3 S_{23} + A_2 S_2) \quad . (15)$$

en donde $S_{23} = \text{Sen}(\theta_2 + \theta_3)$ y $C_{23} = \text{Cos}(\theta_2 + \theta_3)$

Entre los problemas que se presentan en la solución del sistema de ecuaciones obtenido anteriormente, están los siguientes :

- Ecuaciones con coeficientes variables en el tiempo (funciones trascendentales)
- Es necesario calcular tanto el Seno como el Coseno para obtener valores únicos y precisos de los diferentes ángulos
- Para una posición dada, existe un conjunto de posibles soluciones
- Se cuenta con 12 ecuaciones y 6 incógnitas

Los métodos empleados para obtener una solución adecuada, son generalmente lentos y están muy lejos de poder aplicarse al cálculo en tiempo real del control del manipulador. En este aspecto, se recomienda no recurrir a manipulaciones algebraicas complicadas y enfocarse al desarrollo de algoritmos eficientes basados en propiedades invariantes de las matrices ortogonales y que sean económicos en cuanto memoria requerida y tiempo de ejecución. Por otra parte, no es recomendable la utilización de

lenguajes de alto nivel (FORTRAN), ya que consumen mucho tiempo de procesamiento.

Ya que para un manipulador con 6 grados de libertad, 3 corresponden a la posición ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) y 3 a la orientación ($\theta_4, \theta_5, \theta_6$) es posible resolver el análisis cinemático en dos etapas. La primera corresponde a la obtención de los ángulos de posición y la otra a los ángulos de orientación.

Uno de los problemas que presenta la solución del sistema de ecuaciones es que cuenta con 12 ecuaciones con 6 incógnitas. Sin embargo, se pueden obtener otras ecuaciones matriciales realizando las siguientes operaciones :

$$A_1^{-1} * T_n = U_2 \quad \dots(16)$$

$$A_2^{-1} * A_1 * T_n = U_3 \quad \dots(17)$$

$$A_3^{-1} * A_2 * A_1 * T_n = U_4 \quad \dots(18)$$

$$A_4^{-1} * A_3 * A_2 * A_1 * T_n = U_5 \quad \dots(19)$$

$$A_5^{-1} * A_4 * A_3 * A_2 * A_1 * T_n = U_6 \quad \dots(20)$$

Los elementos de las matrices del lado izquierdo están en función de los elementos de T_6 y de las variables de la articulación $i-1$. Los elementos del lado derecho valen cero, constantes o funciones de las variables de la i -ésima a la sexta articulación. Como la igualdad de matrices implica igualdad de elementos, se obtienen doce ecuaciones para cada uno de los componentes de los vectores n, s, a y P .

De esta manera, multiplicando la ecuación 1 por la matriz inversa de A , se obtiene lo siguiente :

$$A_1^{-1} * T_6 = A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6 \quad \dots(21)$$

$$A_1^{-1} * T_6 = U_2 \quad \dots(22)$$

Aplicando el concepto de la matriz inversa de una matriz homogénea (1), la ecuación 22 quedaría de la siguiente forma :

$$A_1^{-1} * T_6 = \begin{vmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

expresándolo de otra forma sería :

$$A_1^{-1} * T_6 = \begin{vmatrix} f_{11}(n) & f_{11}(s) & f_{11}(a) & f_{11}(P) \\ f_{12}(n) & f_{12}(s) & f_{12}(a) & f_{12}(P) \\ f_{13}(n) & f_{13}(s) & f_{13}(a) & f_{13}(P) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \dots(23)$$

donde:

$$f_{11} = C_1x + S_1y \quad f_{12} = -z \quad f_{13} = -S_1x + C_1y \quad \dots(24)$$

x, y y z se refiere a las componentes de los vectores, dadas - como argumentos de las expresiones f11, f12 y f13; por ejemplo:

$$f11(n) = C1nx + S1ny$$

El lado derecho de la ecuación 22 se obtiene como :

$$U2 = \begin{vmatrix} C23(C4C5C6 - S4S6) - S23S5C6 & -C23(C4C5S6 + S4C6) + S23S5S6 \\ S23(C4C5C6 - S4S6) + C23S5C6 & -S23(C4C5S6 + S4C6) - C23S5S6 \\ S4C5C6 + C4S6 & -S4C5S6 + C4C6 \\ 0 & 0 \\ C23C4S5 + S23 C5 & D4S23 + A3C23 + A2C2 \\ S23C4S5 - C23 C5 & -D4C23 + A3S23 + A2S2 \\ S4S5 & D3 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \dots (25)$$

Todos los elementos del lado derecho de la ecuación 25 están en función de θ_2 , θ_{23} , D_4 , θ_4 , θ_5 , θ_6 , excepto el elemento (3,4), el cual se puede obtener como :

$$f13 = D3 ; \quad -S1Px + C1Py = -D3 \quad \dots (26)$$

Cuya solución es posible realizando las siguientes sustituciones trigonométricas :

$$\begin{aligned} Px &= r \cos \phi \\ Py &= r \sin \phi \\ r &= + (Px^2 + Py^2) \end{aligned} \quad \phi = \tan^{-1} \frac{(Px)}{(Py)} \quad \dots (27)$$

Como el numerador o el denominador de la ecuación 27 pueden valer cero, se utiliza la función arctang para obtener valores de ϕ más precisos, ya que toma en cuenta el signo de ambos elementos para determinar en que cuadrante se encuentra el valor del ángulo obtenido.

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación 26 :

$$\begin{aligned} S\phi C\theta_1 - C\phi S\theta_1 &= D3/r & \text{donde } 0 < D3/r < 1 \\ S(\phi - \theta_1) &= D3/r & \text{donde } 0 < \phi - \theta_1 < \pi \end{aligned}$$

el coseno se puede obtener como :

$$C(\phi - \theta_1) = \pm 1 - (D3/r)^2 \quad \dots (28)$$

Donde el signo (-) corresponde a una configuración del hombro del brazo izquierdo, mientras que el signo (+) a una configuración del hombro del brazo derecho. Finalmente :

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{(Px)}{(Py)} - \tan^{-1} \frac{D3}{\pm r^2 - D3^2} \quad \dots (29)$$

Una vez conocido el valor de θ_1 , se podrá definir el valor de la expresión del lado izquierdo de la ecuación 22. Por otra

parte, se tiene que esta expresión esta en función de las coordenadas individuales de las articulaciones. En el caso de un manipulador que tenga 2 o más ejes paralelos de articulaciones, la matriz T6 estará expresada en términos de sumas o diferencias de los ángulos relacionados con esos ejes, las cuales deberán ser evaluadas antes de calcular el valor de los ángulos.

La solución para esa suma de ángulos, involucra la suma de cuadrados de dos ecuaciones, como en el caso de obtener los valores de θ_2 y θ_3 .

Los elementos (1,4) y (2,4) de la ecuación 22 están definidos de la siguiente manera :

$$\begin{aligned} D4S23 + A3C23 + A2 C2 &= C1Px + S1Py \\ -D4C23 + A3S23 + A2S2 &= -Pz \\ f11(P) = C1Px + S1Py & \quad -Pz = f12(P) \end{aligned}$$

Realizando operaciones algebraicas y simplificando, se tiene:

$$f11^2(P) + f12^2(P) - D4^2 - A3^2 - A2^2 = 2A2D4S3 + 2A2A3C3$$

En donde, el lado izquierdo es conocido y las únicas incógnitas son S2 y C3, pudiéndose obtener una ecuación que se asemeje a la ecuación 27, resultando :

$$\begin{aligned} D &= f11^2(P) + f12^2(P) - D4^2 - A3^2 - A2^2 \\ e &= 4A2^2 A3^2 + 4A2^2 D4^2 \end{aligned}$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{A3}{-D4} - \arctan \frac{D}{\pm e - D^2}$$

Procediendo de una manera similar para las ecuaciones 17 a 20, se pueden obtener expresiones para calcular los valores de los diferentes ángulos de las articulaciones del brazo del robot. A continuación se presentan las expresiones que se obtienen al realizar las operaciones indicadas en las ecuaciones 17 a 20 :

$$S23 = \frac{w2 f11(P) - w1 Pz}{f11^2(P) + Pz^2} \quad C23 = \frac{w1 f11(P) + w2 Pz}{f11^2(P) + Pz^2}$$

$$w1 = A2C3 + A3 \quad w2 = D4 + A2S3$$

$$\theta_{23} = \arctan \frac{w2 f11(P) - w1 Pz}{w1 f11(P) + w2 Pz} \quad \dots (30)$$

$$\theta_2 = \theta_{23} - \theta_3 \quad \dots (31)$$

Una vez conocido el lado izquierdo de la ecuación 18, se podrá verificar fácilmente el lado derecho mediante funciones de variables simples. Los elementos $f31(a)$ y $f32(a)$, proporcionan ecuaciones para la obtención de los valores del Seno y Coseno de θ_4 , con la condición de que θ_5 sea diferente de cero. Cuando $\text{Sen } \theta_5 = 0$, implica que $\theta_5 = 0$, en donde el manipulador llega a una posición degenerada, debido a que los ejes de las articulaciones 4 y 6 se encuentran alineados. En este caso ($\theta_5=0$) se tiene la libertad de seleccionar cualquier valor para θ_4 . Generalmente se define de la siguiente manera :

triz A, en donde la matriz A representa una articulación de revolución, derivando cada elemento con respecto a la variable de la articulación (θ):

$$dA = \begin{vmatrix} -\text{Sen}\theta & -\text{Cos}\theta\text{Cos}\alpha & \text{Cos}\theta\text{Sen}\alpha & -A\text{Sen}\theta \\ \text{Cos}\theta & -\text{Sen}\theta\text{Cos}\alpha & \text{Sen}\theta\text{Sen}\alpha & A\text{Cos}\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} d\theta \quad \dots\dots(35)$$

El cambio diferencial de cualquier transformación se puede expresar en términos de los cambios diferenciales de sus elementos o en términos de una traslación y una rotación diferencial. Estos cambios se pueden expresar en un marco de coordenadas dado o en el marco de coordenadas de base. De esta manera, la transformación diferencial se puede expresar como:

$$T + dT = \text{Tras}(dx, dy, dz) \text{Rot}(k, d\theta) T \quad \dots\dots(36)$$

donde $\text{tras}(dx, dy, dz)$ representa una traslación en coordenadas de base, $\text{Rot}(k, d\theta)$ representa una rotación diferencial en coordenadas de base, de donde se puede obtener que:

$$dT = (\text{tras}(dx, dy, dz) \text{Rot}(k, d\theta) - I) T$$

$$\Delta = \text{tras}(dx, dy, dz) \text{Rot}(k, d\theta) - I \quad \dots\dots(37)$$

Evaluando el producto matricial de la ecuación 37 se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & -kzd\theta & kyd\theta & dx \\ kzd\theta & 0 & -kxd\theta & dy \\ -kyd\theta & kxd\theta & 0 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \dots\dots(38)$$

Considerando la siguiente expresión para una rotación diferencial en coordenadas de base, se tiene;

$$\text{Rot}(k, \theta) = \begin{vmatrix} 1 & -kzd\theta & kyd\theta & 0 \\ kzd\theta & 1 & -kxd\theta & 0 \\ -kyd\theta & kxd\theta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots\dots(39)$$

Análogamente, se puede evaluar el producto matricial de las 3 rotaciones diferenciales e ignorando los términos de segundo orden ($\delta x, \delta y$), se obtiene lo siguiente:

$$\text{Rot}(x, \delta x) \text{Rot}(y, \delta y) \text{Rot}(z, \delta z) = \begin{vmatrix} 1 & -\delta z & \delta y & 0 \\ \delta z & 1 & -\delta x & 0 \\ -\delta y & \delta x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots(40)$$

Comparando los elementos de la matriz 40 con los elementos de la matriz 39, se observa que una rotación diferencial d alre-

dedor de un eje k es equivalente a 3 rotaciones diferenciales δx , δy , δz donde, a partir de la ecuación 38 se puede obtener la siguiente expresión :

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & -\delta z & \delta y & dx \\ \delta z & 0 & -\delta x & dy \\ -\delta y & \delta x & 0 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Resumiendo se puede decir que un cambio diferencial de cualquier transformación T , se puede expresar en términos de los cambios diferenciales de sus elementos o en términos de una traslación y una rotación diferencial con respecto a T . La relación entre esas dos variaciones esta dada por :

$$T + \Delta T = T * (I + \Delta T) \quad dT = T * \Delta T$$

$$dT = \begin{vmatrix} dnx & dsx & dax & dPx \\ dny & dsy & day & dPy \\ dnz & dsz & daz & dPz \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \Delta T = \begin{vmatrix} 0 & -\delta z & \delta y & dx \\ \delta z & 0 & -\delta x & dy \\ -\delta y & \delta x & 0 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \dots (41)$$

Para un manipulador con 6 grados de libertad, T_6 se evaluará como una función de los cambios en las coordenadas de las articulaciones, y si se desea conocer el valor de dT_6 , se debe realizar la operación indicada en la ecuación 41.

En el caso de un manipulador en donde se quisiera hacer un cambio con respecto al marco de coordenadas del eslabón $n-1$ de n , se podría encontrar un cambio equivalente en T_6 , ΔT_6 se expresaría como :

$$T_6 * \Delta T_6 = A_1 * A_2 * \dots * A_{n-1} * \Delta_n * A_n * \dots * A_6$$

simplificando se tiene que :

$$\Delta T_6 = (A_n * \dots * A_6)^{-1} * \Delta_n * (A_n * \dots * A_6)$$

Si el eslabón n esta conectado a una articulación de revolución, se realizara un cambio en las coordenadas de la articulación $d\theta_n$, correspondiendole una rotación alrededor del eje Z del eslabón $n-1$ (marco de coordenadas del eslabón $n-1$), de tal manera que :

$$\Delta_{rev} = \begin{vmatrix} 0 & -d\theta & 0 & 0 \\ d\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Si se trata de una articulación prismática, el cambio en las coordenadas de la articulación dd_n , corresponde a una traslación a lo largo del eje Z del marco de coordenadas del eslabón $n-1$.

Si se define U_n como $U_n = (A_n * A_{n-1} * \dots * A_6)$ cuyos elementos serán :

$$U_n = \begin{pmatrix} nx & sx & ax & Px \\ ny & sy & ay & Py \\ nz & sz & az & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \Delta T6 = U_n^{-1} * \Delta_{rev} * U_n$$

de tal manera que :

$$\Delta T6 = \begin{pmatrix} 0 & szny - oynx & axny - aynx & Pxnny - Pynx \\ nxsy - sxny & 0 & axsy - aysx & Pxsy - Pysx \\ nxay - nyax & sxay - syax & 0 & Pxay - Pyax \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} d\theta_n \\ \dots \end{matrix} \quad \dots (42)$$

Considerando que los vectores n, s, a se pueden definir en términos del producto cruzado, se tiene lo siguiente ; ya que el producto cruzado entre vectores unitarios ortogonales es igual a otros vectores unitarios, se tiene :

$$\Delta T6 = \begin{pmatrix} 0 & (sxn)_z & (axn)_z & (Pxn)_z \\ (nxs)_z & 0 & (axs)_z & (Pxs)_z \\ (nxa)_z & (sxa)_z & 0 & (Pxa)_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} d\theta_n \quad \dots (43)$$

Si se escribe $T6$ en forma de vector columna, que represente una rotación y una traslación diferencial, se puede escribir lo siguiente :

$$\begin{pmatrix} T6 \ dx \\ T6 \ dy \\ T6 \ dz \\ T6 \ \delta x \\ T6 \ \delta y \\ T6 \ \delta z \end{pmatrix} = \{ J \} * \begin{pmatrix} dq1 \\ dq2 \\ dq3 \\ dq4 \\ dq5 \\ dq6 \end{pmatrix} \quad \dots (44)$$

En donde $dqi = d\theta_i$ si se trata de una articulación de revolución y $dqi = ddi$ si se trata de una prismática. De esta manera, el jacobiano $\{J\}$ estará integrado por 6 columnas de la forma :

| <u>Revolución</u> | <u>Prismática</u> |
|-------------------|-------------------|
| $(P \times n)_z$ | nz |
| $(P \times s)_z$ | sz |
| $(P \times a)_z$ | az |
| nz | 0 |
| sz | 0 |
| az | 0 |

Usando los valores obtenidos en la sección anterior (solución de ecuaciones cinemáticas) se pueden evaluar las expresiones correspondientes para las columnas de la matriz que forman el jacobiano (J). Los cálculos que se requieren para obtener la solución de la expresión correspondiente al jacobiano, son 51 multiplicaciones y 24 sumas. Para cada solución de la ecuación 44, se requieren 36 multiplicaciones y 30 sumas.

Para una manipulación dada se debe obtener una solución para la ecuación 44, esto es, dado un cambio diferencial de posición y orientación $dx, dy, dz, \delta x, \delta y, \delta z$, se desea saber cual sera el cambio diferencial en las coordenadas de la articulación dq_i :

$$(dq_1, dq_2, \dots, dq_6)^t = \{J\} * (dx, dy, dz, \delta x, \delta y, \delta z)$$

Algunas veces es posible invertir simbólicamente el jacobiano aunque llega a ser difícil, ya que las expresiones de sus elementos son muy complejas. Una solución numérica para la ecuación 44 puede obtenerse, aunque el método que se sigue es lento y complicado, ya que es muy frecuente que el manipulador adopte posiciones degeneradas.

Un método que proporciona una aproximación adecuada, consiste en diferenciar la solución obtenida para las variables de las articulaciones (θ_i) dado un vector de T_6 . Este método proporciona expresiones para cambios diferenciales, de la misma manera que se obtuvieron las coordenadas de las articulaciones.

Las expresiones para cada cambio diferencial de las coordenadas de las articulaciones estara en función de los cambios de T_6 , así como de los cambios diferenciales de los ángulos obtenidos. De esta manera, se obtienen expresiones simples y, si debido a las restricciones de las articulaciones, no es posible realizar un cambio, entonces la variación valdra cero, proporcionando una solución correcta para la siguiente articulación.

La solución al análisis diferencial $d\theta/dT_6$ equivale a realizar 91 multiplicaciones y 55 sumas, sin considerar la solución de ninguna función trascendental, considerando que ya ha sido evaluada.

A partir de las ecuaciones cinemáticas se puede obtener de una manera más fácil el jacobiano para cualquier manipulador y obtener de una manera un poco difícil una solución al problema del control. Más aún, si dichas ecuaciones han sido ya resueltas, se puede determinar el cambio diferencial en las coordenadas de las articulaciones a partir de un cambio diferencial en la posición y orientación del manipulador.

2.3.- MODELO DINAMICO

Los modelos desarrollados en las secciones anteriores (geométrico y cinemático) para elaborar los adecuados sistemas de control del manipulador, fueron obtenidos a partir de la consideración de que el manipulador se encuentra en equilibrio dinámico y que trabaja a bajas velocidades.

El equilibrio del manipulador se puede efectuar por medio de masas adicionales de balanceo (los accionadores juegan eventualmente este papel) o en algunos casos, por medio de resortes.

Los accionadores son los dispositivos encargados de crear las fuerzas y pares de fuerzas necesarios para animar la estructura articulada del manipulador, mientras que los transmisores, transportan la energía de la fuente al órgano receptor. A nivel de conceptos básicos, es importante considerar la posibilidad de acoplar los diversos motores en un lugar común y poner en funcionamiento las transmisiones para animar los diferentes ejes; o por el contrario, considerar independiente a cada eje, desde el punto de vista de motorización. Los diferentes constructores de robots industriales que existen en el mundo proponen dos soluciones: una selección fundamental consiste en considerar una mecánica rígida, precisa, con transmisiones tipo engranes, cremalleras, o por el contrario, seleccionar robots flexibles con transmisiones tipo bandas o polipastos.

Una consideración general consiste en subrayar las diferencias importantes entre una máquina-herramienta y un robot, desde el punto de vista de motorización. Los robots se caracterizan por movimientos muy rápidos y de exigencias de precisión suficientes, mientras que las máquinas-herramientas son generalmente muy exigentes en precisión pero con velocidades de desplazamientos muy bajas.

Las 3 grandes tecnologías en motorización, hidráulica, neumática y eléctrica, son utilizadas tanto para los grados de libertad de rotación como para los de traslación. Se observa que la energía neumática genera acciones que dependen básicamente de la compresibilidad del aire. Este tipo de energía se utiliza frecuentemente en los brazos de alimentación de máquinas automáticas y de los robots tipo "toma-coloca" ("pick-place"). La energía hidráulica se emplea generalmente en los telemanipuladores para el manejo de cargas pesadas en función de las características de potencias importantes que proporciona. Este tipo de energía presenta numerosos puntos a su favor en el campo de la robótica, principalmente en el rendimiento potencia/volumen, precisión, tiempos de respuesta, etc. Las necesidades que presenta la robótica industrial, motiva a los constructores de robots a desarrollar nuevas componentes como los microgatos hidráulicos, los gatos giratorios, motores hidráulicos miniaturizados y los gatos paso a paso que deberan, como sus homólogos eléctricos, permitir el control en ciclo abierto. Los motores hidráulicos que se emplean en mayor número son de 2000-3500 ciclos/min con cilindros

de 30 a 40 cm. cúbicos/ciclo a 140 bars. En lo que se refiere a los motores paso a paso, los más utilizados se sitúan entre 20 y 200 mm con distancia de paso de 0.3 mm, 50-300 pasos y una velocidad máxima de algunas centésimas de paso por segundo.

Los motores de servomecanismo de corriente continua de baja inercia, también son utilizados en robótica, aunque están siendo desplazados por los motores paso a paso cuando las exigencias de precisión, posición y aceleración no son muy elevadas. Los motores de ejes múltiples, motores de imanes permanentes al samarium cobalto, constituyen algunos elementos susceptibles de encontrar aplicación en el campo de la robótica.

La producción de los movimientos de los robots requiere de un gasto de energía para vencer las fuerzas de fricción seca y viscosa, las fuerzas debidas al campo gravitatorio, las fuerzas de inercia que resultan de las aceleraciones de los cuerpos en movimiento. Esta energía es producida mediante los motores o accionadores, que pueden ser de los siguientes tipos :

Accionadores Eléctricos. - dentro de estos, los más importantes son los motores de corriente continua y los motores paso a paso. Los de corriente continua se prestan bien para la retroalimentación de posición y son los que se emplean en diversos tipos de robots de alta precisión. Sin embargo, presentan dos desventajas congénitas :

- son relativamente pesados y voluminosos

- suministran la potencia con alta velocidad y bajo par

Estas desventajas se pueden remediar de la siguiente forma :

- empleando sistemas mecánicos de transmisión que permitan reubicar los motores en una zona donde sean menos estorbosos.

- utilizando reductores de velocidad para aumentar el par

La reducción de velocidad se puede efectuar con el sistema clásico de trenes de engranes y los sistemas de poleas y cables o correas, que funcionan a la vez como transmisores y como reductores. La transmisión mediante tuercas y tornillos, por su parte, es útil en la transmisión de movimiento en que se requiere transformar movimiento rotatorio en movimiento de traslación de amplitud pequeña.

Por otro lado, los motores eléctricos paso a paso son generalmente de potencia insuficiente y presentan siempre el riesgo de la pérdida de sincronismo. A veces se acoplan a motores hidráulicos para constituir un accionador electro-hidráulico en cuya configuración, un distribuidor de aceite a presión es gobernado por un motor paso a paso, obteniéndose así una amplificación de la potencia del orden de 300 a 400. Los progresos recientes en los motores paso a paso permiten a veces obtener directamente una potencia del orden de 750 watts.

Accionadores Hidráulicos .- este tipo de accionadores no son más que un medio para transmitir la potencia ya que en estos siste--

mas siempre esta presente un compresor (eléctrico) de aceite. Así, el aceite a presión es conducido a través de canalizaciones hidráulicas flexibles. Con los motores hidráulicos, ya sea de rotación o de traslación, se puede obtener sin reducción, fuerzas importantes en espacios reducidos, lo cual explica el éxito de algunos robots como el REGIE RENAULT.

El inconveniente principal de la solución hidráulica reside en los problemas delicados de sellado. Como en el caso de los hidráulicos, Los ACCIONADORES NEUMATICOS utilizan recintos cerrados de volumen variable (capsulismos), con la diferencia de que en este caso el fluido es aire comprimido. Sin embargo, la compresibilidad del aire introduce características desfavorables en estos sistemas. Así, aunque se puedan controlar las velocidades del flujo del aire, el control de las aceleraciones es casi nulo y los movimientos producidos son muy irregulares. La generalidad de la distribución del aire comprimido en las fábricas y la facilidad en la construcción de los gatos neumáticos, hace que se utilicen ventajosamente este tipo de accionadores para la construcción de manipuladores secuenciales.

La colocación de los accionadores en proximidad a su lugar de utilización facilita el montaje aunque tienden a aumentar la masa de manipulación.

Para un accionador rotativo, la solución más simple consiste en colocarlo al nivel de la articulación que controlara (generalmente utilizado para el caso de motores hidráulicos).

En el caso de motores eléctricos, el problema de la adaptabilidad de la velocidad y del par, así como su colocación al nivel del eje de las articulaciones, entorpece de manera sensible el funcionamiento del manipulador (un accionador eléctrico es en promedio 10 veces más pesado que un accionador hidráulico de la misma potencia).

Este tipo de accionadores presenta una inconveniente mayor en el caso de un manipulador de baja inercia y presenta diferentes soluciones, como la colocación de accionadores en las partes fijas del robot ; de esta manera, la inercia del sistema accionador se reducirá a la inercia de los elementos de transmisión del par.

Como se mencionó anteriormente, una de las consideraciones que se hizo en la obtención de los modelos para el control del manipulador, era que trabajaban a bajas velocidades. Sin embargo, estos modelos dejan de ser funcionales conforme aumenta la velocidad de operación, ya que se presentan efectos desfavorables para el control efectivo del manipulador (fuerzas inerciales, centrífugas, deformaciones elásticas, etc.). Siendo necesario considerar sus efectos sobre el funcionamiento del manipulador para que pueda ser funcional a altas velocidades.

Tanto la inercia del manipulador como los efectos de la gravedad dependerán de la configuración y, por lo tanto, de los desplazamientos de las articulaciones.

Las fuerzas centrífugas y los efectos de Coriolis, dependen del -- producto de las velocidades de las articulaciones.

La descripción de una tarea que debiera realizar un manipulador, esta integerada por la secuencia de puntos por los que debiera de pasar el OT, los cuales, generalmente se encuentran definidos en las coordenadas de trabajo del manipulador (cartesianas, esféricas, cilíndricas o polares, figura 1). Sin embargo, al considerar que las cargas que movera el manipulador pueden ser variables, los movimientos de las diferentes articulaciones cambiaran de velocidad y es posible que el manipulador no sea capaz de seguir la secuencia de puntos deseada.

Para controlar a un manipulador que maneja cargas variables y que se mueve a lo largo de planos definidos con anterioridad, es necesario calcular las fuerzas y pares de fuerzas que se requieren para accionar las diferentes articulaciones que integran a un manipulador, con exactitud y dentro de un rango de frecuencias adecuado.

Para lograr este propósito han surgido una serie de procedimientos o métodos que permiten la obtención del modelo dinámico que describe las características del comportamiento dinámico del manipulador. Entre estos métodos, se encuentran los siguientes :

- Ecuaciones de Lagrange
- Ecuaciones de Newton- Euler
- Principio de D'Alembert (trabajo virtual)
- Función de Gibbs

De los métodos anteriores, los dos primeros son los más utilizados ya que proporcionan sistemas de ecuaciones que permiten elaborar algoritmos de programación para obtener los cálculos necesarios de los parámetros dinámicos del manipulador (velocidad, aceleración, fuerzas) y poder elaborar el adecuado esquema de control.

Las ecuaciones que se obtienen aplicando estos métodos proporcionan un sistema de n-ecuaciones diferenciales de segundo orden fuertemente acopladas y no-lineales de la forma :

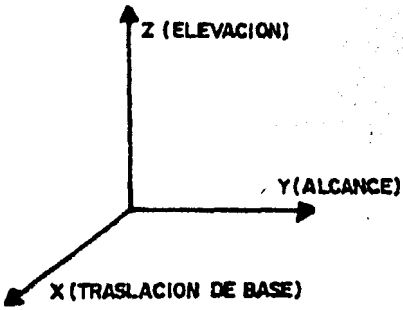
$$J(q) \ddot{q} + V\dot{q} + f(\dot{q}_i, \dot{q}_j, q; i, j=1, 2, \dots, n) + g(q) = r \quad \dots\dots\dots (1)$$

donde :

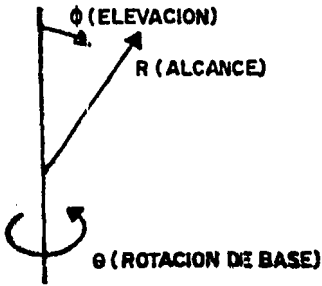
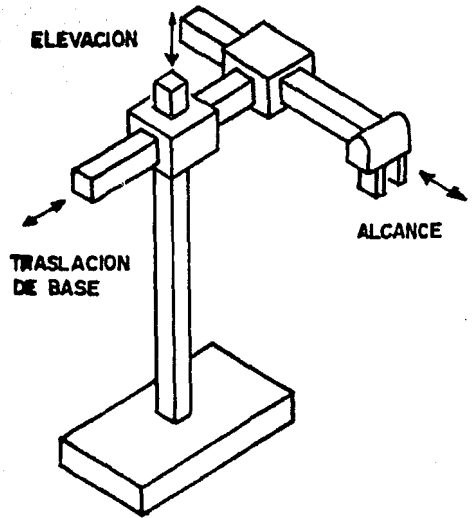
- J(q) matriz de inercia (simétrica de n x n)
- V matriz de fricción viscosa de n x n
- f(\dot{q}_i, \dot{q}_j, q) vector que define los efectos de las fuerzas centrífugas y de Coriolis (n x 1)
- g(q) vector que define los efectos de la gravedad

SISTEMA DE COORDENADAS

DISEÑO TÍPICO DE ROBOT



RECTANGULARES



ESFERICAS

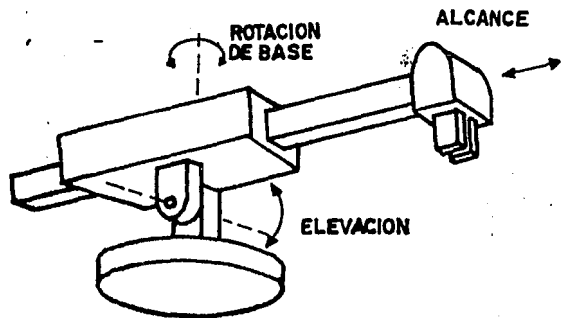
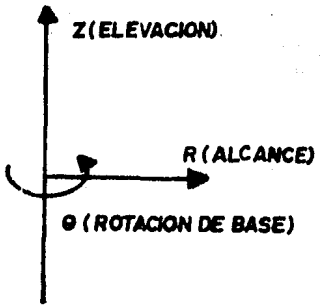


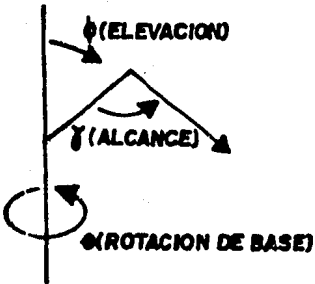
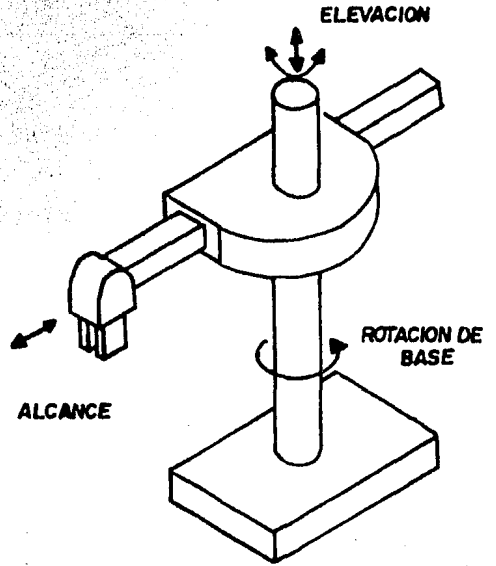
FIG. 1.- COORDENADAS DE TRABAJO DEL MANIPULADOR

SISTEMA DE COORDENADAS

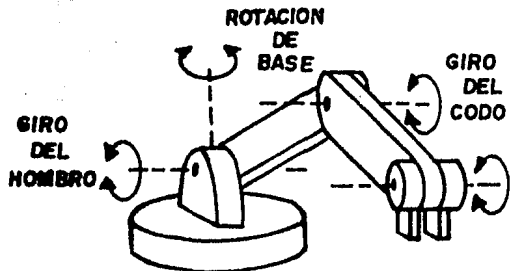


CILINDRICAS

DISEÑO TIPICO DE ROBOT



DE ARTICULACION



r vector de las fuerzas generalizadas que actúa sobre cada articulación ($n \times 1$)

La resolución de este sistema de ecuaciones es muy compleja, siendo difícil establecer un adecuado esquema de control que funcione en tiempo real. Utilizando el método de Lagrange, se requiere aproximadamente de 8 segundos para obtener una solución a través de una simulación en lenguaje FORTRAN.

Para disminuir el tiempo de cálculo, algunos investigadores han obtenido un modelo a partir de ecuaciones simplificadas, despreciando los términos de segundo orden tales como los efectos de las fuerzas de Coriolis y las fuerzas centrífugas. Sin embargo, esta consideración es válida solamente cuando el manipulador trabaja a bajas velocidades, por lo que es imposible obtener un adecuado esquema de control para cuando el manipulador trabaje a altas velocidades.

Otra manera de mejorar la eficiencia del modelo de Lagrange, es a través del análisis recursivo desarrollado por HOLLERBACH ¹. Este método presenta la desventaja de destruir la "estructura del modelo dinámico" que es necesario conocer para realizar un perfecto control del manipulador.

En base a considerar las ventajas de velocidad y seguridad que se requieren, se desarrolló el método matricial de NEWTON-EULER, de derivación simple y que involucra términos de productos cruzados de vectores. Las ecuaciones que se obtienen por este método presentan recursividad hacia adelante y hacia atrás. Pueden aplicarse secuencialmente a cada uno de los eslabones que integran el brazo del manipulador.

La recursividad hacia adelante considera la información cinemática del manipulador tal como velocidad angular, aceleración angular, aceleración lineal, relacionando el marco de coordenadas de base (sistema inercial) con el marco de coordenadas del OT.

El análisis recursivo hacia atrás, considera la información de las fuerzas y momentos ejercidos en los centros de masa de cada eslabón, realizando el análisis a partir del sistema de coordenadas del OT hacia el sistema de coordenadas de base.

La formulación de este sistema de ecuaciones es mucho más simple y se realiza de una manera sistemática, proporcionando una menor inversión en el tiempo de cálculo. Para resolver el algoritmo obtenido por este método, se requiere aproximadamente de 3 milisegundos en una computadora PDP 11/45, lo que permite establecer un adecuado esquema de control en tiempo real en el espacio variable de las articulaciones del manipulador.

ECUACIONES DE LAGRANGE .-

La mayoría de los manipuladores que se están utilizando actualmente en los procesos de fabricación, están integrados por 6 articulaciones (P o R), siete eslabones y un OT. Cada articulación es

accionada por un motor, el cual esta acoplado a través de un adecuado sistema de engranes a un potenciómetro para señales de desplazamiento y a un tacómetro para señales de velocidad.

Uno de los aspectos a considerar en el análisis dinámico es obtener una aproximación a los efectos inerciales de cada una de las articulaciones y de los acoplamientos entre ellas.

Las ecuaciones dinámicas obtenidas por el método de Lagrange, relacionan las fuerzas y pares de fuerzas que se requieren para obtener una posición, velocidad y aceleración adecuadas para adquirir las características de movimiento del manipulador. Por otra parte, es necesario determinar los pares de fuerzas necesarios para vencer los efectos de la gravedad y obtener los movimientos deseados.

Para obtener este sistema de ecuaciones sería necesario determinar en primer lugar el lagrangiano del sistema, el cual esta definido como la diferencia entre la energía cinética (K) y la energía potencial (P) del sistema, expresado como :

$$L = K - P \quad \text{..... (2)}$$

Tanto la energía cinética (K) como la energía potencial (P) se pueden expresar en cualquier sistema de coordenadas que resulte conveniente a la realización del análisis. Las ecuaciones obtenidas en términos de K y P, se expresan como :

$$F_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad \text{..... (3)}$$

donde :

q_i coordenadas generalizadas del sistema

\dot{q}_i velocidad correspondiente

F_i fuerza o par de fuerza dependiendo si q_i esta en coordenadas lineales o angulares

Para obtener las ecuaciones básicas del lagrangiano, considerese el manipulador de la figura 2 que consta de dos eslabones, cuyas masas son m_1 y m_2 respectivamente. La longitud de los eslabones es d_1 y d_2 , y el manipulador se encuentra orientado hacia abajo en un campo de gravedad cuya aceleración es g . Las coordenadas generalizadas estan consideradas como θ_1 y θ_2 .

En base a las características descritas anteriormente, se puede definir la energía cinética como :

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 d_1^2 \dot{\theta}_1^2 \quad \text{..... (4)}$$

La energía potencial esta relacionada con la altura vertical expresada por y , obteniéndose la expresión para la energía potencial como :

$$P_1 = -m_1 g d_1 \text{Cos}(\theta_1) \quad \text{..... (5)}$$

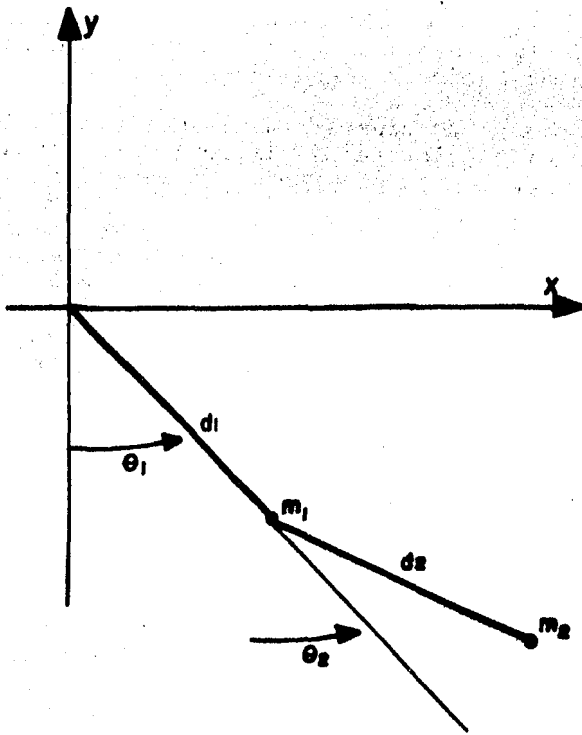


FIG. 2- MANIPULADOR DE 2 ESLABONES

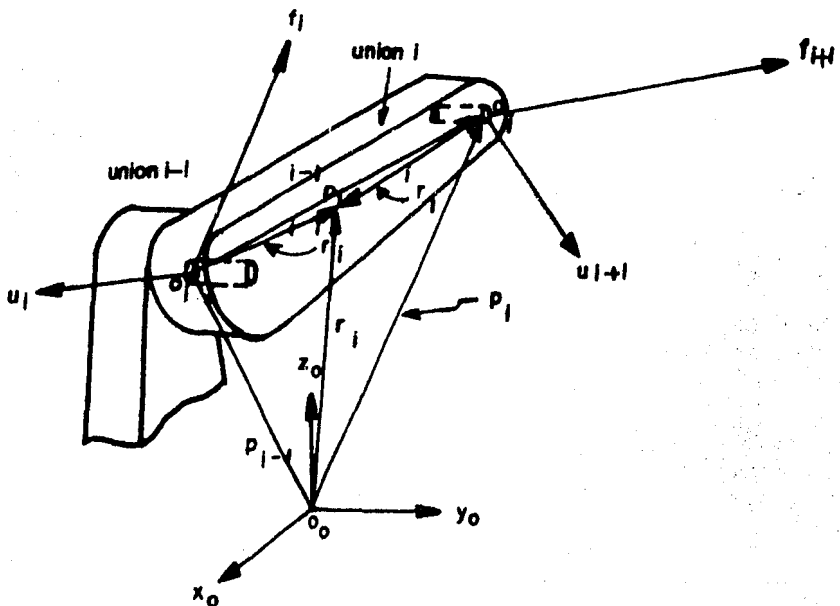


FIG. 3- FUERZAS Y MOMENTOS EJERCIDOS POR δ SOBRE LA UNION i

Para el caso de m_2 , se puede expresar la posición de sus coordenadas (cartesianas) como :

$$x_2 = d_1 \text{Sen}(\theta_1) + d_2 \text{Sen}(\theta_1 + \theta_2) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$y_2 = -d_1 \text{Cos}(\theta_1) - d_2 \text{Cos}(\theta_1 + \theta_2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

derivando las expresiones anteriores se obtienen las ecuaciones de las componentes de la velocidad :

$$\dot{x}_2 = d_1 \text{Cos}\theta_1(\dot{\theta}_1) + d_2 \text{Cos}(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{y}_2 = d_1 \text{Sen}\theta_1(\dot{\theta}_1) + d_2 \text{Sen}(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad \dots\dots\dots (9)$$

De esta manera, la velocidad al cuadrado estara expresada como :

$$v_2^2 = d_1^2 \dot{\theta}_1^2 + d_2^2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + 2d_1 d_2 \text{Cos}(\theta_2) (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \quad \dots\dots\dots (10)$$

A partir de esta ecuación se puede obtener de las ecuaciones 4 y 7, las expresiones para la energía potencial y cinética :

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 d_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 d_2^2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + m_2 d_1 d_2 \text{Cos}(\theta_2) (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$P_2 = -m_2 g d_1 \text{Cos}(\theta_1) - m_2 g d_2 \text{Cos}(\theta_1 + \theta_2) \quad \dots\dots\dots (12)$$

Una vez obtenida las ecuaciones anteriores, se puede determinar la expresión del lagrangiano, indicada en la ecuación 2 :

$$L = \frac{1}{2} (m_1 + m_1) d_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 d_2^2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + m_2 d_1 d_2 \text{Cos}(\theta_2) (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) + (m_1 + m_2) g d_1 \text{Cos}\theta_1 + m_2 g d_2 \text{Cos}(\theta_1 + \theta_2) \quad \dots\dots\dots (13)$$

Para obtener las ecuaciones dinámicas sera necesario derivar la ecuación (13), conforme lo indica la ecuación (3) :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) d_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 d_2^2 \dot{\theta}_1 + m_2 d_2^2 \dot{\theta}_2 + 2m_2 d_1 d_2 \text{Cos}(\theta_2) \dot{\theta}_1 + m_2 d_1 d_2 \text{Cos}(\theta_2) \dot{\theta}_2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = \{ (m_1 + m_2) d_1^2 + m_2 d_2^2 + 2m_2 d_1 d_2 \text{Cos}(\theta_2) \} \ddot{\theta}_1 + \{ m_2 d_2^2 + m_2 d_1 d_2 \text{Cos}(\theta_2) \} \ddot{\theta}_2 - 2m_2 d_1 d_2 \text{Sen}(\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2 d_1 d_2 \text{Sen}(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 + m_2) g d_1 \text{Sen}(\theta_1) - m_2 g d_2 \text{Sen}(\theta_1 + \theta_2) \quad \dots\dots\dots (16)$$

Combinando las ecuaciones 15 y 16 se obtiene el par necesario para la articulación 1 :

$$\begin{aligned}
 T1 = & \{ (m1 + m2)d1^2 + m2d2^2 + 2m2d1d2\cos(\theta2) \} \ddot{\theta}_1 \\
 & + \{ m2d2^2 + m2d1d2\cos(\theta2) \} \ddot{\theta}_2 \\
 & - 2m2d1d2\sin(\theta2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m2d1d2\sin(\theta2)(\dot{\theta}_2)^2 \\
 & + (m1 + m2)gd1\sin(\theta1) + m2gd2\sin(\theta1 + \theta2) \dots\dots (17)
 \end{aligned}$$

Para obtener el par necesario para la articulación 2 es necesario diferenciar el lagrangiano con respecto a θ_2 y $\dot{\theta}_2$; obteniéndose la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 T2 = & \{ m2d2^2 + m2d1d2\cos(\theta2) \} \ddot{\theta}_1 + m2d2^2 \ddot{\theta}_2 \\
 & - 2m2d1d2\sin(\theta2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m2d1d2\sin(\theta2)(\dot{\theta}_1)^2 \\
 & + m2gd2\sin(\theta1 + \theta2) \dots\dots (18)
 \end{aligned}$$

Otra manera de expresar las ecuaciones 17 y 18, de una manera más compacta, sería la siguiente:

$$\begin{aligned}
 T1 = & D11 \ddot{\theta}_1 + D12 \ddot{\theta}_2 + D111 \dot{\theta}_1^2 + D122 \dot{\theta}_2^2 \\
 & + D112 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + D121 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + D1 \dots\dots (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T2 = & D12 \ddot{\theta}_1 + D22 \ddot{\theta}_2 + D211 \dot{\theta}_1^2 + D222 \dot{\theta}_2^2 \\
 & + D212 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + D221 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + D2 \dots\dots (20)
 \end{aligned}$$

En las ecuaciones anteriores, los coeficientes de la forma D_{ii} son conocidos como Factores de Inercia Efectivos de la articulación i ; los coeficientes de la forma D_{ij} son conocidos como Inercia de Acople entre la articulación i y la articulación j , es decir, una aceleración en la articulación i o j origina un par en la articulación i o j . Los términos de la forma $D_{ijj} \dot{\theta}_j^2$ representa la fuerza centrífuga que actúa en la articulación i debida a la velocidad de la articulación j . La combinación de los términos $D_{ijk} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + D_{ikj} \dot{\theta}_k \dot{\theta}_j$ son conocidos como fuerzas de Coriolis que actúan en la articulación i debido a las velocidades de las articulaciones j y k . Finalmente, los términos de la forma D_i representan la fuerza de gravedad de la articulación i .

Comparando las ecuaciones 17 y 18 con las ecuaciones 19 y 20 se obtienen los valores de los coeficientes anteriores de tal manera que:

Inercias Efectivas:

$$\begin{aligned}
 D11 = & \{ (m1 + m2)d1^2 + m2d2^2 + 2m2d1d2\cos(\theta2) \} \\
 D22 = & m2d2^2
 \end{aligned}$$

Inercias de Acople:

$$D12 = m2d2^2 + m2d1d2\cos(\theta2)$$

Coefficientes de aceleración Centrífuga:

$$\begin{aligned}
 D111 = & 0 \\
 D122 = & -m2d1d2\sin(\theta2) \\
 D211 = & -m2d1d2\sin(\theta2)
 \end{aligned}$$

$$D_{222} = 0$$

Coefficiente de Coriolis :

$$D_{112} = D_{121} = -m_2 d_1 d_2 \text{Sen}(\theta_2)$$

$$D_{212} = D_{221} = -m_2 d_1 d_2 \text{Sen}(\theta_2)$$

Coefficientes de la Gravedad :

$$D_1 = (m_1 + m_2) g d_1 \text{Sen}(\theta_1) + m_2 g d_2 \text{Sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

$$D_2 = m_2 g d_2 \text{Sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

Para obtener las ecuaciones dinámicas para cualquier manipulador se hace uso de las matrices de transformación A (Denavit-Hartenberg). Primero se obtiene la velocidad de cualquier punto localizado en cualquier eslabón. Posteriormente se obtiene la energía cinética y potencial en forma de lagrangiano, para finalmente derivar y obtener las ecuaciones dinámicas {6}.

La posición de un punto r descrito con respecto al eslabón i, expresada en coordenadas de base esta dada por :

$$r = A_i \cdot {}^i r$$

La expresión para obtener la velocidad al cuadrado es :

$$\dot{r}^2 = \text{tr} \left\{ \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial A_i}{\partial \theta_j} r^i r^{it} \frac{\partial A_i}{\partial \theta_k} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \right\} \dots\dots(20)$$

Por otra parte, la energía cinética de un partícula de masa dm localizada en el eslabón i en r esta expresada por :

$$K_i = \frac{1}{2} \text{tr} \left\{ \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial A_i}{\partial \theta_j} (\int r^i r^{it} dm) \frac{\partial A_i}{\partial \theta_k} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \right\} \dots\dots(21)$$

La expresión $(\int r^i r^{it} dm)$ es conocida como pseudo-matriz de inercia J_i , obtenida a partir de las definiciones de momentos de inercia, productos de inercia y primeros momentos de un cuerpo rígido. A partir de esta matriz, se puede expresar la energía cinética como :

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{tr} \left\{ \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial A_i}{\partial \theta_j} J_i \frac{\partial A_i}{\partial \theta_k} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \right\} \dots\dots(22)$$

De la misma manera se puede obtener la expresión de la energía potencial total del manipulador, obteniéndose lo siguiente :

$$P = - \sum_{i=1}^n m_i g^t A_i \cdot {}^i \bar{r}_i \dots\dots(23)$$

en donde :

$$g^t = (g_x, g_y, g_z, 0)$$

m = masa total del manipulador

A partir de las ecuaciones 22 y 23 se puede obtener el lagrangiano $L = K - P$, de la siguiente manera :

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{tr} \left\{ \frac{\partial A_i}{\partial \theta_j} J_i \frac{\partial A_i}{\partial \theta_k} \right\} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + \sum_{i=1}^n m_i g^t A_i \bar{r}_i \dots\dots (24)$$

Para obtener las ecuaciones dinámicas correspondientes, se deben aplicar las ecuaciones de Lagrange que expresan las fuerzas o pares de fuerzas necesarias para accionar las articulaciones que integran al manipulador. Estas ecuaciones tendrán una forma similar a las obtenidas anteriormente (19 y 20) y cuyos términos ya han sido descritos.

La formulación de Lagrange obtenida de esta manera requiere del orden de n -multiplicaciones y otras tantas sumas, para la obtención de los pares de articulación en cada punto de la trayectoria de trabajo. Los tiempos de calculo que se requieren impiden el control en tiempo real de manipuladores de más de 3 grados de libertad.

En 1980 HOLLERBACH {1} propuso una formulación recursiva que reduce el número de operaciones requeridas a $830n - 592$ multiplicaciones y $675n - 464$ sumas para el caso más general, es decir, para cuando $n = 6$.

El análisis recursivo de Hollerbach consiste básicamente de 3 partes a desarrollar :

- Recursividad hacia adelante
- Recursividad hacia atrás
- Utilización de matrices de 3×3

La formulación estandar de las ecuaciones dinámicas del manipulador basadas en Uicker {2} , utilizaba matrices de 4×4 proporcionando un modelo generalizado para un manipulador integrado por eslabones y que llegan a formar una cadena cinemática abierta (Kahn {3}).

Considerando la notación de las fuerzas generalizadas para un manipulador con n eslabones obtenidas a partir de las ecuaciones de Lagrange, cuya evaluación en tiempo real es demasiado lenta, ha sido necesario elaborar ciertos procedimientos para obtener una solución adecuada en un tiempo más corto.

Se procede a descomponer dicha expresión en términos más simples, cuya evaluación se va almacenando en la memoria de la computadora. El cálculo de los términos $A_i, \frac{\partial A_j}{\partial \theta_i}, \frac{\partial A_j}{\partial \theta_i}$ no presentan tanta importancia en el costo del tiempo de procesamiento, ya que dependen de la configuración particular que presenta el manipulador además de contribuir muy poco en la complejidad de los cálculos. Para un manipulador con $n = 6$, el número de multiplicaciones y sumas a realizar es de 66271 y 51548 respectivamente.

Recursividad Hacia Atrás .-

Waters {4} observó que las fuerzas generalizadas pueden expresarse de tal forma que presenten ciertas ventajas en la aplicación de relaciones de recursividad hacia atrás (en el sentido de la numeración de los eslabones).

A partir de la forma en que se obtuvo la expresión para las fuerzas generalizadas se pudo observar que dichas expresiones se pueden escribir en una forma más compacta como la siguiente:

$$F_i = \sum_{j=1}^n \left\{ \text{tr} \left(\frac{\partial T_j}{\partial \theta_i} J_j \ddot{T}_j^t \right) - m_j g^t \frac{\partial T_j}{\partial \theta_i} \bar{r}_j^i \right\} \dots \dots (25)$$

donde el término \ddot{T}_j puede descomponerse de tal manera que permita obtener la forma general de los términos que componen las fuerzas centrífugas y de Coriolis :

$$\ddot{T}_j = \sum_{k=1}^j \frac{\partial T_j}{\partial \theta_k} \ddot{\theta}_k + \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \frac{\partial^2 T_j}{\partial \theta_k \partial \theta_m} \dot{\theta}_k \dot{\theta}_m \dots \dots (26)$$

Sin embargo, es más conveniente conservar la forma compacta de este término (\ddot{T}_j) ya que es mucho más fácil obtener las relaciones para las velocidades \dot{T}_j y las aceleraciones T_j por simple diferenciación :

$$\begin{aligned} T_j &= T_{j-1} A_j \\ \dot{T}_j &= \dot{T}_{j-1} A_j + T_{j-1} \dot{A}_j \\ &= \dot{T}_{j-1} A_j + T_{j-1} \frac{\partial A_j}{\partial \theta_j} \dot{\theta}_j \\ \ddot{T}_j &= \ddot{T}_{j-1} A_j + \dot{T}_{j-1} \dot{A}_j + \dot{T}_{j-1} \frac{\partial A_j}{\partial \theta_j} \dot{\theta}_j \\ &\quad + T_{j-1} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial A_j}{\partial \theta_j} \right) \dot{\theta}_j + T_{j-1} \frac{\partial A_j}{\partial \theta_j} \ddot{\theta}_j \\ \ddot{T}_j &= \ddot{T}_{j-1} A_j + 2\dot{T}_{j-1} \frac{\partial A_j}{\partial \theta_j} \dot{\theta}_j + T_{j-1} \frac{\partial^2 A_j}{\partial \theta_j^2} \dot{\theta}_j^2 + T_{j-1} \frac{\partial A_j}{\partial \theta_j} \ddot{\theta}_j \end{aligned} \dots \dots (27)$$

Con estas expresiones el número de multiplicaciones y adiciones se reduce a 7051 y 5652 respectivamente para el caso de $n = 6$, reduciendo su dependencia a n . Esta reducción se obtiene gracias a la eficiencia en los cálculos de los términos de las fuerzas de Coriolis y centrífugas, ya que solo se requiere el cálculo de los términos $\partial T_i / \partial \theta_i^2$, en lugar de las matrices $\partial T_j / \partial \theta_k \partial \theta_m$.

Recursividad Hacia Adelante .-

Durante la obtención de las expresiones de las fuerzas generalizadas se observa que $\partial T_i / \partial \theta_i = \partial T_i / \partial \theta_i \cdot i T_j$. De esta manera, las fuerzas generalizadas se pueden expresar como :

$$F_i = \text{tr} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} \sum_{j=1}^n i T_j J_j \ddot{T}_j^t \right) - g^t \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} \sum_{j=1}^n m_j i T_j i \bar{r}_j \quad \dots\dots (28)$$

Esta formulación proporciona una recursividad hacia adelante de la siguiente manera :

$$D_i = \sum_{j=1}^n T_j J_j \ddot{T}_j^t + A_{j+1} D_{i+1}$$

$$C_i = \sum_{j=1}^n m_j i T_j i \bar{r}_j = m_i i \bar{r}_i + A_{i+1} C_{i+1}$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación 28 se obtiene la siguiente expresión :

$$F_i = \text{tr} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} D_i \right) - g^t \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} C_i \quad \dots\dots (29)$$

El cálculo de estas expresiones consiste en evaluar todos los términos T_i desde que $i = 1$ hasta n , utilizando las relaciones de recurrencia indicadas en la ecuación 25. Posteriormente se calculan los términos D_i y C_i en sentido contrario, es decir, desde que $i = n$ hasta $i = 1$. De esta manera, el número de multiplicaciones y adiciones se reduce a $830n - 592$ y $675n - 464$ respectivamente, reduciendo notablemente el tiempo de cálculo de las diferentes expresiones.

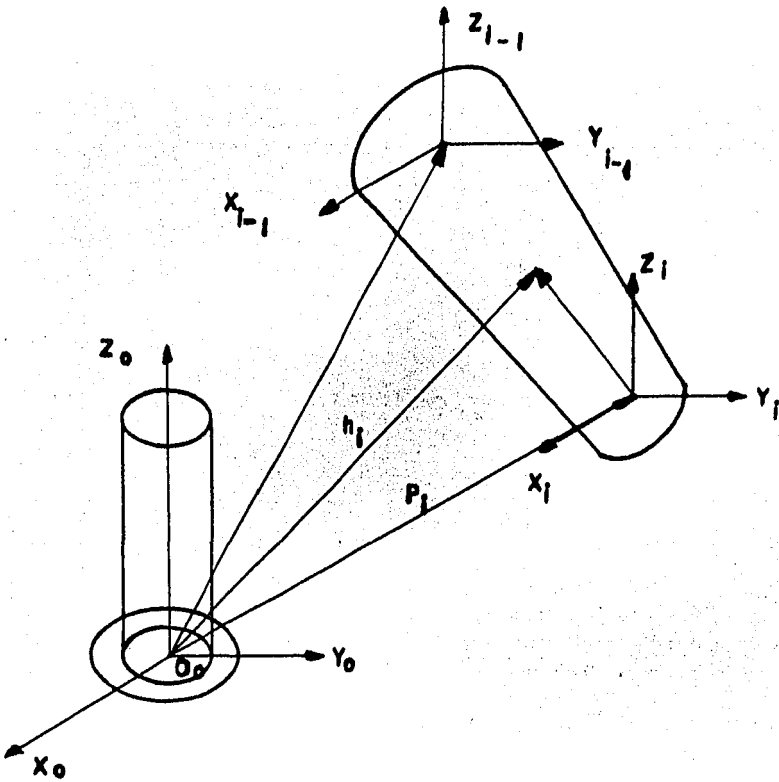
Utilización de Matrices de 3 x 3 .-

Los métodos desarrollados anteriormente presentan la ventaja de disminuir el tamaño de los coeficientes que integran las diferentes expresiones obtenidas. Sin embargo, la mayor reducción en el número de cálculos necesarios para resolver las ecuaciones dinámicas del manipulador, se obtiene formulando dichas ecuaciones a partir de matrices de rotación-traslación de 3 x 3. La reducción que se llega a obtener con la utilización de este método es de aproximadamente del 50% (de 64 multiplicaciones que requiere una matriz de 4 x 4 se realizan solamente 27).

Considerando la siguiente figura se tiene que : el vector h_i une el origen del sistema de coordenadas de base con un punto cualquiera fijo en la articulación i . Definiendo el vector h_i^* para representar el mismo punto en el sistema de coordenadas 1, pudiéndose establecer la siguiente relación :

$$h_i = P_i + T_i \cdot h_i^*$$

$$\dot{h}_i = \dot{P}_i + \dot{T}_i \cdot h_i^* \quad \dots\dots (28)$$



donde T_j representa la matriz de rotación que refiere cualquier vector expresado en el sistema coordenado i a la base del manipulador.

La energía cinética total del eslabón i esta dada por :

$$K = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \text{tr} (m_j \dot{P}_j \dot{P}_j^t + 2 \dot{T}_j^j h_j \dot{P}_j^t + \dot{T}_j^j J_j \dot{T}_j^t) \quad \dots\dots (29)$$

La energía potencial se podrá obtener considerando el trabajo necesario para desplazar el centro de masa de cada eslabón con respecto al plano horizontal de referencia :

$$P = \bar{P} - \sum_{j=1}^n m_j g^t T_j^j r_j^* \quad \dots\dots (30)$$

donde $g^t = (g_x, g_y, g_z)$ es la aceleración de la gravedad y \bar{P} es una constante que depende del plano de referencia seleccionado, r_j^* es el vector que define el centro de masa del eslabón j en su propio sistema de referencia.

Obteniendo la expresión de las fuerzas generalizadas a partir de la expresión del lagrangiano, se obtiene la siguiente ecuación :

$$F_i = \text{tr} \left\{ \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} \sum_{j=1}^n ({}^i T_j^j J_j \dot{T}_j^t m_j {}^i P_j \dot{P}_j^t + {}^i P_j^j h_j \dot{T}_j^t + {}^i T_j^j h_j \dot{P}_j^t + {}^i T_j^j J_j \ddot{T}_j^t) \right\} - g^t \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} \sum_{j=1}^n m_j {}^i T_j^j r_j^* \quad \dots (31)$$

Utilizando las relaciones recursivas (ecuación 27) se puede obtener los términos de las sumatorias como :

$$D_i = A_{i+1} D_{i+1} + {}^i P_{1+1} E_{i+1} + {}^i h_i \ddot{P}_i^t + J_i \ddot{T}_i^t$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (m_j \ddot{P}_j^t + J_{h_j} \ddot{T}_j^t)$$

$$C_i = m_i {}^i r_i + A_{i+1} C_{i+1} \quad \dots\dots (32)$$

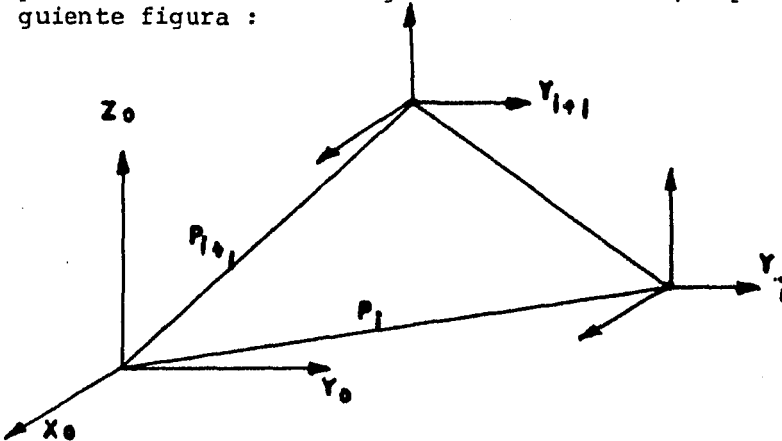
Para obtener finalmente las expresiones de las fuerzas generalizadas como :

$$F_i = \text{tr} \left\{ \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} D_i \right\} - g^t \frac{\partial T_i}{\partial \theta_i} C_i \quad \dots\dots (33)$$

Con la obtención de esta formulación se reduce en aproximadamente un 50% el número de multiplicaciones y adiciones por realizar, proporcionando una metodología sistemática que agiliza la obtención del modelo dinámico del manipulador.

FORMULACION NEWTON-EULER .-

Teniendo en consideración la notación Denavit-Hartenberg, que establece un sistema de coordenadas para cada articulación, se pueden establecer las siguientes relaciones, a partir de la siguiente figura :



en donde :

$$V_{i+1} = V_i + {}^i P_{i+1} + W_i \times {}^i P_{i+1}$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_{i+1} = \hat{V}_i + {}^i \ddot{P}_{i+1} + \hat{W}_i \times {}^i P_{i+1} + 2W_i \times {}^i \dot{P}_{i+1} \\ + W_i \times (W_i \times {}^i P_{i+1}) \end{aligned}$$

$$W_{i+1} = W_i + {}^i W_{i+1}$$

$$\dot{W}_{i+1} = \dot{W}_i + W_i \times \dot{W}_{i+1} + \frac{d * (\dot{W}_{i+1})}{dt} \quad \dots (34)$$

donde \dot{W}_{i+1} es la velocidad angular del sistema de coordenadas $i+1$ con respecto al sistema i . Considerando que los movimientos de la articulación $i+1$ se realizan sobre el eje Z_i , se puede escribir lo siguiente :

$$\begin{aligned} \dot{W}_{i+1} &= z_i \dot{\theta}_{i+1} && \text{si la articulación } i+1 \text{ es R} \\ &0 && \text{si la articulación } i+1 \text{ es P} \\ \frac{d * (\dot{W}_{i+1})}{dt} &= z_i \ddot{\theta}_{i+1} && \text{si la articulación } i+1 \text{ es R} \\ &0 && \text{si la articulación } i+1 \text{ es P} \end{aligned}$$

de esta manera, las ecuaciones 34 pueden expresarse como :

$$\begin{aligned} W_{i+1} &= W_i + z_i \dot{\theta}_{i+1} && \text{si la articulación es R} \\ \dot{W}_{i+1} &= \dot{W}_i + z_i \dot{\theta}_{i+1} \\ W_{i+1} &= W_i && \text{si la articulación } i+1 \text{ es P} \\ \dot{W}_{i+1} &= \dot{W}_i \end{aligned}$$

Aplicando el principio de D'Alembert a cada uno de los eslabones que integran la estructura del manipulador y despreciando los efectos de la fricción y de la gravedad, se pueden establecer las siguientes relaciones :

$$\begin{aligned} F_i &= \frac{d}{dt} (m_i \dot{r}_i) = m_i \ddot{r}_i \\ M_i &= \frac{d}{dt} (J_i \dot{W}_i) = J_i \ddot{W}_i + W_i \times (J_i \dot{W}_i) \end{aligned} \quad \dots (35)$$

donde :

- F_i es la fuerza externa total ejercida sobre el eslabón i
- M_i es el momento externo total ejercido sobre el eslabón i
- J_i es la matriz de inercia del eslabón i con respecto a su centro de masa, expresado en coordenadas de base

Los términos F_i y M_i son generados por las acciones de la gravedad de las articulaciones $i-1$ e $i+1$ sobre la articulación i . Si se define lo siguiente :

- $f_i \Delta$ como la fuerza ejercida por la articulación $i-1$ sobre la articulación i
- $u_i \Delta$ como el momento ejercido por la articulación $i-1$ sobre la articulación i

se pueden establecer las siguientes relaciones recursivas :

$$F_i = f_i - f_{i+1}$$

$$\begin{aligned} M_i &= u_i - u_{i+1} + (P_{i-1} - r_i) \times f_i - (P_i - r_i) \times f_{i+1} \\ &= u_i - u_{i+1} + (P_{i-1} - r_i) \times F_i - {}^{i-1}P_i \times f_{i+1} \quad \dots (36) \end{aligned}$$

a partir de la figura 3 se puede establecer la siguiente igualdad :

$$(r_i - P_{i-1}) = {}^{i-1}P_i + {}^i r_i \quad \dots (37)$$

de esta manera las ecuaciones 36 se transformarían a :

$$f_i = f_{i+1} + F_i$$

$$u_i = u_{i+1} + {}^{i+1}P_i \times f_{i+1} + ({}^{i-1}P_i + {}^i r_i) \times F_i + M_i \quad \dots (38)$$

Para un manipulador con n grados de libertad los términos anteriores representan las fuerzas y el momento resultante ejercido por su OT sobre un objeto externo.

A partir de la notación utilizada en la figura 3 si la articulación i es del tipo R, el par t_i aplicado es la suma de las proyecciones de u_i sobre el eje de rotación Z_{i-1} y del momento generado por fricciones : si la articulación es P, la fuerza de excitación t_i es la suma de las proyecciones de f_i sobre el eje de traslación Z_{i-1} y de la fuerza de fricción en el sistema coordenado $(O_{i-1}, X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1})$, es decir :

$$t_i = \begin{cases} u_i^t Z_{i-1} + b_i \dot{\theta}_i & \text{si la articulación } i \text{ es R} \\ f_i^t Z_{i-1} + b_i \dot{\theta}_i & \text{si la articulación } i \text{ es P} \end{cases}$$

donde b_i es el coeficiente de fricción apropiado.

Como se mencionó anteriormente, la matriz de inercias J_i es función de la configuración del manipulador, lo que complica enormemente los cálculos. Una manera más eficiente de calcular las fuerzas generalizadas consiste en referir la dinámica de cada articulación a su propio sistema de coordenadas.

De esta manera, se pueden obtener las expresiones para las fuerzas generalizadas de la siguiente forma :

$$W_i F_i = m_i W_i \ddot{r}_i \quad \dots (39)$$

$$W_i M_i = (W_i J_i W_o) (W_i \dot{w}_i) + (W_i w_i) \times \{(W_i J_i W_o) (W_i w_i)\} \dots (40)$$

donde $W_i J_i W_o$ es la matriz de inercia de la articulación i con respecto a su propio sistema de coordenadas :

En base a lo anterior, las fuerzas generalizadas quedarían como :

$$t_i = \begin{cases} (W_i u_i)^t ({}^{i+1}A_i z_o) + b_i \dot{\theta}_i & \text{si la articulación es R} \\ (W_i f_i)^t ({}^{i+1}A_i z_o) + b_i \dot{\theta}_i & \text{si la articulación es P} \end{cases}$$

A partir de las diferentes formulaciones que se han obtenido para el desarrollo de las ecuaciones dinámicas del manipulador, el problema del control en tiempo real parece haber quedado resuelto. Cada una de estas formulaciones presentan la ventaja de disminuir el número de operaciones que se deben realizar para obtener una solución adecuada. A continuación se presenta una tabla comparativa de las distintas formulaciones que se han expuesto en esta sección, para poder observar la variación en el número de operaciones que requiere cada una de ellas :

| FORMULACIONES DINAMICAS | | |
|-------------------------|--|------------------------------|
| Metodo | Multiplicaciones | Sumas |
| Uicker / Kahn | $16n + \frac{430}{12}n + \frac{171}{4}n$ | $25n + 22n + \frac{129}{2}n$ |
| | $+ \frac{53}{3}n - 128$ | $+ \frac{42}{3}n - 96$ |
| Waters | $53n + 310n - 512$ | $82n + 51.4n - 384$ |
| Hollerbach (4x4) | $830n - 592$ | $675n - 464$ |
| Hollerbach (3x3) | $412n - 277$ | $320n - 201$ |
| Newton-Euler | $150n - 48$ | $131n - 48$ |

2.4.- ESQUEMAS DE CONTROL

Es probable que el número de robots industriales aumente con el desarrollo de máquinas muy versátiles cuyo funcionamiento estará determinado por las teorías modernas desarrolladas por el AUTOMATISMO y la INFORMATICA : control adaptable, aprendizaje, reconocimiento de formas, generación de planes de acción, etc.

La rentabilidad de los manipuladores ha estado siempre ligada a la rapidez con la cual ejecutan una tarea dada dentro de un rango de precisión requerido. La obtención de movimientos rápidos y precisos, dependerá de los sistemas de control que regulen los desplazamientos de los mecanismos a través de las trayectorias de trabajo registradas previamente en los dispositivos de control de los manipuladores.

El problema del control de posición de un manipulador involucra el problema práctico de calcular los pares necesarios que se deberán aplicar a las diferentes articulaciones para un conjunto específico de valores de posición, velocidad, aceleración, que permitan desplazar al OT a través de la trayectoria de trabajo deseada.

Ya que el comportamiento mecánico de un manipulador de n grados de libertad solo puede ser descrito por un sistema de n ecuaciones diferenciales de segundo orden fuertemente acopladas y no-lineales, es muy difícil establecer un adecuado esquema de control que permita realizar el control dinámico en tiempo real.

El propósito de establecer un adecuado esquema de control es, dado el modelo dinámico del manipulador, mantener un movimiento previamente descrito a lo largo de la trayectoria de trabajo, aplicando compensaciones correctivas a los pares aplicados a los diferentes accionadores, con el fin de ajustar cualquier desviación en la trayectoria y evitar restricciones en cuanto al campo de aplicación en tareas que requieren alta precisión.

Con el objeto de adoptar algún esquema de control para una aplicación particular, se han realizado ciertas simplificaciones al modelo dinámico, dependiendo de las características de funcionamiento que requiere el manipulador para la ejecución de una tarea dada (como precisión, altas velocidades, etc.).

De esta manera, es posible desprestigiar algunos términos, linealizar el modelo alrededor de un punto de funcionamiento, considerar a sus matrices como constantes (sistemas invariantes), etc. El modelo resultante proporcionará un esquema de control adecuado para una aplicación específica.

Es así como se han desarrollado una serie de modelos que permiten lograr el control del manipulador de una manera efectiva {1, 2, 3, 4, 5} . Estos modelos se pueden clasificar en las categorías de control cinemático, dinámico, no-lineal, óptimo, adaptativo y predictivo, cuyas soluciones han sido aplicadas tan

to en el aspecto práctico como en el de simulación.

Entre los métodos utilizados destacan el RMRC (resolved motion rate control) {4} , el CMAC (cerebellar model articulation controller) {6} , el NMTC (near minimum time control) {7} , las técnicas denominadas de "Problema Inverso" o "Par Calculado" {2 , 3} , y las estrategias de control adaptativo {8, 9, 5} .

El RMRC es un método utilizado para determinar los valores de los ángulos requeridos en cada articulación para proporcionar al manipulador, el desplazamiento adecuado para alcanzar los puntos de consigna, los cuales se encuentran expresados en el sistema de coordenadas de trabajo del manipulador. Para lograr este objetivo se requiere del inverso del jacobiano $J(\theta)$, siendo una de las desventajas que presenta este método, ya que se requiere de un gran número de cálculos para lograr esto.

El CMAC es un método que esta basado en una teoría neurofisiológica y que utiliza tablas de control, las cuales se encuentran almacenadas en la memoria de la computadora, siendo necesarias para calcular las funciones de control. Entre las desventajas que representa es el tamaño de la memoria que se requiere, además de la exactitud necesaria para la realización de los cálculos.

El método NMTC esta basado en la linealización de las ecuaciones dinámicas a lo largo de la trayectoria nominal de movimiento, ob^o teniendo de una manera analítica retroalimentaciones lineales y/o leyes para un control sub-óptimo. Este método es demasiado complejo para manipuladores con más de 4 grados de libertad, a demás de desprestigiar los efectos de las cargas externas desconocidas.

CONTROL CINEMATICO.-

Una vez determinadas las trayectorias de trabajo que deba ejecutar el manipulador, el control cinemático pretende seguir las a través de sistemas de realimentación en posición y velocidad, tal que :

$$u_i = K_{pi} e_i + K_{vi} \dot{e}_i \quad \dots\dots (1)$$

donde :

u_i = fuerza generalizada aplicada al motor correspondiente a la i -ésima articulación

K_{pi} = acción proporcional

K_{vi} = acción derivada

e_i = $q_{ci} - q_i$ que representa el error de posición de la i -ésima articulación

q_c = representa la consigna

Es importante considerar que este método de control (proporcional-derivado), se aplica a cada articulación del manipulador de una manera independiente, sin tomar en cuenta los efectos de in-

teracción ni no linealidades.

Por otra parte, presenta la desventaja de la ineficiencia en la compensación de fuerzas de perturbación, como las generadas por la acción gravitatoria, con lo que se obtienen errores de esta do estable apreciables. Estos errores se pueden eliminar incluyendo una acción integral en el corrector, de tal manera que no introduzca inestabilidad en el sistema, determinando las fuerzas generalizadas debidas a la gravedad para cada configuración y evitar al máximo sus efectos sobre el sistema ; otra manera de lograrlo es mediante un balanceo entre las distintas masas del manipulador aunque se tienda a aumentar la inercia total.

Otro problema que presenta la aplicación de este método, es la determinación de los coeficientes K_{pi} y K_{vi} ya que el sistema es no-lineal e invariante. El fijar los valores de dichos parámetros para una configuración determinada puede ocasionar inestabilidades en el sistema.

Una manera de solucionar este problema, seria precalcular un conjunto de valores de K_{pi} y K_{vi} en función de la configuración y, tabulándolos, obtener los valores adecuados para cada punto de operación, presentando la desventaja del tiempo requerido para el aprendizaje y para el análisis de prueba y error.

CONTROL DINAMICO. -

El control dinámico del manipulador consiste en compensar los efectos de las fuerzas de inercia, centrífugas y de Coriolis, efectos que no pueden ser despreciables cuando el manipulador trabaja a altas velocidades.

El método para el control dinámico consiste de un sistema de control "mixto" que utiliza una cadena de anticipación y un ciclo con una red de corrección de coeficientes variables, reduciendo de esta manera el número de cálculos "en línea" a efectuar.

Por otra parte, es posible desacoplar prácticamente los movimientos de los diversos grados de libertad y establecer las ecuaciones correspondientes a los errores que se puedan cometer.

El método del control dinámico propuesto por Khalil, Liegeois y Fournier (10) , utiliza las ecuaciones dinámicas de Lagrange, que se pueden expresar como :

$$J(q) \ddot{q} + B(q) (\dot{q} \dot{q}) + C(q) \dot{q}^2 - Q(q) = r \quad \dots (2)$$

donde : q vector cuyas componentes representan las coordenadas generalizadas del mecanismo

$J(q)$ representa la matriz de la energía cinética

$B(q)$ matriz de coeficientes de las fuerzas de Coriolis

$c(q)$ matriz de coeficientes de las fuerzas centrífugas

$Q(q)$ vector de fuerzas debidas al campo gravitatorio

r vector de las fuerzas generalizadas producidas por los accionadores sobre las diferentes articulaciones

si se aplica a la ecuación 2 la siguiente igualdad :

$$r = r_1 + r_2 \quad \dots\dots (3)$$

donde :

$$r_1 = -Q(q) + B(\dot{q}) (\dot{q} \dot{q}) + C(q) (\dot{q}^2) \quad \dots\dots (4)$$

$$r_2 = J(q) \times \{-(K_p)q - K_v \dot{q} + A_w(t)\} \quad \dots\dots (5)$$

Ya que la matriz $J(q)$ siempre es regular y positiva, la ecuación 2 se puede expresar como :

$$\ddot{q} + K_v \dot{q} + K_p q = A_w(t) \quad \dots\dots (6)$$

La expresión anterior representa un sistema de n ecuaciones lineales de segundo orden. La matriz K_p regula los modos del sistema no amortiguado y la matriz K_v determina el amortiguamiento de esos modos.

La matriz A representa las aplicaciones de consigna $w(t)$. Si la matriz anterior es diagonal, los modos pueden ser desacoplados y resulta fácil colocar los polos del sistema para obtener la respuesta temporal $q(t)$ deseada.

Una de las desventajas que presenta esta consideración es la complejidad que presentan los cálculos necesarios para obtener los valores de los términos de la ecuación 4, para el caso de un manipulador con n grados de libertad.

Una manera de resolver este problema es a través de los modelos de predicción que permiten calcular todas o parte de las matrices del modelo descrito anteriormente para un gran número de configuraciones a lo largo de la trayectoria y almacenarlos en matrices contenidas en la memoria de una computadora, constituyendo lo que se denomina "espacio de configuraciones" [11]. Estos modelos permiten obtener tiempos de cálculo adecuados para la realización de un control en tiempo real, aunque requiere de grandes cantidades de memoria, por lo que los cálculos se reducen a precalcular solamente la matriz A y las fuerzas de compensación r_1 para algunos puntos de la trayectoria nominal deseada.

Control Mixto.-

Sea $q_d = q_d(t)$ el vector de entradas de realimentación (trayectoria deseada) y $e = q_d - q$ el vector de error debido a la posición. Se desea calcular las fuerzas motrices r expresadas en la ecuación 3, pero de la siguiente forma :

$$r_1 = -Q_m(q_d) + \{B_m(q_d)\} \{\dot{q}_d \dot{q}_d\} + \{C_m(q_d)\} \{\dot{q}_d^2\} \quad \dots\dots (7)$$

$$r_2 = f(e, \dot{e}, q_d) \quad \dots\dots (8)$$

Las matrices que aparecen en la ecuación 7 tienen el mismo significado que en la ecuación 4 las cuales son deducidas a través

de un modelo matemático representativo del sistema {12, 13} .

La estructura mixta de los sistemas de realimentación, corresponden al control definido por las ecuaciones 2, 6, 7. Los términos compensatorios r_1 son producidos por una cadena de "anticipación", mientras que las acciones de precisión son proporcionadas por el corrector $f(e, \dot{e}, qd)$.

Considerando los errores de la estructura como las diferencias entre los parámetros del modelo y los del proceso, se tiene :

$$\begin{aligned} Q(q) &= Q_m(q) + WQ(q) \\ \{A(q)\} &= \{A_m(q)\} + WA(q) \\ \{B(q)\} &= B_m(q) + WB(q) \\ \{C(q)\} &= C_m(q) + WC(q) \end{aligned} \quad \dots\dots(9)$$

Errores que son generados por las siguientes razones :

- 1.- Errores de identificación de masas, inercias, etc.
- 2.- Errores debido a la imprecisión de los cálculos
- 3.- Errores generados voluntariamente por las simplificaciones en las expresiones de los coeficientes

Teniendo en consideración las señales de error, se pueden obtener las expresiones para las fuerzas motrices, de la siguiente manera :

$$r_2 = + \{A_m(qd)\} \{K_{pe} + K_v \dot{e}\} \quad \dots\dots(10)$$

De esta manera, las ecuaciones diferenciales que rigen la evolución de las variaciones de posición poseen la forma lineal :

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = h(t) \quad \dots\dots(11)$$

donde :

$$\begin{aligned} h(t) &= \{A_m(qd)^{-1}\} \{WA(\ddot{q}d)(qd) + WB(qd)(\dot{q}d \dot{q}d) + WC(qd)(\dot{q}d^2) \\ &\quad - WQ(qd)\} \quad \dots\dots(12) \end{aligned}$$

Las ecuaciones 11 y 12 permiten calcular las variaciones de posición en régimen estático además de poder observar la influencia de los diversos factores sobre el comportamiento del sistema realimentado :

- velocidades y aceleraciones de consignas de posición
- errores de estructura
- inercias del mecanismo

El desacoplamiento de los movimientos de las diversas articulaciones del manipulador, se puede realizar cuando las matrices K_p y K_v son matrices diagonales lo que permitiera asignar los polos del corrector de una manera directa a través de los elementos de las diagonales de las matrices, proporcionando un esque-

ma de control cuya validez dependiera de la precisión con la que se identifiquen las matrices del sistema.

A partir de estas consideraciones, se han desarrollado métodos de control que utilizan desacoplamientos en los cuales se considera que el manipulador trabaja a bajas velocidades y por lo tanto, se pueden despreciar los términos no lineales debidos a las fuerzas centrífugas y de Coriolis, además de las fuerzas de fricción viscosa, con lo que se reduciría el modelo dinámico a la siguiente expresión :

$$J(q) \ddot{q} = r - g(q) \quad \dots\dots(13)$$

Si se considera que la matriz $J(q)$ es diagonal, es decir, se desprecian las fuerzas de interacción inerciales, se obtendría lo siguiente :

$$J_i(q_i) \ddot{q}_i = r_i - g_i(q_i) \quad \text{para } i=1,n \quad \dots\dots(14)$$

A partir de la ecuación anterior, se puede llegar a establecer una estrategia de control mediante la tabulación de los valores de g_i para las distintas configuraciones de la trayectoria de trabajo, con lo que se llegaría a obtener una ecuación de la forma :

$$u_i = r_i - g_i(q_i)$$

tal que :

$$J_i(q_i) \ddot{q}_i = u_i \quad \text{para } i = 1,n \quad \dots\dots(15)$$

Realizando las transformaciones adecuadas de los valores de K_{vi} y K_{pi} al multiplicarlas por la matriz $J_i(q_i)$, se obtiene lo siguiente :

$$\frac{Q_i(s)}{Q_{cj}(s)} = \frac{K_{pi} + s K_{vi}}{J_i(q_i) s^2 + s K_{vi} + K_{pi}} \quad \dots\dots(16)$$

en donde los polos de la función de la transformada de Laplace se desplazan en función de la configuración del manipulador.

Como se mencionó anteriormente, una de las desventajas que presenta este método es que se requiere de una buena identificación de las matrices del modelo con el objeto de obtener un buen desacoplamiento.

TECNICAS DEL "PROBLEMA INVERSO" O "PAR CALCULADO" .-

El control de posición de un manipulador involucra el problema práctico de calcular los pares necesarios que se deberán aplicar a las diferentes articulaciones para un conjunto específico de posición, velocidad y aceleración. Ya que el manipulador es un sistema no-lineal cuyas articulaciones están fuertemente acopladas, es muy difícil establecer un adecuado esquema de control.

A continuación se describe lo que se denomina "Problema inverso"

cuyos resultados se pueden considerar aceptables para la resolución del problema del control.

Este método trata directamente con la posición y orientación del OT, diferenciándose de los otros en que las aceleraciones se encuentran especificadas y que todo el sistema de retroalimentación es realizado al nivel del OT.

El algoritmo de control es diseñado de tal manera que sea asintóticamente convergente. Mediante la utilización de una computadora PDP 11/45 es posible calcular las fuerzas/pares de fuerzas iniciales en cada período del sistema, utilizando la formulación de Newton-Euler para la obtención de las ecuaciones dinámicas. El programa está escrito en lenguaje ensamblador con estructura de punto flotante y requiere de un tiempo promedio de 11.5 ms para su ejecución, para el caso de un manipulador con 6 grados de libertad como el que se muestra en la figura 1.

Considerando las ecuaciones de movimiento correspondientes al manipulador de la figura 1 :

$$J(q)(\ddot{q}) + V(\dot{q}) + f(\dot{q}, q) + g(q) = r \quad \dots\dots(17)$$

Esta técnica desarrollada por Paul {2} y Raibert-Horn {11}, también fue llamada "Par Calculado" por Markiewicz{14} y Bejczy {1}. En esta técnica, los pares iniciales requeridos son calculados como una función de la aceleración, velocidad y posición en una articulación dada (\ddot{q}_d , \dot{q}_d , q_d) y sus contrapartes (q , \dot{q} , \ddot{q}). Los parámetros utilizados en este esquema son medidos y/o calculados a partir de experimentos físicos.

El par inicial deseado es calculado a través de la siguiente expresión :

$$r = J_c(q)(\ddot{q}_d + K_1\{\dot{q}_d - \dot{q}\} + K_2\{q_d - q\}) + V_c\dot{q} + f_c(\dot{q}, q) + g_c(q) \quad \dots\dots(18)$$

donde :

K_1, K_2 constantes escalares (ganancia)

$J_c(q) = J(q)$, $V_c = V$

$f_c(\dot{q}, q) = f(\dot{q}, q)$, $g_c(q) = g(q)$

Las igualdades anteriores se obtienen al considerar idealmente que en el esquema propuesto q converge hacia q_d . Si dichas igualdades se cumplen, la ecuación 18 se puede transformar a :

$$r = J(q)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + K_1\{\dot{q}_d - \dot{q}\} + K_2\{q_d - q\} + V\dot{q} + f(\dot{q}, q) + g(q) \quad \dots\dots(19)$$

Igualando las ecuaciones 17 y 19 se obtiene lo siguiente :

$$J(q)(\ddot{q}_d - \ddot{q} + K_1\{\dot{q}_d - \dot{q}\} + K_2\{q_d - q\}) = 0 \quad \dots\dots(20)$$

Considerando que la matriz de inercia es no-singular y que $E_d = q_d - q$, es el error de posición de la articulación, se puede obtener la expresión siguiente :

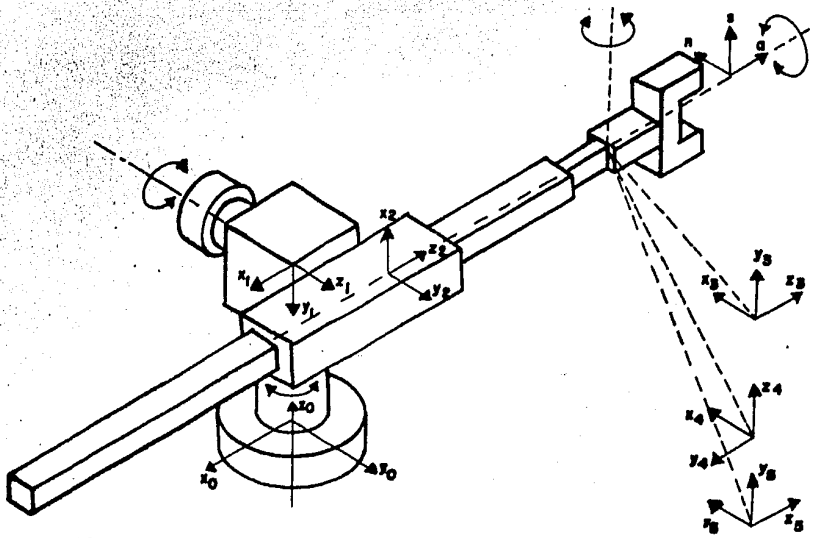


FIG. 1.- MANIPULADOR DE 6 ARTICULACIONES

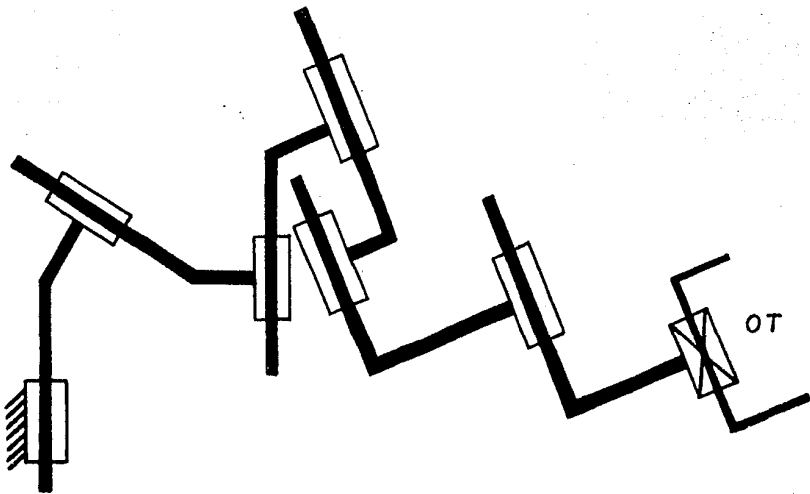


FIG. 2.- DIAGRAMA DE UN MANIPULADOR DE 6 GRADOS DE LIBERTAD

$$E_d + K_1 \dot{E}_d + K_2 E_d = 0 \quad \dots\dots(21)$$

Si los valores de K_1 y K_2 son seleccionados de tal manera que las raíces características de la ecuación 21 posean parte real negativa, entonces $E_d = q_d - q$ se aproximara a cero de una manera asintótica.

Considerando que esta técnica de control esta basada en considerar: la posición y orientación del OT, se puede definir el error de posición como la diferencia entre la posición deseada y la posición actual del OT. De esta manera, el control del manipulador consiste en reducir el valor de este error lo más cercano a cero.

Teniendo en cuenta la matriz que expresa la orientación y posición del OT, desarrollada en secciones anteriores :

$$H(t) = \begin{matrix} n(t) & s(t) & a(t) & P(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

El error de posición estara definido como :

$$E_c(t) = \begin{matrix} P_x d(t) - P_x(t) \\ P_d(t) - P(t) = P_y d(t) - P_y(t) \\ P_z d(t) - P_z(t) \end{matrix} \quad \dots\dots(22)$$

El error de orientación se puede definir de la misma manera, como la diferencia entre las coordenadas actuales del OT y las deseadas $\{n_d(t), s_d(t), a_d(t)\}$.

Una manera de lograr que el error se reduzca a cero, es que las coordenadas deseadas sean específicas para todo el intervalo de tiempo, es decir, que los puntos de inicio sean los mismos :

$$\{n_d(t_0), s_d(t_0), a_d(t_0)\} = \{n(t_0), s(t_0), a(t_0)\} \quad \dots(23)$$

Utilizando la notación cinemática desarrollada en la elaboración del modelo cinemático :

P_i = posición del eslabón i con respecto a las coordenadas de base

v_i = velocidad lineal del eslabón i

w_i = velocidad angular del eslabón i

Por sustituciones sucesivas v_{i+1} y w_{i+1} se pueden expresar como la suma de velocidades de todos los eslabones j para $j < i+1$ con respecto a las coordenadas de su articulación correspondiente.

Combinando v y w en un vector de 6 dimensiones se puede obtener:

$$V = \frac{v}{w} = M\dot{q} \quad \text{en donde :}$$

$$M_i = \begin{matrix} Z_{i-1} \times (P - P_{i-1}) \\ Z_{i-1} \end{matrix} \quad \text{si se trata de una articulación R}$$

$$M_i = \begin{matrix} Z_{i-1} \\ 0 \end{matrix} \quad \text{si se trata de una articulación P}$$

La expresión anterior es la base del método desarrollado por Whitney {4}, en donde se obtienen las velocidades de las articulaciones a partir de la resolución de las velocidades del OT respecto a sus coordenadas de base.

Derivando la expresión de la velocidad lineal con respecto al tiempo, se obtiene lo siguiente :

$$\dot{v} = M \ddot{q} + \dot{M} \dot{q} \quad \dots\dots (24)$$

en donde es posible obtener el valor de las aceleraciones \ddot{q} a partir de datos de v , \dot{M} , $\dot{M} \dot{q}$.

El control del manipulador en ciclo cerrado consiste en reducir el valor del error de posición y orientación a cero.

Una vez determinada la trayectoria de trabajo que debiera seguir el OT, es posible conocer exactamente los valores deseados de posición $P_d(t)$, de velocidad lineal $v_d(t)$ y de aceleración lineal del OT con respecto al sistema de coordenadas de base.

Considerando las ecuaciones necesarias para aplicar las fuerzas o pares de fuerzas iniciales y conociendo los valores de la velocidad $v_d(t)$ y la aceleración angular $w_d(t)$ deseadas para el OT con respecto al sistema de coordenadas de base, cuyos valores son conocidos a lo largo de la trayectoria de trabajo, se puede obtener la siguiente expresión :

$$\ddot{q} = -K_1 \dot{q} + M^{-1} \{ \dot{v}_d + K_1 v_d + K_2 e - \dot{M} \dot{q} \} \quad \dots\dots (25)$$

La ecuación anterior es utilizada para elaborar el algoritmo de control del manipulador, en donde K_1 y K_2 son parámetros asignados y v_d y w_d son previamente determinados.

Por otra parte, $q(t)$ y $\dot{q}(t)$ son medidos a través de tacómetros y potenciómetros/codificadores por medios ópticos.

Una vez determinados los parámetros de la ecuación 25, se puede calcular el valor correspondiente de $\ddot{q}(t)$, para finalmente poder determinar las fuerzas y pares de fuerzas que se deberán aplicar a cada articulación a través de la formulación de N-E.

Para facilitar la aplicación de este algoritmo se ha implementado un programa de computación en lenguaje ensamblador para la computadora PDP 11/45, con un tiempo promedio de 11.5 ms para un manipulador con 6 grados de libertad como el mostrado en la figura 1.

CONTROL OPTIMO .-

En el análisis de funcionamiento de un manipulador, se debe tener en cuenta dos problemas : el posicionamiento y la orientación. Dada una posición y orientación deseada, será necesario determinar la posición de las diferentes articulaciones del manipulador, lo que llega a representar un problema cinemático cuya solución se obtiene al resolver el MODELO CINEMATICO.

El otro problema corresponde a la dinámica y al control del manipulador, que consiste en determinar las fuerzas y pares de fuerzas que se deben aplicar a las articulaciones para mover al manipulador a la configuración deseada.

A bajas velocidades, el problema se reduce a controlar independientemente a las diferentes articulaciones. Sin embargo, se requiere de complejos sistemas de control cuando el manipulador trabaja a altas velocidades debido a las interacciones que se presentan en los diferentes cuerpos que integran al manipulador, por lo que se pretende establecer un modelo que permita lograr un control óptimo de tal sistema.

Considerando al sistema mostrado en la figura 2 el cual está compuesto de un conjunto de n cuerpos conectados a través de articulaciones R o P, formando una cadena cinemática abierta. El movimiento relativo entre los cuerpos rígidos se obtendrá a partir de las fuerzas que se aplicaran a las diferentes articulaciones de la cadena.

Introduciendo un conjunto de variables independientes como variables de estado, definidas de la siguiente manera :

$$H_i = q_i \quad , \quad H_{i+3} = \dot{q}_i \quad \text{para } i = 1, 2, 3 \quad \dots (26)$$

pudiendo escribir las ecuaciones de movimiento como :

$$\dot{H}_1 = H_4 \quad \dot{H}_2 = H_5 \quad \dot{H}_3 = H_6 \quad \dots (27)$$

En el tiempo inicial $t = t_0$ el sistema se encontrará en el estado $G(t_0) = G_0$, donde $G(t_0)$ es un vector cuyas componentes representan el estado del sistema en el tiempo t_0 .

De una manera general, el modelo matemático del sistema incluirá ciertas restricciones en los controles denominados T. Estas restricciones se encuentran expresadas en términos de un conjunto de restricciones tridimensionales llamadas U, de tal manera que se cumpla que :

$$T(t) \in U \quad \text{para toda } t$$

El problema del tiempo del control óptimo puede establecerse de la siguiente manera : dado un sistema dinámico continuo con estado inicial G_0 , restricción final G_f y las restricciones de control U ; encontrar los controles admisibles $T(t) \in U$, los cuales transfieren al sistema del estado G_0 a G_f en un tiempo mínimo, denotado por $T^*(t)$.

Definiendo la función Hamiltoniana como :

$$J = (G, K, T, t) = \sum_{i=1}^n K_i(t) f_i(G, T, t) + 1 \quad \dots\dots (28)$$

donde la función $f_i(G, T, t)$ expresa los valores del lado derecho de la ecuación 27; las variables K_i son denominadas como variables de la articulación adjunta, las cuales satisfacen la siguiente ecuación :

$$\dot{K}_i = \frac{\partial J}{\partial H_i} \quad \text{para } i = 1, n \quad \dots\dots (29)$$

derivando la ecuación 28, se obtiene lo siguiente :

$$\dot{H}_i = \frac{\partial J}{\partial K_i} \quad \text{para } i = 1, n \quad \dots\dots (30)$$

Si se expresa $T^*(t)$ como el control óptimo y $G^*(t)$ como la trayectoria óptima correspondiente, existiera un vector $K^*(t)$ que satisfaga la ecuación 29, para un instante t , tal que $t_0 = t = t_f$, es decir :

$$J(G^*, K^*, T^*, t) \leq J(G^*, K^*, T, t) \quad \dots\dots (31)$$

El control óptimo sera aquel que minimice el Hamiltoniano para cualquier instante que se encuentre dentro del intervalo especificado.

Por otra parte, debido a la dificultad que presenta el modelo anterior en cuanto al tiempo de cálculo requerido, se ha desarrollado una aproximación que consiste en elaborar sistemas de realimentación para los pares T_i . Esta técnica se denomina de control "sub-óptimo" que consiste en obtener una linealización del sistema a partir de considerar que se puede obtener de una manera analítica, la solución del control óptimo.

La técnica consiste en desacoplar los controles a partir de las ecuaciones linealizadas después de realizar ciertos cambios de variables. Las expresiones obtenidas son utilizadas para obtener los valores de los parámetros y las curvas de conmutación para cada control.

A partir de estas consideraciones, se puede obtener un modelo de ecuaciones de la siguiente forma :

$$\dot{x} = A x + B u \quad \dots\dots (32)$$

en donde x es un vector que define los estados del sistema, -

$u(t)$ es un vector cuyas componentes se encuentran en función lineal de los pares aplicados a cada articulación y A, B son matrices positivas que corresponden a los coeficientes de las ecuaciones diferenciales que describen al manipulador.

CONTROL ADAPTATIVO .-

En el desarrollo del modelo propuesto en el Control Optimo, se ha considerado que se conoce la representación del manipulador bajo la forma $\dot{x} = Ax + Bu$, además de los parámetros contenidos en las matrices A y B.

En realidad, si la estructura de dicha representación se establece para un estudio a priori para caracterizar al manipulador las matrices A y B deben determinarse experimentalmente, lo que representa un primer problema a resolver antes de aplicar la teoría del control óptimo.

Un segundo problema es que la representación de dicho sistema, es solamente una aproximación del comportamiento dinámico del manipulador con respecto a un punto de funcionamiento y que en la mayoría de los casos, las matrices A y B cambian con el punto en consideración. Por otra parte, será necesario encontrar una solución para el problema del efecto de entradas secundarias que se consideran despreciables en esa representación y que ocasionan variaciones en los valores de las matrices A y B.

Para el caso en donde el valor promedio de los parámetros es conocido con buena precisión, un modelo estocástico permitiera tener en cuenta esas perturbaciones.

En otras palabras, la utilización de modelos estocásticos permite eliminar la rigidez en el modelo $\dot{x} = Ax + Bu$, pero en cambio implica el conocimiento de la estadística de perturbaciones y del valor promedio de los parámetros dinámicos.

Se supone que los parámetros dinámicos son conocidos y constantes, por lo tanto, una vez medidas dichas magnitudes, se utiliza esta información para trabajar en "ciclo abierto". Las diferencias entre los valores medidos y los valores estacionarios deseados de las variables de estado, son eliminadas por un ciclo de contra-reacción cuyos parámetros son calculados a partir de un índice de funcionamiento y de los valores de los parámetros dinámicos.

Con el fin de mantener el funcionamiento cuando se presenten variaciones entre los valores de cálculo y los valores reales, se pueden realizar una serie de ajustes y cálculos previos como :

- Calcular una cadena de contra-reacción que haga insensible el funcionamiento del sistema de control en relación a las variaciones de los parámetros
- Medir los parámetros en estado estable con el fin de modificar los parámetros del ciclo de contra-reacción

La primera aproximación ha dado lugar a un gran número de trabajos que tienen por objetivo la elaboración de métodos de cálculo que permitan "desensibilizar" al sistema de control. Los resultados obtenidos son válidos solamente para variaciones reducidas cercanas a los valores nominales.

Otras investigaciones conducen a la realización de sistemas "adaptativos" [16], con el fin de que el sistema reaccione ante las variaciones de los parámetros con el fin de mantener los valores nominales.

El problema que presentan estas investigaciones es el de determinar las "leyes de adaptación" que permitan mantener el funcionamiento del sistema en presencia de variaciones en los parámetros dinámicos.

Es fácil determinar que las leyes de adaptación y el funcionamiento del sistema adaptativo dependen del tipo del índice de funcionamiento considerado.

Si el índice es del tipo "criterio cuadrático", se tendrá una adaptación con un cierto retardo A_t , presentándose un problema en la medida rápida del funcionamiento del sistema. La solución se puede obtener a partir de utilizar los sistemas con modelos.

Como se ha visto, el modelo de referencia es una realización explícita de un sistema caracterizado por el índice de funcionamiento y que la diferencia entre los estados del modelo y del proceso controlado, proporciona a cada instante una indicación del funcionamiento del sistema de control en relación al funcionamiento deseado.

Los modelos de control adaptativo pueden utilizarse para tener un buen desenvolvimiento del manipulador en un amplio rango de movimientos y capacidad de carga útil. Entre los métodos de control adaptativo, el modelo de referencia es el más utilizado y el más fácil de implementar.

En el método MRAC propuesto por Dubowsky y DesForges, se utiliza una ecuación diferencial de segundo orden con coeficientes invariantes como referencia del modelo para cada grado de libertad. El manipulador es controlado ajustando sistemas de realimentación con ganancia en posición y velocidad para seguir al modelo de referencia, en cuyo caso se utilizara el método más precipitado como algoritmo adaptativo. Siendo difícil diseñar una ley de control adaptativo estable. Por consecuencia, el análisis de estabilidad se vuelve crítico, presentando dificultad en la complejidad y no-linealidad de las ecuaciones dinámicas del manipulador.

Otra estrategia para lograr un control adaptativo esta basada en diseñar una ley de control de realimentación para las ecuaciones de perturbación que se presentan en la vecindad de una trayectoria de movimiento deseada.

El alto acoplamiento y la no-linealidad de las ecuaciones di-

námicas de un manipulador son extendidas en la vecindad de una trayectoria predeterminada de una articulación, con el objeto de obtener las ecuaciones de perturbación.

De esta manera, los pares requeridos en cada accionador consisten de un par nominal calculado por las ecuaciones de movimiento de N-E y de un par variacional calculado a partir de las ecuaciones de perturbación.

Ya que los parámetros de dichas ecuaciones son desconocidos y presentan pequeñas variaciones con el tiempo, será necesario utilizar un esquema recursivo de mínimos cuadrados para realizar la identificación de los parámetros.

Esta estrategia de control adaptativo reduce el problema del control del manipulador de pasar de un control no-lineal a un sistema de control lineal, trabajando en una trayectoria deseada. Una ventaja que representa esta estrategia es que tanto los pares nominales como los pares variacionales pueden ser calculados por separado y simultáneamente.

3.- APRENDIZAJE
=====

3.1.- ADQUISICION DE TRAYECTORIAS

Los robots industriales han surgido para formar un puente de unión entre las máquinas automáticas diseñadas para realizar una función específica y el trabajo desarrollado por el hombre. Un robot puede ser programado para realizar una variedad de tareas con un nivel de calidad constante y en un tiempo de realización muy corto, dentro de límites permitidos.

Lo que hace a un robot industrial algo más que un manipulador es sin duda alguna, la posibilidad de programar sus ciclos de trabajo. Un ciclo de trabajo es una sucesión de trayectorias ininterrumpidas, integradas por "ordenes" las cuales llegan a los accionadores del robot, los cuales las sincronizan una a una mediante información que recibe en forma de eventos.

Existen algunos robots que son controlados como las máquinas-herramientas, es decir, por medio de control numérico, a partir de datos provenientes de planos acotados, realizados en un lenguaje abstracto. Sin embargo, es mucho más fácil en una operación de pintura o soldadura, mostrar la secuencia de operaciones o trayectorias que debiera de seguir el manipulador, que describirselas a través de planos precisos. Es decir, se prefiere recurrir a la técnica del aprendizaje, en donde el operador guía por primera vez al robot mostrándole la trayectoria a ejecutar, logrando con esto su programación. El manipulador memoriza la trayectoria que debiera de seguir, siendo capaz de reproducirla por sí mismo.

El aprendizaje puede ser directo o indirecto. En el aprendizaje directo, el operador guía manualmente al robot una primera vez, describiéndole los movimientos que debiera de realizar. La operación consiste en guiar la cabeza del robot (es necesario proveer un sistema de asistencia muscular para que el adiestramiento sea natural, sin ser influenciado por los efectos inerciales) o proceder sobre una estructura ligera, geoméricamente similar al brazo del robot llamada "titere" o sintaxor. En el aprendizaje indirecto, es necesario utilizar un pupitre o caja de control generalmente portátil, integrada por botones a presión, que describen los diferentes ejes de movimiento : este método es mucho más tardado que el anterior, pero es el más adecuado para trabajos que requieren una mayor precisión.

Las trayectorias pueden ser registradas punto por punto o de una manera continua. La manera de registrarlas punto por punto consiste en posicionar al manipulador en cada uno de los puntos (posiciones) que integraran la trayectoria deseada, para la realización de una tarea específica. El orden en que se efectue el registro, correspondera al orden en que se efectuara la restitución ; cada registro puede estar asociado a un grupo de ordenes por emitir y de eventos por recibir.

Para crear una trayectoria continua que, en el momento de la ejecución acople a todas las posiciones que la componen, es neces

sario añadir varios puntos intermedios : en el momento de la ejecución, el operador se encarga de elaborar una trayectoria que pase por los puntos programados, además de obtener los tiempos de desplazamientos , siendo los más cortos posibles.

En algunas ocasiones, las trayectorias no son las más adecuadas ya que existe algún obstáculo que impide la ejecución de la tarea, siendo necesario deformar la trayectoria e intercalar "puntos de paso", cuya finalidad es justamente, crear una zona de paso.

En el registro de las trayectorias continuas, el operador des--plaza al manipulador, mientras que el programador registra pe--riódicamente cada una de las posiciones que integraran la tra--yectoria. Esto conduce a almacenar una gran cantidad de informa--ción, por lo que sera necesario recurrir a las técnicas de com--pactación de la información para no utilizar una gran cantidad de memoria.

La programación de una secuencia de puntos que forman una trayectoria se puede elaborar en pedazos y posteriormente acoplar los, eliminando los tiempos muertos que se hayan generado. En el momento de la ejecución, el manipulador conoce la posición de cada uno de sus ejes, gracias a los sistemas de realimenta--ción que existen en cada uno de sus sensores de posición, que generalmente son codificadores incrementales sujetos a la rota--ción de cada motor, los cuales deben ser inicializados después de cada interrupción eléctrica, ya que cuentan el número de im--pulsos eléctricos que se generan durante el transcurso de una rotación.

Trayectorias de Movimiento .-

Un cuerpo rígido se puede describir en términos de un sistema de coordenadas que mantenga una relación fija con dicho cuerpo. Diferentes puntos del objeto pueden ser descritos en términos de vectores que vayan del origen del sistema de coordenadas fi--jo a dichos puntos y cuya dirección se encuentra expresada, por ejemplo, en términos de cosenos directores.

Dada una representación gráfica de un objeto, así como un siste--ma de coordenadas, sera suficiente contar con una especificaci--ón de la posición y orientación del sistema de coordenadas, para reconstruir el objeto en cualquier posición y orientación.

Considerando el objeto descrito graficamente en la figura 1, cu--yo eje se encuentra ligado al eje Z, de diámetro D y longitud \bar{l} igual a L. Si se conoce un objeto relacionado a un sistema de coordenadas definido, como se muestra en la figura, entonces, la única información necesaria para definir el objeto en el espa--cio es la localización del sistema de coordenadas del objeto.

La información anterior es utilizada para la descripción de una tarea dada. La tarea consistira en tomar un objeto e insertarlo en dos agujeros que se localizan en una pieza de subensamble

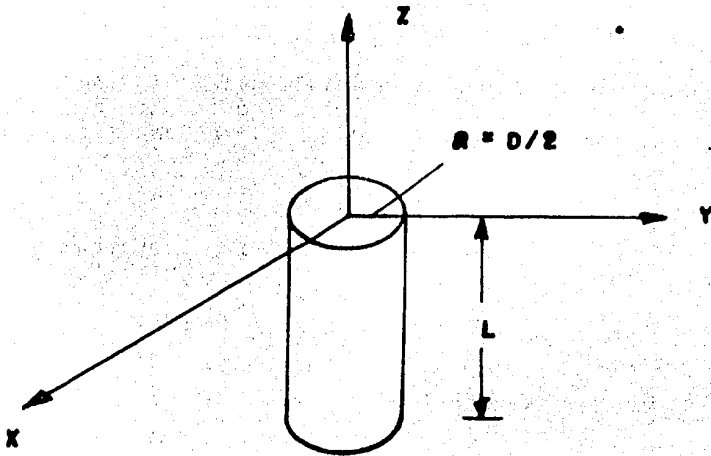


FIG 1 DESCRIPCION GRAFICA DE UN OBJETO

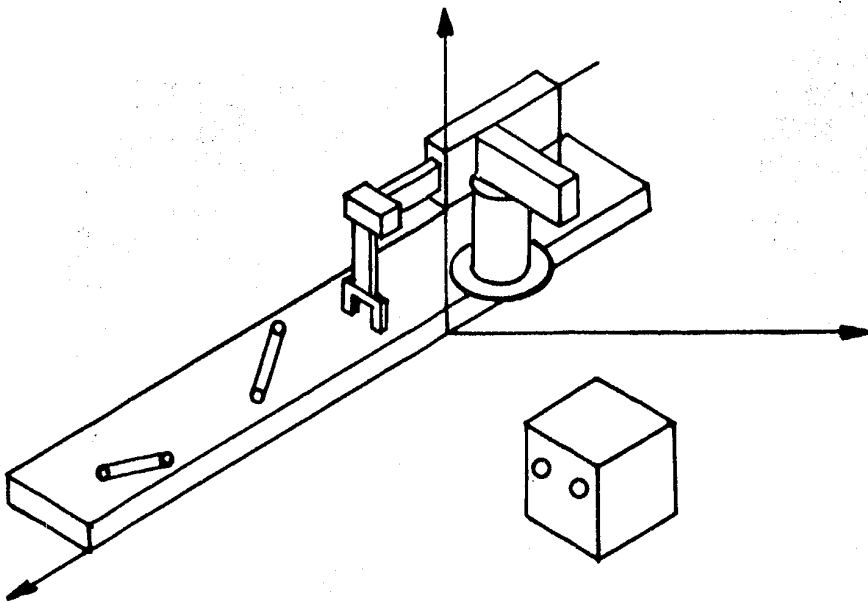


FIG 2 DESCRIPCION DE UNA TAREA. DADA

(figura 2).

Definiendo una serie de posiciones del OT del manipulador como P_n (figura 3), se puede describir la tarea como una secuencia de movimientos y acciones del manipulador refiriéndose a esas posiciones numeradas.

| | | |
|---------|----|--|
| MOVE | P1 | aproximarse al objeto |
| MOVE | P2 | colocar el OT sobre el objeto |
| GRASP | | sujetar el objeto |
| MOVE | P3 | levantarlo verticalmente |
| MOVE | P4 | aproximarse al agujero en un cierto ángulo |
| MOVE | P5 | hacer contacto con el agujero |
| MOVE | P6 | orientar el objeto |
| MOVE | P7 | insertar el objeto |
| RELEASE | | soltar el objeto |
| MOVE | P8 | alejar el OT |

Tal programa de actividades puede ser ejecutado por cualquier robot industrial de los que existen actualmente en el mercado, pudiendo llegar a presentar ciertas dificultades en la ejecución de una tarea específica.

Por otra parte, este programa no es capaz de modificar su realización en presencia de deformaciones, tales como el efecto de entrar en contacto el objeto con el agujero. Tampoco es capaz de guardar información relacionada con la posición actual de cualquier objeto.

Después de haber insertado el primer objeto, será necesario guardar la información relacionada con la posición del agujero con el objeto de simplificar la inserción en el segundo agujero. Si el manipulador se mueve será necesario reprogramar la secuencia de movimientos, ya que de otra manera, para la inserción del segundo objeto, sería necesario con repetir el programa entero, con ciertas variaciones de posición y orientación del segundo agujero.

Una manera más fácil de lograr esto, es a través de definir la estructura de la tarea, a partir de la estructura del manipulador.

Describiendo al manipulador como el producto de 3 transformaciones básicas, de tal manera que se pueda expresar la posición dentro de la descripción de la tarea ; se tendría :

$$\text{MOVE } P_n = \text{MOVE } Z \ T6 \ E \quad \dots\dots(1)$$

donde ;

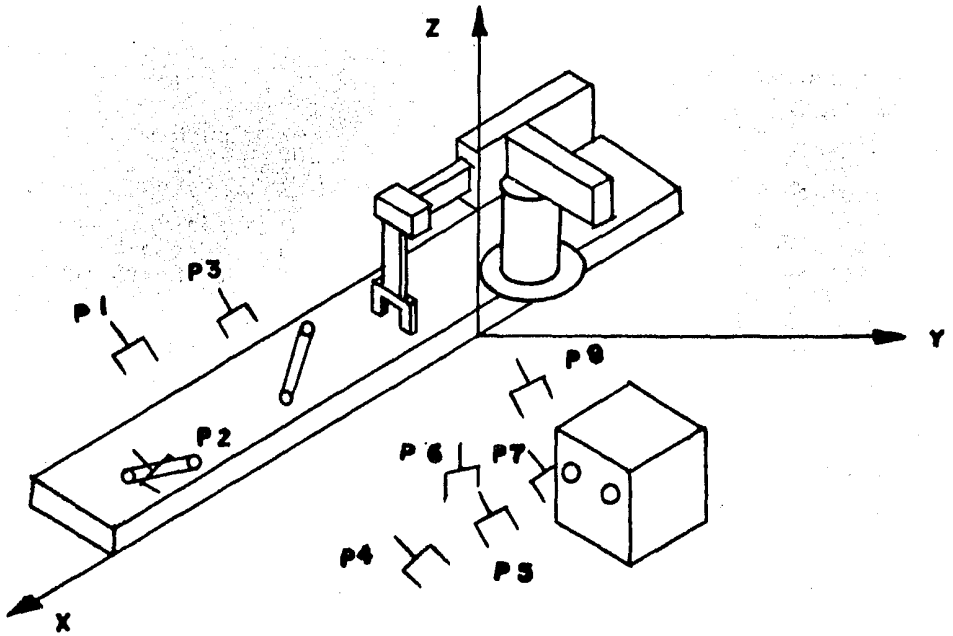


FIG.3 DEFINICION DE LAS POSICIONES DEL O T

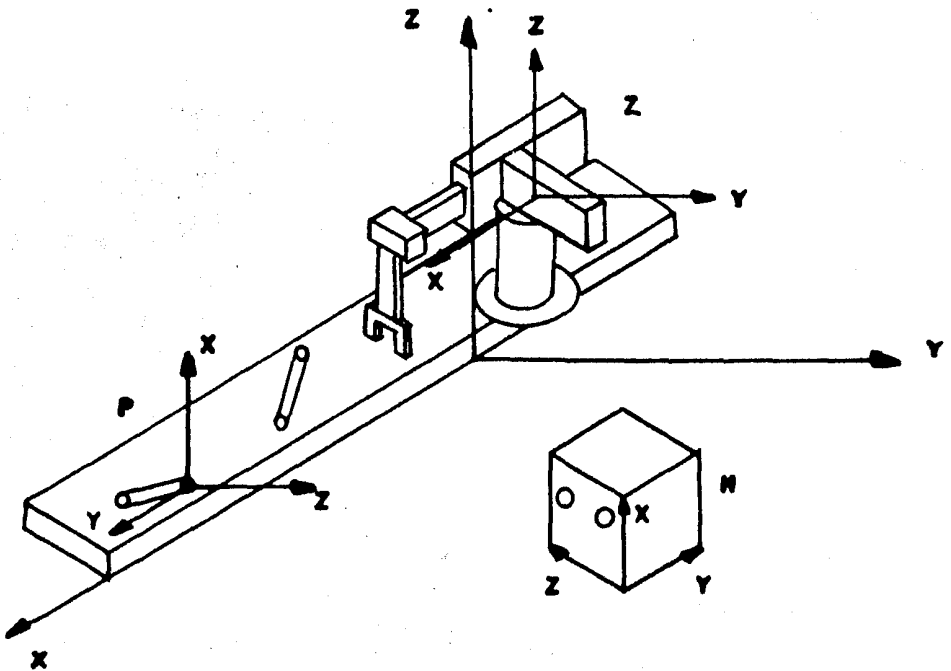


FIG. 4 MARCOS DE COORDENADAS P, H, Z

Z representa la posición del manipulador con respecto al sistema de coordenadas de base

T6 representa la posición del OT con respecto a su base

E representa la herramienta colocada en el OT

A partir de la descripción anterior, la calibración del manipulador con respecto a la estación de trabajo esta representada por Z. Si la tarea debe ser ejecutada con un cambio de herramienta, solamente E debera de variar.

Representado la estructura de la tarea en términos de las siguientes transformaciones, se tiene :

P posición del objeto en sistemas de coordenadas de base

H posición de la pieza de subensamble

^HHRi posición del i-ésimo agujero con respecto al sistema de coordenadas de H

GPG posición de la herramienta que sujetara al objeto con respecto a sí mismo

PPA aproximación del OT hacia el objeto

PPD movimiento del OT junto con el objeto

^{HR}PHA aproximación del objeto hacia el agujero

^{HR}PCH contacto entre el objeto y el agujero

^{HR}PAL el objeto al inicio de la inserción

HR PN el objeto insertado

De esta manera, la tarea puede ser representada como una serie de ecuaciones de transformación como :

P1 : Z T6 E = PPA

P2 : Z T6 E = PPG

GRASP

P3 : Z T6 E = PPD PG

P4 : Z T6 E = ^HHRi PHA PG

P5 : Z T6 E = ^HHRi PCH PG

P6 : Z T6 E = ^HHRi PAL PG

P7 : Z T6 E = ^HHRi PN PG

RELEASE

P8 : Z T6 E = ^HHRi PN PA

Lo anterior representa la estructura esencial de la tarea y cada parte significa una pieza separada de información. Para definir estas transformaciones se utiliza una combinación de definiciones y aprendizaje directo. Algunas de estas definiciones es-

tan expresadas simbólicamente, tales como HR_i , la cual puede obtenerse a partir de dibujos. Es importante considerar que las transformaciones representan rotaciones o traslaciones puras.

Otras transformaciones son definidas a partir de los movimientos del manipulador de una posición a otra, obteniéndose T_6 y resolviendo para las transformaciones necesarias.

Los marcos de coordenadas correspondientes a P, H y Z se muestran en la figura 4. La interrelación entre estos sistemas de coordenadas esta limitada por los objetos físicos, mientras que la localización del sistema de coordenadas de base, es determinado arbitrariamente y puede ser especificado a partir de cualquiera de los marcos de coordenadas anteriores.

Se especificara el marco de coordenadas de base en términos de Z, siendo preferible localizar el marco de coordenadas del manipulador en la base y no en el hombro.

Considerando que el eje Z del OT se encuentra localizado en su dirección principal de aproximación y que el eje Y describe su orientación ; se puede describir a la herramienta mostrada en la figura 5 como :

$$T_6 E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Una de las transformaciones más importantes es la de la inserción del objeto en el agujero (figura 6), ya que el eje Z del objeto debera coincidir con el eje Z del agujero.

Cuando el OT es colocado sobre el objeto y lo sujeta, se requiere de las siguientes transformaciones :

$$P = Z T_6 E P_G^{-1}$$

la posición de la pieza de subensamble estara definida por :

$$H = Z T_6 E (HR_i P_N P_G)^{-1}$$

la posición del objeto en el momento de la inserción es :

$$PAL = (H HR_i)^{-1} Z T_6 E P_G^{-1}$$

De la misma manera, la posición del objeto en el momento de hacer contacto con el agujero estara definida por :

$$PCH = (H HR_i)^{-1} Z T_6 E P_G^{-1}$$

Las transformaciones anteriores se encuentran esquematizadas en la figura 7.

Hasta ahora, la posición del objeto se ha obtenido a partir de

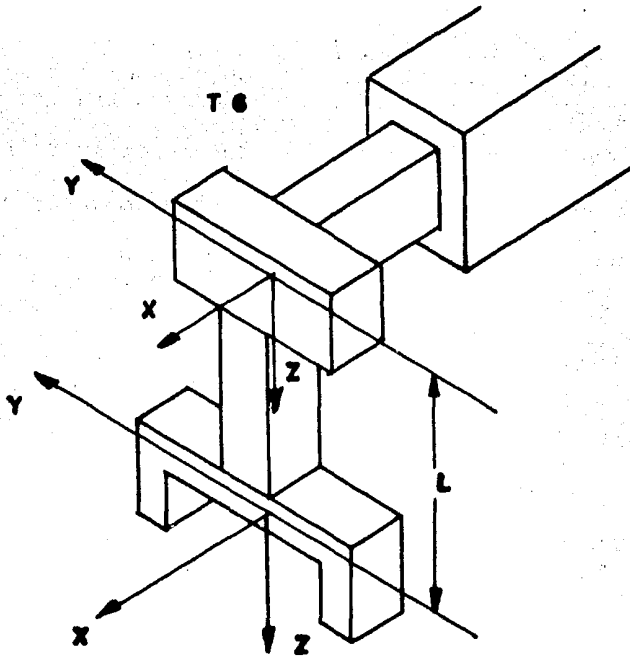


FIG. 5 DESCRIPCION DE LA HERRAMIENTA DE TRABAJO

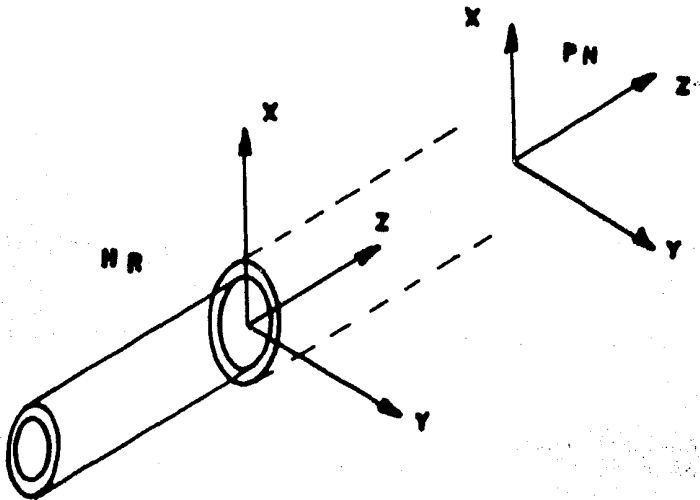


FIG. 6 INSERCION DEL OBJETO EN EL AGUJERO

colocar al manipulador sobre el objeto en la posición correcta de sujeción. Sin embargo, actualmente se están obteniendo las posiciones de los objetos a través de dispositivos visuales. De esta manera, se están utilizando cámaras de video, colocadas en una posición fija, de tal manera que pueda especificar la posición y orientación de un objeto, a través de una transformación homogénea con respecto a su propio sistema de coordenadas, llamado PC, de tal manera que la posición del objeto con respecto a las coordenadas de base se pueda expresar como :

$$P = CAM \text{ PC}$$

donde CAM es la transformación que representa al sistema de coordenadas de la cámara con respecto a las coordenadas de base. Su valor se puede obtener a partir de que el manipulador defina el valor de P a través de una fotografía.

La información de entrada a la cámara será obtenida a partir de un PROCEDURE READ, de tal manera que se pueda obtener el valor de P :

```
READ (CAMARA , PC) ;
P := CAM + PC ;
```

Definiendo dos variables de transformación, COORD y TOOL, las cuales representan una expresión general para un sistema de coordenadas de trabajo y una expresión para las coordenadas de la herramienta, respectivamente.

De esta manera, se pueden escribir todas las ecuaciones de posición en la forma:

$$T6 \text{ TOOL} = \text{COORD POS}$$

Para un primer movimiento se definirán como :

```
COORD := -Z + P ;
TOOL := E ;
```

En las expresiones anteriores, el signo + indica una multiplicación de matrices y el signo - indica una multiplicación por una matriz inversa.

Una vez que se ha realizado la sujeción del objeto, se puede definir a TOOL como :

$$\text{TOOL} := E - PG$$

De esta manera, el programa para insertar los dos objetos sería de la siguiente manera :

```
TOOL := E ;
FOR I := 1,2 DO
BEGIN
  READ (CAMARA, PC) ;
  P := CAM + PC ;
  COORD := -Z + P ;
```

```

MOVE PA ;
MOVE PG ;
GRASP ;
TOOL := E - PG ;
MOVE PD ;
HT := HR (I) ;
COORD := -Z + H + HT ;
MOVE PHA ;
MOVE PCH ;
MOVE PAL ;
MOVE PN ;
RELEASE ;
COORD := -Z + H + HT + PN ;
TOOL := E ;
MOVE PA

```

END;

Supongamos que el objeto se encuentra sobre una banda transportadora (BT), es decir, se tendrá que considerar el problema con respecto a un marco de coordenadas en movimiento.

De esta manera, se tendrá que frenar el movimiento de BT en el momento de realizar la tarea, es decir, en el momento en que el OT se aproxima al objeto, lo sujeta y lo levanta.

En la definición original de la tarea, el objeto P era definido con respecto a las coordenadas de base; para el caso de BT, lo que se requiere, es crear una transformación CONV(s), que se encuentra en función de la posición s de BT, para posteriormente describir la posición del objeto con respecto a BT. De esta manera, la posición del objeto con respecto a las coordenadas de base será :

$$P = \text{CON}(s) (\text{CONV}) P$$

A partir de esto, las posiciones serán descritas por transformaciones homogéneas con respecto a BT, la cual, a su vez, estará descrita con respecto a las coordenadas de base. De esta manera, si un objeto se encuentra colocado sobre una BT, se puede obtener la siguiente ecuación de transformación :

$$Z T_6 E = \text{CONV}(s) \text{OBJ FG}$$

donde:

CONV función escalar que describe la posición de la BT
(CONV)OBJ posición del objeto con respecto a la BT

OBJ F describe el movimiento del objeto en términos del ensamblado

F G describe al OT en términos de la desviación del

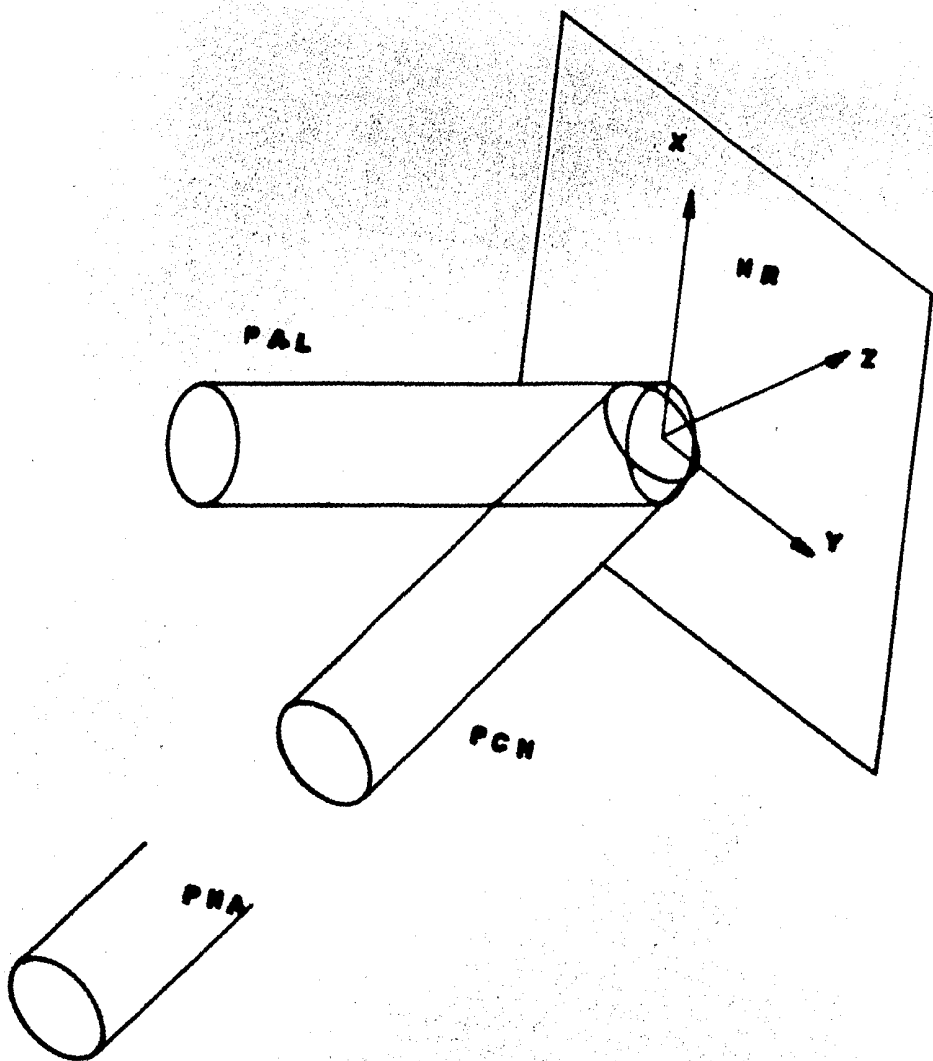


FIG. 7 MARCOS DE COORDENADAS EN LA APROXIMACION E INSERCION DEL OBJETO

objeto.

Si T6 se evaluara constantemente como valores de ángulos de articulación y el manipulador fuera posicionado en esos ángulos, el manipulador detendría el movimiento del objeto, de tal manera que si BT se detuviera también el manipulador se detendría. Esto puede aplicarse a cualquier sistema, en el cual los desplazamientos relativos entre los objetos y el manipulador se pueden expresar en forma de transformaciones homogéneas ; procedimiento ideal para las aplicaciones espaciales y sub-marinas.

La ejecución de una tarea cualquiera, consistiera en mover al manipulador a través de una serie de posiciones cuyas ecuaciones son de la forma :

$$\begin{aligned} T \ 6 \ TOOL1 &= COORD1 \ POS1 \\ T \ 6 \ TOOL2 &= COORD2 \ POS2 \\ T \ 6 \ TOOL3 &= COORD3 \ POS3 \\ &\dots = \dots \\ &\dots \dots \\ T \ 6 \ TOOLn &= COORDn \ POSn \end{aligned}$$

Aunque estas ecuaciones describen una tarea, no especifican como se movera el manipulador de una posición a otra, siendo necesario evaluar constantemente la expresión T6.

Entre dos posiciones cualesquiera definidas por COORDi POSi TOOLi y COORDi+1 POSi+1 TOOLi+1, se puede obtener la distancia entre esos dos puntos, así como la distancia angular entre ellos. Por otra parte, se puede evaluar la expresión T6 para ambas posiciones y obtener los cambios en las coordenadas de articulación entre dichas posiciones.

Dada una velocidad y aceleración angular y/o velocidad de las coordenadas de articulación, se podrá obtener el tiempo Ti para mover al manipulador de una posición a otra. Es importante considerar un cierto lapso de tiempo para permitir al manipulador acelerar y desacelerar entre los diferentes segmentos que componen una trayectoria, para obtener de esta manera, cualquier combinación entre ellos.

De esta manera, se debera redefinir la posición presente en términos del sistema de coordenadas subsecuentes. Esto se logra mediante la definición de una segunda transformación POS para cada posición, en términos del siguiente sistema de coordenadas.

Para la posición 1 se tendrá :

$$T6 \ TOOL1 = COORD1 (s/t=0)^1 \ POS1$$

El índice superior 1 indica en T6 y POS que estan definidas con respecto a TOOL1 y COORD1. El argumento (s/t=0) indica que la expresión se evaluara en el tiempo t=0, es decir, al inicio del movimiento del punto 1 al punto 2.

De esta manera, se puede obtener una segunda transformación, pero en términos de la posición de destino TOOL2 y COORD2 :

$$T6 \text{ TOOL2} = \text{COORD2} (s/t=0)^2 \text{ POS1}$$

donde T6 es la misma para ambas ecuaciones, por lo que el movimiento entre dos posiciones cualesquiera i e i+1, sera un movimiento de :

$$\begin{array}{l} T6 = \text{COORD2} (s)^2 \text{ POS1 TOOL1}^{-1} \\ \text{a} \quad T6 = \text{COORD2} (s)^2 \text{ POS2 TOOL2}^{-1} \end{array}$$

Existen muchas maneras para mover a un manipulador de una posición a otra, sin embargo, cada sistema debe proporcionar una continuidad de posición y velocidad y algunas veces de aceleración para evitar vibraciones y agitaciones.

Considerando que las variables de movimiento, posición (q), velocidad (\dot{q}) y aceleración (\ddot{q}), representan coordenadas de articulación (θ_i), para una articulación R, o distancias Di para una articulación P; su movimiento sera muy eficiente, estando limitado solamente por las velocidades y aceleraciones máximas de la articulación en estudio.

Las degeneraciones del manipulador no causan ningún problema en este tipo de movimiento y es utilizado para controlar el movimiento de grandes partes de las trayectorias del manipulador, cuando este se mueve cerca de cualquier objeto y cuando es importante obtener un tiempo mínimo.

Por otra parte, existe el movimiento en coordenadas cartesianas {1} , cuyo tipo de movimiento corresponde a los manipuladores que se mueven a lo largo de líneas rectas y giran sobre ejes fijos colocados en el espacio. La extensión de este tipo de movimiento a otros sistemas de coordenadas (cilíndricas, esféricas, etc.) es muy simple.

Al igual que en el movimiento en coordenadas de articulación, los segmentos de trayectoria estan definidos por posiciones descritas a través de transformaciones homogéneas.

La diferencia entre ambos tipos de movimiento es que en el de coordenadas cartesianas la forma de movimiento es natural, mientras que en el de coordenadas de articulación es lineal.

La ventaja que presenta el movimiento de coordenadas cartesianas (mcc) es que el movimiento entre puntos finales de los segmentos de la trayectoria, estan bien definidos y dependen de los segmentos inicial y final de la trayectoria.

Por otra parte, este tipo de movimiento presenta muchas ventajas. Primeramente, involucra la evaluación continua de los puntos de consigna del manipulador y su transformación subsecuente a coordenadas de articulación. Para este tipo de movimiento, basta con interpolar entre los puntos finales de los segmentos,

requiriendo solamente del 1% de los cálculos necesarios para el otro tipo de movimiento.

Una segunda desventaja del mmc es que presenta problemas cuando el manipulador adquiere una posición degenerada; más aún, es difícil estimar los tiempos de movimiento y aceleración ya que las velocidades y aceleraciones cartesianas se encuentran limitadas por las velocidades y aceleraciones de articulación de una manera complicada, dependiendo sobre todo, de la configuración del manipulador.

Una manera de clasificar la amplia variedad de manipuladores que existen en el mercado, es en base a la manera de ejecutar las trayectorias de trabajo y al tipo de sistema de control que utilizan. De esta manera, se pueden distinguir dos grupos: no-servo y servo-controlados, los cuales a su vez, se pueden clasificar en servo-controlados punto-apunto y servo controlados de trayectorias continuas, presentando cada uno de estos grupos, características y aplicaciones diferentes.

Los robots tipo no-servo poseen dispositivos de control muy simples y baratos. Su trayectoria de trabajo es muy reducida, ya que los movimientos de sus articulaciones poseen desplazamientos muy cortos. Son conocidos como robots "bang-bang" o "pick and place"; sus principales aplicaciones se encuentran en tareas de fundición, forja, transferencia de partes, moldeo por inyección y carga-descarga de máquinas-herramientas.

Una de sus primeras aplicaciones fue para el manejo de materiales. Sus programas de control consisten básicamente de una serie de puntos localizados en su envolvente de trabajo, además de proporcionar las señales de control para cada articulación o esperar señales del exterior. Dichas señales pueden representar solamente dos estados: paro-arranque, arriba-abajo, avance-retroceso. Otra manera de controlar este tipo de robots es a base de dispositivos externos.

Una secuencia típica de operaciones para un robot no-servo hidráulico o neumático, sería lo siguiente:

- Al inicio de la ejecución del programa, el secuenciador/controlador inicializa las señales para el control de las válvulas de los accionadores del manipulador

- Una vez abiertas las válvulas, admitiendo aire o aceite hacia los accionadores, los eslabones comienzan a moverse

- Las válvulas permanecen abiertas y los eslabones continúan moviéndose hasta llegar a los límites de carrera o topes mecánicos

- Los interruptores indican el fin de la carrera al controlador, el cual envía señales para cerrar las válvulas

- El secuenciador indica el siguiente paso y el controlador envía nuevamente las señales, las cuales pueden ser enviadas nuevamente al control de las válvulas o a un dispositivo externo, tal como una herramienta de trabajo

- El proceso se repite a hasta que la secuencia de puntos de la trayectoria ha sido ejecutada

Las características más significativas de un robot de este tipo, son las siguientes :

- Los diferentes eslabones del manipulador se mueven hasta al canzar los límites de carrera, por lo que solamente pueden tomar dos posiciones para cada eje de movimiento

- El secuenciador proporciona la capacidad para cualquier movimiento que se presente en cualquier programa, pero solamente es posible alcanzar los puntos finales para cada eje

- Las desaceleraciones que se producen en el momento de aproximarse a los limitadores pueden obtenerse por medio de distribuidores o amortiguadores de choque

- Es posible activar algunos interruptores intermedios en algunos ejes, con el fin de obtener más de dos posiciones, a pesar de que existe un número límite de tales interruptores

- A pesar de que este modo de operación es frecuentemente utilizado para robots pequeños, se puede aplicar para el manejo de grandes partes

- La secuencia de programación puede ser modificada condicionalmente a través de sensores externos apropiados ; sin embargo, esta clase de robots esta restringida para realizaciones de programas simples

- La programación se realiza proporcionando la secuencia de movimientos deseada y ajustando los limitadores para cada eje

Entre las características comunes de este tipo de robots, se pueden mencionar las siguientes :

- Es posible obtener altas velocidades de funcionamiento, debido principalmente al tamaño del manipulador y a un flujo completo de aire o aceite a través de las válvulas de control

- Factores de repetición dentro de 0.25 mm para unidades pequeñas; costos relativamente bajos, simples de operar, programar y mantener ; son altamente confiables

- Poseen una flexibilidad limitada en cuanto a capacidad de programación y posicionamiento

Los robots servo-controlados poseen básicamente la misma envolvente de trabajo que los anteriores, la única diferencia consiste básicamente en que poseen sistemas de realimentación que permiten controlar la posición, además de que su OT puede dirigirse a un mayor número de puntos. Sus trayectorias de trabajo pueden estar integradas por cientos o miles de puntos, lo cual, además de su gran precisión permite utilizarlos en operaciones como soldadura, manejo de herramientas, además de las que pueden realizar los robots no-servo.

La facilidad que representan para su programación en trayecto--

rias continuas, permite utilizarlos en operaciones de pintura, recubrimiento de superficies, esmerilado, etc.

Una secuencia de operaciones típica para un robot servo-controlado sería la siguiente :

- Al inicio de la ejecución del programa, el controlador se dirige a la localización de memoria de la primera posición y lee la posición actual de los diferentes ejes de movimiento, los cuales, son determinados a través de los sistemas de realimentación de posición

- La información obtenida anteriormente es comparada, obteniéndose ciertas diferencias llamadas "errores de señales", las cuales son amplificadas y transmitidas como señales de control a las servo-válvulas de los accionadores de cada eje

- Las servo-válvulas operando a presión constante, controlan el flujo hacia los accionadores del manipulador; el flujo es proporcional al nivel de corriente eléctrica de las señales de control

- Ya que los accionadores mueven los ejes del manipulador, existen dispositivos de realimentación, tales como codificadores potenciómetros, reductores y tacómetros, los cuales envían información con referencia a la información (en algunos casos de velocidad) hacia los controladores. Estas señales de realimentación son comparadas con respecto a las posiciones deseadas, generando las señales de error para enviarlas como señales de control a las servo-válvulas

- Este proceso se repite continuamente hasta que las señales de error son reducidas a cero, momento en el cual, las servo-válvulas se cierran y el flujo hacia los accionadores es bloqueado y los ejes del manipulador permanecen en la posición deseada

- Posteriormente, el controlador se dirige a la siguiente localización de memoria y responde apropiadamente a la información almacenada en este lugar. Esto puede significar otra secuencia de posicionamiento para el manipulador o una señal para algún dispositivo externo

- Este proceso se repite secuencialmente hasta que toda la información o "programa" ha sido ejecutado

Las características más significativas de un robot servo-controlado son :

- Los diferentes elementos del manipulador pueden ser dirigidos hacia cualquier punto dentro de sus límites de trabajo, pudiendo adquirir más posiciones y no solamente los extremos

- Ya que sus servo-válvulas modulan el flujo, es posible controlar la velocidad, aceleración y desaceleración de los diferentes ejes del manipulador, a través de su secuencia de trabajo

- Su capacidad de memoria es suficientemente grande para almacenar una cantidad mayor de puntos que los robots no-servo

- La exactitud de ejecución puede variar, dependiendo de la magnitud de la señal de error que se genere

- La programación es completamente manual , inicializando

las señales hacia las servo-válvulas para mover los, diferentes ejes a las posiciones deseadas, para posteriormente grabar la salida de los dispositivos de realimentación en la memoria del controlador. Este proceso se repite para toda la secuencia de posiciones que integran la trayectoria de trabajo.

Entre las características comunes de los robots servo-controlados, se pueden mencionar las siguientes :

- Ejecución de movimientos suaves, con control de velocidad y en algunos casos, aceleración y desaceleración. Esto permite el movimiento controlado de cargas pesadas
- Poseen una máxima flexibilidad debido a la capacidad de programar el posicionamiento de los diferentes ejes del manipulador dentro de los límites de trabajo permitidos
- La utilización de más controladores y sistemas de memoria permite el almacenamiento y ejecución de más de un programa, seleccionados aleatoriamente a partir de señales provenientes del exterior
- Con la utilización de microprocesadores o controladores basados en microcomputadoras, es posible realizar subrutinas y tener la capacidad de bifurcación de acciones a realizar. Esto le permite tomar alternativas de acción dentro de un programa
- Exactitud de posicionamiento del OT de 1.5 mm y factor de repetición de ± 1.5 mm. Ventajas que se obtienen en función de los dispositivos de realimentación, características de las servo-válvulas, exactitud de los controladores, etc.

Los robots serocontrolados punto-a-punto estan siendo utilizados en una amplia variedad de aplicaciones industriales en tareas de manejo de partes y herramientas. Entre las características más significativas de este tipo de robots, se pueden mencionar las siguientes ;

- La programación inicial de este tipo de robots que utilizan el método "grabar-reproducir" para aprendizaje y operación, es relativamente fácil y rápido ; sin embargo, no se pueden realizar modificaciones en las posiciones programadas durante la ejecución del programa
- Ya que utilizan controles de secuenciador/potenciómetro tienden a ser más tediosos para su programación; sin embargo, se pueden modificar las posiciones programadas, ajustando simplemente los potenciómetros
- La gráfica a través de la cual se deben de mover los diferentes elementos del manipulador para pasar de un punto a otro, no es programada o controlada directamente en algunos casos, y puede ser diferente de la gráfica obtenida durante el aprendizaje
- Poseen sistemas de control de alta capacidad con acceso a programas múltiples, subrutinas, alternativas de acción, etc., que proporcionan gran flexibilidad al usuario

- Tienden a colocarse en el primer lugar de utilización en cuanto a la capacidad de carga y rangos de trabajo

- Generalmente son de accionadores hidráulicos, aunque existen algunos de accionadores eléctricos

Por último, los robots servo-controlados de trayectorias continuas, presentan algunas diferencias en cuanto a los sistemas de control y algunas ventajas físicas, como las siguientes :

- Durante la programación y ejecución del programa, la información es muestreada en una base de tiempo, en lugar de ser determinada por puntos discretos en el espacio. La frecuencia del muestreo esta generalmente dentro del rango de 60 a 80 Hz

- Debido al alto grado de muestreo de la información de posición, muchas posiciones espaciales deben ser almacenadas en memoria. Generalmente se emplean cintas o discos magnéticos para el almacenamiento de la información

- Dependiendo de los sistemas de control y almacenamiento de información utilizados, se pueden almacenar varios programas, los cuales pueden ser accedidos de una manera aleatoria

- El método de programación utilizado involucra el movimiento físico del OT a través de la trayectoria deseada, con el muestreo y grabación automática de la información referente a la posición de los puntos

- La velocidad del manipulador durante la ejecución del programa puede ser diferente de la velocidad a la cual se llevó a cabo la programación y grabación de la trayectoria de trabajo

- Son más pequeños en tamaño y ligeros en peso que los robots servo-controlados punto-a-punto

- Es posible obtener altas velocidades del OT, sin embargo, las capacidades de carga son menores a 10 kg.

- Entre sus aplicaciones más comunes se pueden mencionar la pintura por aspersión y operaciones similares como recubrimiento de superficies, soldadura eléctrica, pulido, esmerilado, etc.

En los últimos años han aparecido una clase de robots industriales denominados Robots Inteligentes, los cuales poseen dispositivos que les permiten modificar su conducta a variaciones en su área de trabajo. Uno de los problemas que mayores dificultades presentan, es el flujo de información necesaria para controlar todas sus funciones. Siendo necesario lograr una estandarización en la transferencia de información entre el manipulador y los diferentes dispositivos de control.

En este aspecto, se han logrado ciertos adelantos en el manejo de información, lo que ha permitido la mayor utilización de este tipo de robots en operaciones de soldadura eléctrica y ensamblado, tareas que requieren una etapa de diseño muy compleja.

3.2.- EVOLUCION DE LA PROGRAMACION

Teniendo en consideración la definición de robot industrial más aceptada, propuesta por el Instituto Americano de Robótica (RIA) que dice : "es un manipulador multifuncional, reprogramable, destinado a mover partes, materiales, instrumentos o artefactos especializados a través de variados movimientos adecuados a la ejecución de diversas tareas". En esta definición, multifuncional y reprogramable son las palabras claves.

Dado que el trabajo que se realiza en la mayoría de las industrias es más bien rutinario, basta con que se programe al robot para que realice su tarea lo más rápido posible. Para realizar esta rutina de trabajo, el robot requiere principalmente de un dispositivo que lo guíe : la computadora. Los robots industriales poseen sistemas de control y memoria, frecuentemente en forma de micro-computadoras, que hacen posible programarlos para ejecutar determinada rutina de trabajo y, de ser necesario, reprogramarlos para realizar otra totalmente diferente.

El hecho de que el programa de instrucciones pueda modificarse o cambiarse hace que tenga una importancia crucial en la industria, ya que una línea normal de montaje para operar económicamente y producir una gran cantidad de artículos (1000 unidades al día en la industria automotriz) requiere de cambios sustanciales, como renovar sus máquinas, lo que muchas veces llega a tomar meses o más; los robots se pueden reprogramar para realizar una nueva tarea en poco tiempo.

Los robots industriales pueden programarse fácilmente, posicionando su OT a través de los diferentes puntos que integran una trayectoria de trabajo, para posteriormente grabar cada una de las posiciones de las articulaciones de una manera digital. Esta secuencia de puntos es lo que define la ejecución de una tarea.

De esta manera, la programación de los robots tipo no-servo, consiste básicamente en la regulación de interruptores mecánicos colocados en cada eje de movimiento para que los accionadores controlen los movimientos de la máquina a través de la secuencia de puntos que determinan la ejecución de la tarea.

Cada punto posee una indicación : generar una señal, esperar una señal externa, proceder automáticamente al siguiente punto de la secuencia, etc.

Algunos robots servo-controlados son programados por aprendizaje, en el cual una persona manipula un dispositivo similar a la estructura del robot a través de los diferentes puntos que integran la secuencia de trabajo.

El programa es grabado por el dispositivo de control, el cual muestra la localización de cada uno de los ejes del robot. Este método de programación graba una trayectoria continua a través del espacio de trabajo, frecuentemente utilizado para operaciones

de pintura. Una de las dificultades que presenta es la inflexibilidad para realizar cambios o correcciones. Sin embargo, la mayor dificultad se presenta cuando el robot debe analizar la información y poder tomar una decisión de trabajo.

Otra manera de programar este tipo de robots, es a través de dispositivos llamados cajas de control (teach-box) en los cuales, el programador utiliza botones, interruptores o dispositivos especiales que permiten manejar al robot a través de su envoltente de trabajo.

Las cajas de control primitivas permitían controlar al robot solamente en sus ejes básicos de movimiento, mientras que las más avanzadas hacen posible trabajar en diferentes sistemas de coordenadas (cartesianas, esféricas o cilíndricas). Un programa generado por este método está integrado por un conjunto ordenado de puntos que conforman la tarea a realizar. Cada punto especifica la localización de cada eje de movimiento y proporciona la información referente a la posición y orientación.

Con las cajas de control, el programador puede especificar que genere o espere una señal en cada punto. Señal de doble nivel (on-off) que es utilizada para coordinar la acción del robot con otro dispositivo externo.

Muchos de estos dispositivos actuales, permiten controlar velocidad y aceleración entre los diferentes puntos del programa y especificar o indicar en qué puntos se debe parar o no, el robot. Más aún, se están integrando últimamente subrutinas en lenguajes de programación que permiten realizar una amplia variedad de tareas con mayor precisión y rapidez.

Los robots industriales más avanzados poseen un dispositivo de control integrado por un teclado y una pantalla. Este sistema permite realizar correcciones en la elaboración de un programa, así como almacenar los programas de diferentes tareas. La habilidad para especificar la relocalización de un cierto número de instrucciones, hacen posible crear programas primitivos, que permitan seleccionar alternativas de acción basándose en información proporcionada por sensores.

Muchos robots pueden obtener información de un banco de datos central, sin necesidad de poseer una computadora integrada a su estructura. Esta facilidad ha permitido la evolución de los denominados "talleres flexibles", compuestos de robots y otros dispositivos de programación.

Ya que los robots tipo servo-controlados pueden ser programados a través de métodos de aprendizaje y cajas de control, son capaces de seguir trayectorias continuas en su envoltente de trabajo. Los programas generados por cajas de control usan técnicas de interpolación especificadas por el programador, para determinar puntos intermedios en las trayectorias a seguir por los robots.

A pesar de la utilización de las técnicas descritas anteriormente

para lograr la programación, ha sido necesario en los últimos años crear lenguajes propios de la robótica, debido a la complejidad de algunas operaciones que deben realizar (en cuanto a la geometría de las trayectorias) como en operaciones de soldadura y ensamblado; tareas que requieren mucha información procedente del medio ambiente de trabajo, siendo necesario la utilización de sensores y de lenguajes que permitan una interacción entre los sensores y los dispositivos de control del robot.

La creación de un lenguaje independiente, propio de la robótica industrial similar al utilizado en las máquinas de control numérico (por ejemplo: APT y PROMO) es hoy en día una tarea esencial si se desea poder automatizar al máximo la cadena completa en la concepción de la fabricación de un producto.

Estos lenguajes deberán permitir dar a la vez una descripción explícita (girar 90° la articulación #5) y una descripción implícita (pintar la unidad 2) de la tarea que se va a efectuar.

En la actualidad existen ciertos lenguajes explícitos ("VAL", "EMILY", "SIGLA", "WAVE") y unos lenguajes implícitos ("AL", "PROMO", "ROBOT", "APT", "PAL") con lo que se podría crear un lenguaje estandarizado que sería ideal para optimizar la programación de los robots industriales.

Con la utilización de sensores, posicionamiento sobre bandas transportadoras, localización visual de partes, etc., es necesario determinar un sistema de coordenadas común para la ejecución de determinada tarea, ya que cada uno de los dispositivos anteriores envían las señales con referencia a su sistema de coordenadas. Estas señales son recibidas en relación a los sistemas de coordenadas de las articulaciones del robot.

A través de estudios realizados en la Universidad de Stanford fue posible por medio de transformaciones homogéneas, determinar un sistema de coordenadas común tanto para el robot como para los dispositivos sensoriales. De esta manera, la programación y aprendizaje de los robots manipuladores se ha dividido en 3 etapas diferentes : coordenadas de articulación, coordenadas cartesianas y coordenadas cartesianas estructuradas.

a) Programación en Coordenadas de Articulación

Este sistema de coordenadas es utilizado cuando todas las posiciones que integran una tarea, se encuentran fijas, por lo tanto, la grabación de cada posición en sistema de coordenadas de articulación se hace de una manera directa y simple.

La única modificación de las posiciones es realizada por el operador a través de una regrabación haciendo ciertas modificaciones de dichas coordenadas. Este método de aprendizaje es empleado en la mayoría de los robots industriales disponibles en el mercado.

Considerando la siguiente tarea : montar una escuadra sobre una

viga y fijarla por medio de pernos ; el programa para describir dicha tarea sería la siguiente :

```

GO ESCUADRA - APPROACH
GO ESCUADRA - HANDLE
    SUJETAR
GO ESCUADRA - APPROACH
GO ESCUADRA- MONTAR- APPROACH
GO ESCUADRA- MONTAR
    SOLTAR
GO ESCUADRA - MONTAR - APPROACH
GO PERNO - APPROACH
GO PERNO
    SUJETAR
GO PERNO - APPROACH
GO VIGA - AGUJERO - APPROACH
    ATORNILLAR
    SOLTAR
GO VIGA - AGUJERO - APPROACH
GO ESTACIONAR

```

La instrucción GO origina que el manipulador se mueva a las coordenadas de articulación correspondientes a las referidas para el identificador en el arreglo de memoria seguido por la palabra GO. Actualmente las posiciones son representadas por arreglos de memoria conteniendo los valores de las coordenadas de articulación junto con las funciones necesarias para alcanzar cada posición. La ejecución de la tarea descrita anteriormente, involucra el aprendizaje de 13 posiciones.

b) Programación en Coordenadas Cartesianas

Si la posición de cualquier objeto es variable, tal como la posición de la escuadra del ejemplo anterior, la cual se localizara sobre una banda transportadora por medio de un sistema de visión artificial, por lo que sera necesario establecer un sistema de coordenadas que sea común al robot y al sistema de visión, para poder determinar la posición del objeto.

Para lograr este objetivo, se ha establecido la utilización del sistema de coordenadas cartesianas. De esta manera, la posición de la banda transportadora estara descrita por una señal de un decodificador lineal por medio de una traslación ; la posición y orientación del objeto es detectada por medio de un sistema de visión expresado por sus coordenadas cartesianas (X, Y), junto con una rotación alrededor de un eje vertical.

Para describir tanto la posición como la orientación, sera necesario

rio utilizar las transformaciones homogéneas. Sin embargo, existen muchos otros sistemas de coordenadas ortonormales que pueden ser utilizados, mas sin embargo, las coordenadas cartesianas son las más simples de utilizar.

La orientación es generalmente descrita a través de rotaciones al rededor de varios ejes (roll, pitch, yaw o ángulos de Euler). En cualquiera de estos sistemas de rotación, es necesario que se conozca el orden en que se efectuaran dichas rotaciones. Es posible convertir de cualquiera de estos sistemas a transformaciones homogéneas y viceversa.

En el caso de posiciones variables en un programa, todas las posiciones y orientaciones estan descritas a través de transformaciones homogéneas. El programa sera el mismo solo que en vez de almacenar las coordenadas de articulación se almacenaran las transformaciones homogéneas correspondientes.

Cada posición especificada en el programa de coordenadas de articulación esta asociada con una posición de aproximación, un punto en el espacio, al cual llegara y partira de una posición especifica. Aprovechando las propiedades de las transformaciones homogéneas, se puede obtener el siguiente programa en términos de las transformaciones homogéneas de aproximación :

```

GO ESCUADRA - HANDLE * A
GO ESCUADRA - HANDLE
    SUJETAR
GO ESCUADRA - HANDLE * A
GO ESCUADRA - MONTAR - AGUJERO * A
GO ESCUADRA - MONTAR - AGUJERO
    SOLTAR
GO ESCUADRA - MONTAR - AGUJERO * A
GO PERNO * A
GO PERNO
    SUJETAR
GO PERNO * A
GO VIGA - AGUJERO * A
GO VIGA - AGUJERO
    ATORNILLAR
    SOLTAR
GO VIGA - AGUJERO * A
GO ESTACIONAR

```

El programa anterior se puede simplificar a través de definir la instrucción MOVE donde :

MOVE T se expande a GO - posición actual - * A
 GO T * A
 GO T

A partir de la definición de esta instrucción, se puede obtener el siguiente programa, en el cual, la instrucción ESCUADRA - HANDLE esta definida por el sistema de visión artificial, mientras que las otras expresiones se deben definir con anterioridad:

```

MOVE   ESCUADRA - HANDLE
        SUJETAR
MOVE   ESCUADRA - AGUJERO
        SOLTAR
MOVE   PERNO
        SUJETAR
MOVE   VIGA - AGUJERO
        ATORNILLAR
        SOLTAR
MOVE   ESTACIONAR

```

Este método fue implementado en el sistema WAVE {1} moviendo al manipulador a cada posición y obteniendo las coordenadas de articulación, las cuales serán convertidas a las transformaciones homogéneas correspondientes.

Estas transformaciones eran representadas al operador y podían ser editadas directamente. Por ejemplo, si la mano no estuviera apuntando directamente hacia abajo, unos de los ángulos de orientación debería ser de 89.3° , el cual sería editado como 90° . La posición modificada podría ser verificada escribiendo la instrucción GO T y el manipulador que sea dirigido a las coordenadas de articulación correspondientes a la transformación T.

c) Programación en Coordenadas Cartesianas Estructuradas

Este sistema es utilizado, cuando las posiciones independientes son obtenidas a través de un sensor externo; si se considera el ejemplo de la posición de la viga, la cual era obtenida por un sistema de visión; en este caso era necesario redefinir dos posiciones, VIGA-AGUJERO y ESCUADRA-AGUJERO, las cuales representan la posición y orientación del perno que será insertado en la viga y la posición y orientación de la escuadra que se colocara en la viga, respectivamente.

En el sistema AL {2}, los objetivos individuales eran reconocidos y definidas las posiciones de sujeción en términos de los objetos. De esta manera, si cualquier objeto se movía, las posiciones de sujeción también se moverían. La estructura de datos AL para esta tarea, puede representarse por medio de 3 transformaciones mostradas en la figura 1, donde los nodos representan posiciones y orientaciones descritas a través de transformaciones homogéneas y los arcos indican los marcos de coordenadas utilizados.

El programa correspondiente a este sistema para la realización de la tarea considerada hasta ahora, se muestra en el siguiente programa :

```

MOVE  ARM HACIA ESCUADRA - HANDLE
      SUJETAR
COLOCAR ESCUADRA A ARM
MOVE  ESCUADRA - AGUJERO HACIA VIGA - AGUJERO
      SOLTAR
FIJAR  ESCUADRA
MOVE  ARM HACIA PERNO - GRASP
      SUJETAR
COLOCAR PERNO EN ARM
MOVE  PERNO HACIA VIGA - AGUJERO
      ATORNILLAR
      SOLTAR
FIJAR  PERNO
MOVE  ARM HACIA ESTACIONAR

```

En esta estructura de datos, muchas veces no es claro cuales posiciones representan sujeción y cuales representan relaciones de reacción. Mientras la viga, la escuadra y el perno esten representados por transformaciones y se encuentren especificados por su posición y orientación, sera claro especificar de que manera se definiran. Más aún, no solamente la posición es importante, ya que debido al efecto del brazo ocasionado por los errores cometidos en el momento de definir su orientación en las posiciones relacionadas ; por lo que también se puede definir con exactitud su orientación.

Lenguaje de Programación PAL .-

PAL es un sistema de programación de manipuladores desarrollado por Purdue {3} que utiliza el sistema de coordenadas cartesianas estructuradas para describir la ejecución de ciertas tareas. Este sistema describe una posición que puede o no puede ser ocupada por los objetos e igualarlas a las posiciones del manipulador. Cada declaración de movimiento equivale a una posición y orientación del manipulador, siempre y cuando, la ejecución del movimiento este representado por una ecuación que represente una cadena cinemática abierta.

La estructura de datos correspondiente a la tarea considerada hasta ahora, se encuentra esquematizada en la figura 2.

Ecuaciones de Posición.-

Una determinada posición estara descrita por la transformación Z siendo referenciada a la base del manipulador. El OT del manipulador estara definida por T_6 con respecto a Z .

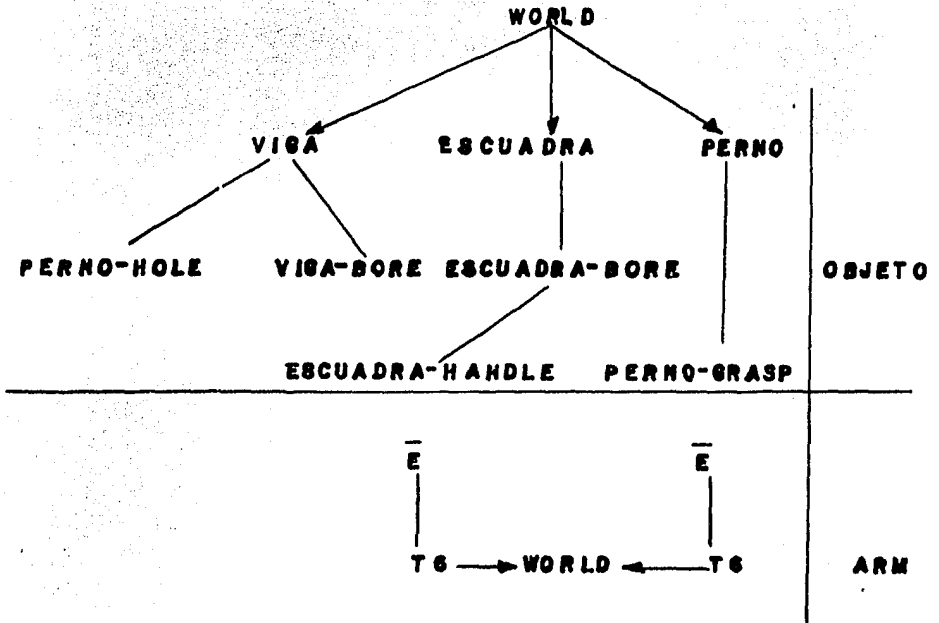
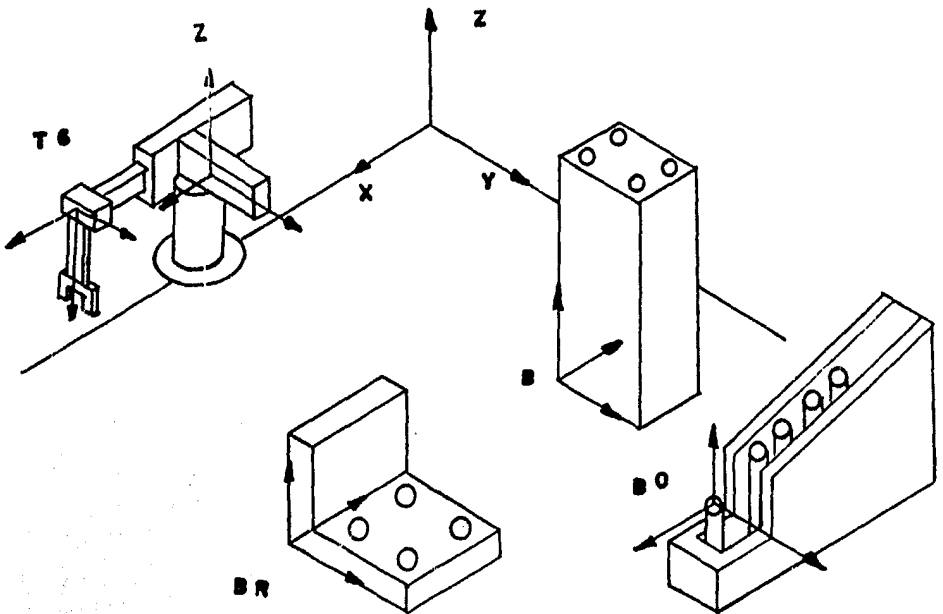


FIG. 2 ESTRUCTURA DE DATOS PAL

FIG. 3 TAREA DE ENSAMBLADO PERNO-ESCUADRA



La ejecución de un problema será posible si T_6 esta especificada de tal manera que se puedan obtener las coordenadas de articulación del manipulador y posicionarlo correctamente.

La herramienta de trabajo colocada en el OT del manipulador esta rá descrita por la transformación E con respecto a T_6 .

La secuencia de posiciones para definir una tarea, sin considerar las posiciones de aproximación, esta definida por la siguiente secuencia de ecuaciones de transformación:

$$Z + T_6 + E = \text{Escuadra} + \text{Escuadra_HANDLE} \dots\dots\dots (1)$$

$$Z + T_6 + E - \text{Escuadra_HANDLE} + \text{Escuadra_AGUJERO} \\ = \text{Viga} + \text{Viga_BORE} \dots\dots\dots (2)$$

$$Z + T_6 + E = \text{PERNO} + \text{PERNO_GRASP} \dots\dots\dots (3)$$

$$Z + T_6 + E - \text{PERNO_GRASP} = \text{VIGA} + \text{PERNO_HOLES} \dots\dots (4)$$

$$Z + T_6 = \text{Estacionar} \dots\dots\dots (5)$$

En las ecuaciones anteriores, el signo + indica multiplicación de matrices, mientras que el signo - indica una multiplicación de matrices por una matriz inversa.

La primera ecuación establece que el OT posicionado por el manipulador debe tener la misma posición y orientación del objeto que deberá manipular.

La tercera ecuación establece que los orificios de la escuadra deberán ser posicionados por el manipulador en los orificios de la viga.

En este caso, el manipulador se mueve con respecto al orificio de la escuadra, considerado como el sistema de coordenadas natural con respecto al cual se describirán los movimientos de ensamblado. Si se realiza uno de estos movimientos T_6 deberá de cambiar; este cambio puede ser igualado a un cambio que se realice en cualquier otra transformación de la ecuación correspondiente.

Dependiendo de la geometría de la pieza, se deben analizar cuales cambios serán más correctos tanto en una como en dos coordenadas. Por ejemplo, en el momento de colocar la escuadra sobre la viga, solamente se puede desear actualizar el desplazamiento en la dirección de la aproximación.

En las ecuaciones 4 y 5 el OT es colocado en el perno para posteriormente ser colocado en el agujero. Considerando este movimiento se puede añadir la dirección de aproximación, obteniéndose lo siguiente:

$$Z + T_6 + E = \text{PERNO} + \text{PERNO_GRASP} \\ \text{GRASP}$$

$$Z + T_6 + E - \text{PERNO_GRASP} = \text{BOLT} + A$$

$$Z + T_6 + E - \text{PERNO_GRASP} = \text{VIGA} + \text{VIGA_HOLE} + A$$

$$Z + T_6 + E - \text{PERNO_GRASP} = \text{VIGA} + \text{VIGA_HOLE}$$

Para convertir las ecuaciones anteriores a una programa adecuado al manipulador, se debe primero generalizar la notación ARM para especificar las posiciones con respecto al objeto de trabajo.

También se introducirá el concepto de herramienta para considerar cualquier traslado de objetos.

De esta manera, los programas harán uso de los símbolos ARM y T_OL. Por ejemplo, la ecuación 2 se puede trasladar a :

ARM ::= - ESCUADRA + Z + T₆

TOL ::= E

ARM + TOL = ESCUADRA_HANDLE

El signo ::= se refiere a una operación de asignación, de tal manera que cuando aparezca, el identificador del lado izquierdo será remplazado por la expresión simbólica del lado derecho.

Por otra parte, si se introduce la expresión MOV, la cual expresa un posicionamiento del manipulador, de tal manera que la ecuación se transforma a:

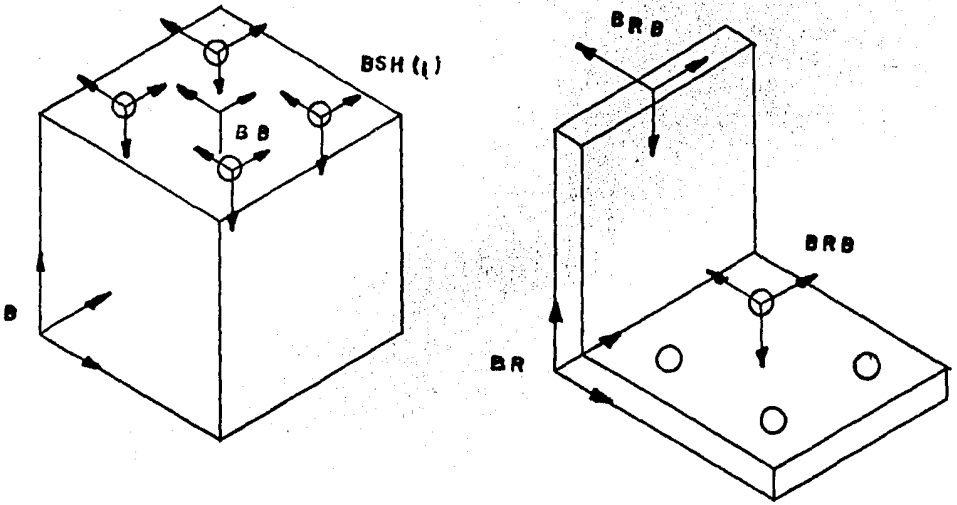
ARM + TOL = -expresión-

La estructura PAL no toma automáticamente las posiciones de aproximación, además de que los identificadores se encuentran limitados a 3 caracteres.

En base a estas consideraciones, se puede obtener el programa correspondiente para la ejecución de la tarea de montaje, expresado a continuación. Las transformaciones estan definidas en las figuras 3 a 7.

PROGRAMA 5.- TAREA EN ESTRUCTURA PAL

| | | |
|-----|----------------------------------|---|
| | ARM ::= -BR + Z + T ₆ | ; movimiento del brazo hacia la escuadra |
| | TOL ::= E | |
| M1: | MOV BRH + A | ; aproximarse a la sujeción |
| M2: | MOV BRH | ; definir BR en la posición de sujeción |
| | GRA | |
| | TOL ::= E - BRH + BRB | ; sujeción de la escuadra por la herramienta |
| M3: | MOV BRB + A | ; alejarse |
| | ARM ::= -B + Z + T ₆ | ; movimiento del brazo hacia la viga |
| M4: | MOV BB + A | ; aproximarse a la viga |
| M5: | MOV BB | ; colocar la escuadra en la viga, definir BB después de B |
| | REL | |
| | TOL ::= E | |



FIGS. 4,5 DETALLES DE VIGA Y ESCUADRA

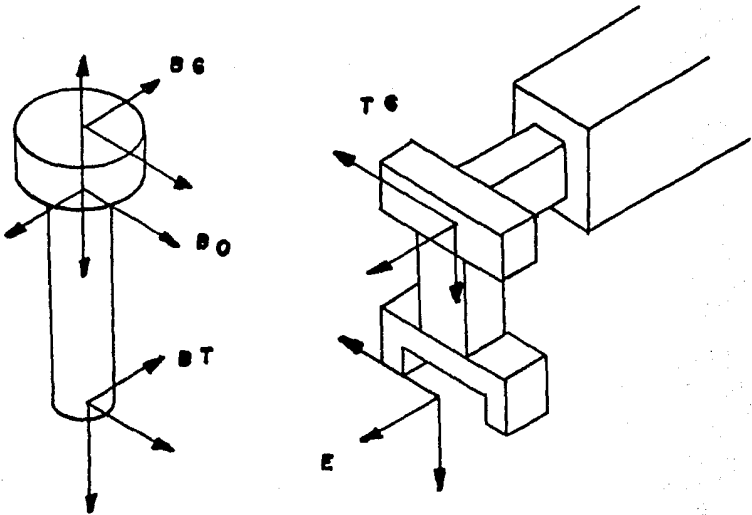


FIG. 6,7 DETALLES DE PERNO Y OT


```

M6:  MOV   BB -BRB + BRH + A      ; alejarse
     FOR   I:= 1 TO 4 DO
     BEGIN
         ARM ::= - BO + Z + T6    ; movimiento del brazo ha-
                                   cia el perno
M7:  MOV   BG + A                  ; aproximarse al perno
M8:  MOV   BG                       ; sujetar perno, definiendo BG
     GRA
     TOL ::= E - BA + BT          ; controlar la parte superior del perno
M9:  MOV   BT + A                  ; alejarse
     ARM ::= -B + Z + T6          ; movimiento del brazo hacia la viga
M10: MOV   (BSH (I) ) + A          ; aproximarse al agujero
M11: MOV   (BSH (I) )              ; dado el perno, definir B
     ATORNILLAR
     SOLTAR
     TOL ::= E
M12: MOV   (BSH (1) ) - BT + BG + A ; alejarse
     END
     ARM ::= -Z + T6;
M13: MOV   ESTACIONARSE

```

Al igual que en la estructura de datos AL, el problema de definir los valores de las transformaciones, aun se encuentra presente en PAL.

Es así, que se puede considerar una aproximación diferente llamada POINTY {4} en la cual, las transformaciones de los objetos BR, B y BC poseen una importancia secundaria y sirven solamente para obtener una relación en conjunto de las posiciones de sujeción. El aprendizaje se obtiene a partir de ejecutar paso por paso la ejecución del programa que describa la tarea que se desea realizar

Fundamentos del Aprendizaje.-

Algunas de las transformaciones que aparecen en las ecuaciones de la estructura de datos PAL, describen la posición de los rasgos característicos de los objetos.

Considerando la tarea descrita en esta sección, BT, BSH, BRB y BB pueden ser definidos a partir de dibujos, como se muestra en la figura 4.

Si el dispositivo o la herramienta colocada en el OT es conocida, la transformación E también se podría definir de dibujos, como se muestra en la figura 7.

Las transformaciones BRH y BG corresponden a las posiciones de sujeción de la escuadra y del perno, respectivamente. Ya que la herramienta colocada en el OT generalmente es diseñada para sujetar objetos en una posición exacta, BRH y BG podrán ser definidas a partir de los dibujos de la herramienta y de los objetos.

A es una transformación para relacionar una posición a través de la cual, el manipulador se aproxima y se aleja de algún objeto dado. La transformación Z en coordenadas World es diferida por una calibración inicial del manipulador, además de que no cambia, durante la ejecución de una cierta tarea y la etapa de aprendizaje.

BR, B y BO describen la posición de la escuadra, la viga y el perno respectivamente en coordenadas WORLD, transformaciones primarias que deberán ser definidas durante el proceso de aprendizaje.

Las transformaciones anteriores describen la posición de los objetos con respecto al manipulador y no se pueden definir por medio de dibujos. Durante el proceso de aprendizaje, las declaraciones Move, son interpretadas de una manera subconciente y cuando se presenta una transformación indefinida, el operador deberá mover al manipulador para definir la ecuación de relación.

Si existen más transformaciones indefinidas aparte de T6 en las ecuaciones de PAL, la declaración MOVE correspondiente no se podrá ejecutar y será necesario establecer una relación entre dichas transformaciones. El método básico para realizar el aprendizaje del manipulador consiste en resolver las ecuaciones de relación con respecto a las transformaciones indefinidas.

Una transformación indefinida puede ser utilizada más de una vez en PAL; por ejemplo, BR aparece tanto en M1 y M2 del programa 5. Si se esta definiendo una ecuación de relación en la declaración M1, se deberá mover al manipulador hasta que el marco de coordenadas de la herramienta $Z = T_6 + E$ coincida precisamente con el marco de coordenadas de $BR + BRH + A$.

Esta posición es definida inexacta comparada con la posición de sujeción especificada por la declaración M2. La ecuación de relación para encontrar BR deberá definirse en M2. La selección de las declaraciones para definir las posiciones, no es una tarea que corresponda específicamente al operador, sino que deberá ser determinada por el ingeniero de control que desarrolle los programas de ejecución además de controlar el proceso de aprendizaje, incluyendo los símbolos apropiados para un buen aprendizaje dentro de las declaraciones MOVE apropiadas. El siguiente programa muestra la ejecución de la tarea con la introducción de los símbolos de aprendizaje.

PROGRAMA 6.- TAREA PARA ATORNILLAR UNA ESCUADRA EN LENGUAJE
PAL CON SIMBOLOS DE APRENDIZAJE

```

ARM ::= -BR + Z + T6           ;movimiento del brazo hacia la
                               ;escuadra
TOL ::= E
MOV BRH + A                   ;aproximarse a la posición de
                               ;sujeción
MOV = BRH                     ;definir BR en la posición de
                               ;sujeción
GRA
TOL ::= E - BRH + BRB         ;sujeción de la escuadra por la
                               ;herramienta

```

```

MOV BRB + A ;alejarse
ARM ::= -B + Z + T6 ;movimiento del brazo hacia la vi-
ga
MOV BB + A ;aproximación hacia la viga
MOV = BB ;colocar la escuadra en la viga, -
definir BB después de B
REL
TOL ::= E
MOV BB - BRB + BRH + A ;alejarse
FOR ::= 1 TO 4 DO
BEG
ARM ::= -BG + Z + T6 ;movimiento del brazo hacia el per-
MOV BG + A ;aproximarse al perno
MOV = BG ;sujetar el perno, definir BG
GRA
TOL ::= E - BG + BT ;controlar la parte superior del
perno
MOV BT + A ;alejarse
ARM ::= -B + Z + T6 ;movimiento del brazo hacia la vi-
ga
MOV BSH(I) + A ;aproximarse hacia el agujero
MOV = BSH(I) ;atornillar el perno, definir B
ATORNILLAR
SOLTAR
TOL ::= E
MOV BSH(I) -BT + BG + A ;alejarse
ERD;
ARM ::= -Z + T6;
MOV ESTACIONARSE

```

La declaración $move\ M2$ en el programa 6 incluye el signo = que - significa que la posición y orientación del manipulador están completamente definidas, y cuya ecuación se puede utilizar para resolver las transformaciones desconocidas. La ecuación de relación estará dada por:

$$Z + T^6 M2 + E = BR + BRH$$

donde $T^6 M2$ se refiere a $T6$ cuando el manipulador es posicionado como específica la declaración $M2$. De esta manera, BR se puede resolver como: $BR = Z + T6 M2 + E - BRH$

-ECUACIONES GENERALES DE RELACION.-

Hasta ahora, el proceso de aprendizaje ha sido muy simple ya que se ha considerado que el operador podría posicionar correctamente al manipulador de tal manera que los marcos de coordenadas coincidieran. Sin embargo, en la práctica se deben considerar varios tipos de partes además de que las ecuaciones definidas durante el aprendizaje muchas veces proporcionarían solamente información parcial referente a la coincidencia de los marcos de coordenadas.

La tabla I muestra varias clases de ejemplos de tareas de ensamblado; las cuales están clasificadas de acuerdo a los grados de libertad de translación y de rotación restringidos. Por ejemplo el

GRADOS DE LIBERTAD
DE RESTRICCIÓN

R0

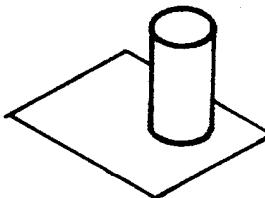
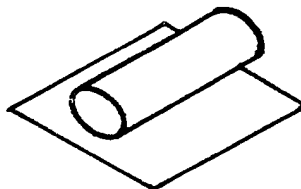
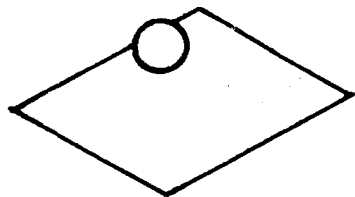
ROTACION
R1

R2

R3

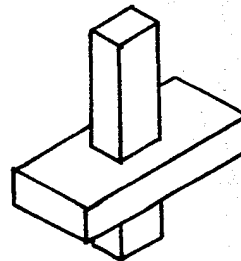
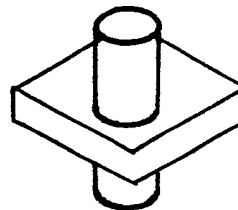
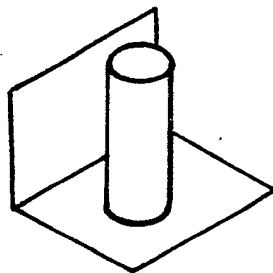
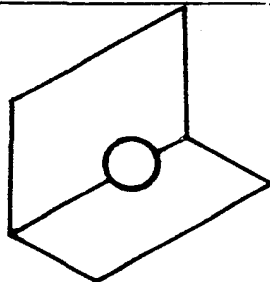
TRASLACION

T1



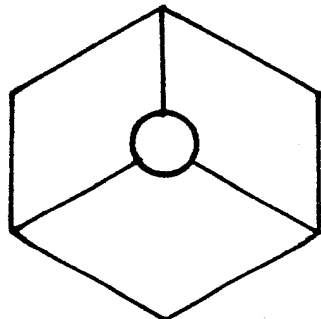
*

T2



ENSAMBLADO

T3



*

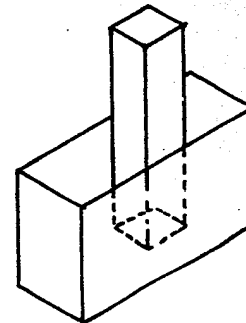
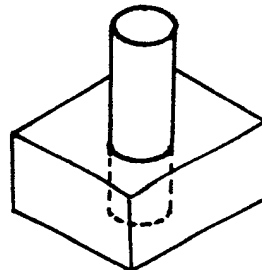


TABLA 1.- CONDICIONES DE INCIDENCIA EN TAREAS DE

caso de incertar una flecha en un agujero sería el caso T2-R2 - (los grados de libertad restringidos son 2 de translación y dos de rotación) Para este ejemplo, el marco de coordenadas fijo en la flecha deberá coincidir precisamente con el marco de coordenadas del agujero, excepto para la traslación a lo largo del eje central así como la rotación para el mismo eje.

Todos los ejemplos mostrados en la tabla I son fáciles de encontrar excepto los casos T2-RI y T3-RI, ya que es difícil encontrar una solución general para las ecuaciones de relación, para cuando TI-RI, T2-RI, para I=i=3. Siendo esta la razón principal por la cual solo se consideran los casos T3-RO, T3-R2 y T3-R3 como condición de coincidencia en el proceso de aprendizaje. Para denotar las condiciones T3-RO, T3-R2 y T3-R3 se utilizarán los símbolos - * A,=respectivamente.

La figura 8 muestra las características de coincidencia para cada uno de los símbolos anteriores.

Del mismo modo, se puede observar que la declaración move M8 en el programa 6 utilizan el símbolo = para hacer coincidir los marcos de coordenadas $Z + T_6 + E$ y $BO + BG$.

La condición para este caso sería T3 - R2, ya que el perno es simétrico a su eje central.

Sin embargo, si se establece la ecuación de relación bajo la condición A, no se podía encontrar una solución. En este caso, la única alternativa es utilizar el símbolo = ya que el error de rotación alrededor de su eje no afectará la ejecución de la tarea.

De esta manera, las declaraciones MOVE se pueden expresar de la siguiente manera, utilizando los símbolos de aprendizaje:

```
MOV= -expresión-
MOV A -expresión-
MOV * -expresión-
```

El símbolo * en la declaración MII del programa 6, determina la transformación B, a través de la medición de las 3 posiciones correspondientes a BSH(1), BSH(2) y BSH(3).

Calibración del Manipulador.-

La calibración del manipulador consiste en definir la transformación Z, la cual es realizada por el programa 7. En las declaraciones M2, M5 y M8, el manipulador es trasladado a las posiciones P1, P2 y P3, obteniéndose las siguientes ecuaciones de relación:

$$\begin{aligned} Z + T_6 M2 + E + TIP * P1 \\ Z + T_6 M5 + E + TIP * P2 \\ Z + T_6 M8 + E + TIP * P3 \end{aligned}$$

Ecuaciones en las cuales, solo la transformación Z esta indefinida.

FIG. 8.- CARACTERISTICAS DE COINCIDENCIA PARA LOS SIMBOLOS DE APRENDIZAJE

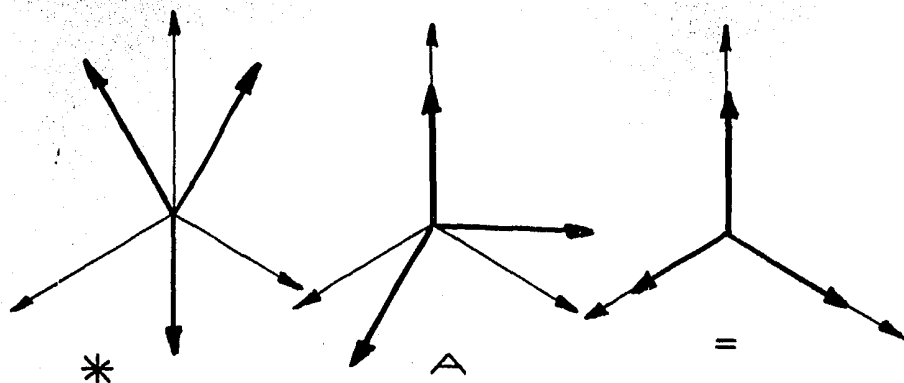


FIG. 9.- TABLA DE TRANSFORMACIONES

| | Etiqueta | Tipo | m | n | p |
|----|----------|------|---|---|---|
| 1 | ARM | in | | | |
| 2 | TOL | in | | | |
| 3 | T6 | in | | | |
| . | . | . | | | |
| N1 | BR | in | | | |
| N2 | Z | de | | | |
| N3 | E | de | | | |
| N4 | M | in | | | |
| N5 | T6 | de | | | |
| N6 | BRH | de | | | |
| | nula | | | | |
| 50 | | | | | |

PROGRAMA 7.- CALIBRACION DEL MANIPULADOR

```

TOL ::= E + TIP
ARM ::= Z + T6
M1: MOV P1 + A ;aproximarse a la posición P1
M2: MOV & P1 ;aproximarse a P1 con los ex-
; extremos de la mano
M3: MOV P1 + A
M4: MOV P2 + A
M5: MOV & P2 ;aproximarse a P2 con los ex-
; extremos de la mano
M6: MOV P2 + A
M7: MOV P3 + A
M8: MOV & P3 ;aproximarse a P3 con los ex-
; extremos de la mano
M9: MOV P3 + A
M10: MOV ESTACIONARSE

```

La etapa de aprendizaje termina durante la ejecución del calibrado del manipulador, para lo cual se debe estar preparando para obtener los cambios graduales de la posición de los objetos en relación al manipulador. Esto se origina por el cambio en la tolerancia de las partes, desgaste o desalineación en la calibración del posicionamiento del manipulador. Por lo cual se debe reprogramar la tarea entera o re-obtener las posiciones necesarias.

Esto se realiza a través de reprogramar un punto y cambiar la transformación más adecuada en la declaración MOVE correspondiente. Las transformaciones que aparecen más de una vez al igual que la transformación más adecuada, se deben copiar para cada declaración MOVE en la cual aparezcan. De esta manera, en la declaración M1 se debe cambiar la transformación A; sin embargo, no cambia su valor para cualquier otra declaración en la que aparezcan. Por otra parte, es necesario utilizar un compilador para interpretar un programa en PAL.

Programa de Aprendizaje.-

Para la elaboración de un programa en la ejecución de una determinada tarea, se requiere de una tabla y 6 clases de columnas.

Todas las transformaciones que aparecen en un programa son almacenadas en una tabla de transformaciones. Como se muestra en la figura 9, existen 3 campos para cada elemento de la tabla de transformaciones, que corresponden a etiquetas con 3 caracteres alfanuméricos, que corresponden a una abreviación para definir cuando una transformación está definida (de), indefinida (in) o no se utiliza (nula), además de estar representada la transformación misma por 3 vectores: p, que representa traslación y m, n que representan n vectores de orientación.

Columns ARM, TOL, MACRO,-

Las expresiones definidas por las declaraciones ARM y TOL son utilizadas cuando las expresiones MOVE son transformadas a ecuaciones PAL. Las columnas ARM y TOL son utilizadas para almacenar esas expresiones.

La declaración MACRO, permite denotar una expresión de transformación mediante un identificador, el cual, al encontrarse durante la ejecución del programa, será reemplazada automáticamente por su expresión correspondiente.

Se requiere de 5 columnas MACRO para almacenar estas expresiones. Cada una de estas columnas posee la misma estructura; cada una contiene 11 elementos, los cuales representan una transformación.

Existen dos campos en cada elemento de la columna, un operador y un apuntador. El operador puede corresponder a los signos +, - 0 = . El puntador está orientado hacia una transformación, contenida en la tabla de transformaciones. Por ejemplo, si se interpretaran y ejecutaran las siguientes expresiones, las columnas son mostradas en la figura : 10

MOV BRH + A

Esta declaración MOVE es traducida a ecuación PAL como sigue

ARM TOL

$$-BR + Z + T_6 + E = BRH + A$$

En el caso en que todas las transformaciones sean definidas, excepto T_6 , cuyos valores son calculados y desplegados en la pantalla, de la siguiente manera:

; El movimiento está direccionado ;

Los valores cartesianos de la transformación T_6 están dados por:

X = Y = Z =

ROLL = PITCH = YAW =

Si existen más transformaciones indefinidas además de T_6 , el sistema responderá con el siguiente mensaje: "No se puede ejecutar el movimiento". Si la declaración contiene un símbolo de aprendizaje como la siguiente:

MOV = BRH

la ecuación en PAL será elaborada de la siguiente manera:

$$-BR + Z + T_{6M2} + E = BRH$$

en donde el sistema responderá con:

"Moverse a la posición deseada"

Posteriormente el sistema tomará los 6 subsecuentes valores de entrada como los valores cartesianos de T_6 (X, Y, Z, ROLL, PITCH, YAW) para calcular posteriormente T_6 .

FIG. 10.- COLUMNAS ARM, TOL Y MACRO

| | <u>OPERADOR APUNTADOR</u> | | <u>OPERADOR APUNTADOR</u> | | <u>OPERADOR APUNTADOR</u> | | | | |
|----|---------------------------|----|---------------------------|------|---------------------------|-----|------|----|----|
| 1 | + | 1 | ARM | + | 2 | TOL | + | N4 | M |
| 2 | = | | | = | | | = | | |
| 3 | - | N1 | BR | + | N3 | E | + | N1 | BR |
| 4 | + | N2 | Z | nula | | | + | N3 | E |
| 5 | + | 3 | T6 | | | | nula | | |
| 6 | nula | | | | | | | | |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| 11 | | | | | | | | | |

FIG. 11 .- COLUMNA EQUAL

| <u>OPERADOR</u> | <u>APUNTADOR</u> | |
|-----------------|------------------|--------|
| - | N1 | BR |
| + | N2 | Z |
| + | N5 | (T6)M2 |
| + | N3 | E |
| = | | |
| + | N6 | BRH |
| nula | | |

- h) MOV * -expresión- ;
- i) ID := -expresión- ;
- j) GRA ;
- K) REL ;
- l) SCR ;

La expresión puede ser de la siguiente forma:

$$a + bc(i) - def - gh - j(i) + klm$$

donde:

- bc(i) indica un arreglo de transformaciones
- + multiplicación de matrices
- multiplicación de matrices por una inversa

El operador podrá utilizar los siguientes términos en la estructura de un comando :

- ? presenta una breve explicación del uso del programa
- & imprime todas las etiquetas
- ! imprime todas las etiquetas indefinidas
- ; imprime todas las transformaciones definidas
- "ID imprime los valores cartesianos de ID
- \$ID imprime la transformación ID
- #IDn permite al operador definir el n-ésimo arreglo
- %ID permite definir la transformación ID en valores cartesianos
- @ID permite etiquetar ID como indefinida
- / imprime las ecuaciones en las columnas "=", "**" y λ

A manera de ejemplos, se presentan los siguientes casos :

* & ARM TOL T6 Z E

* ! ARM TOL T6 (Z y E no se presentan porque están definidas)

* "Z

Los valores cartesianos de Z son :

| | | |
|----------|-----------|---------|
| X = 0 | Y = 0 | Z = 0 |
| ROLL = 0 | PITCH = 0 | YAW = 0 |

* \$Z

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1.0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1.0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1.0 |

Para adoptar el sistema al control actual del manipulador, esta sección de entrada sera remplazada por el programa, el cual leera los ángulos de articulación (θ_i) del manipulador.

Si las ecuaciones de relación obtenidas recientemente no pueden ser resueltas, se deben almacenar en la columna EQUAL como se muestra en la figura 11. Si existe una solución factible, los valores de las transformaciones definidas, son descritos en los campos de las transformaciones de la tabla, tomando en consideración las notaciones "un" y "de".

Una vez resueltas las ecuaciones, seran removidas de las columnas. Existen ciertas declaraciones para indicar una sujeción (GRA), soltar una pieza (REL) o atornillar (SCR), cuya sintaxis sera revisada por el programa elaborado durante la etapa de aprendizaje.

Comandos de Operación .-

Durante la etapa de aprendizaje, el operador guía al manipulador a través de las posiciones que integraran una trayectoria de trabajo, a la vez que va presionando una serie de botones en una caja de control, para ir conformando el programa de actividades.

Sin embargo, para el programador encargado de codificar y revisar el programa, existen una serie de funciones que son utilizadas para comunicarse con el programa, llamadas comandos de operación. Por ejemplo, cuando un sistema es inicializado, responde con la siguiente frase :

Si necesitas ayuda , escribe "?" .

En los ejemplos que siguen, los textos escritos por el operador estaran indicados por comentarios subsecuentes incluidos entre llaves { }. Si se escribe un "?", aparecera en la pantalla una explicación sobre el uso del sistema.

Todas las etiquetas de transformación tendran las siguientes características :

- a) poseen como máximo 3 caracteres alfanuméricos
- b) comienzan con un caracter alfanumérico

Cada declaración debe tener alguna de las siguientes formas :

- a) For I := -expresión- To -expresión- Do -expresión-
- b) Poseer la declaración END ;
- c) ARM ::= -expresión- + T6 ;
- d) TOOL ::= -expresión- ;
- e) MOV -expresión-
- f) MOV = -expresión- ;
- g) MOV A -expresión- ;

* #BSH4 (con este comando se crea un arreglo de 4 valores en las tablas de transformación)

* %Z Los valores para definir Z seran :

| X | Y | Z | ROLL | PITCH | YAW |
|---|---|---|------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

(de esta manera se definen textualmente las transformaciones)

* %Z (este comando considera a Z como variable indefinida)

Para verificar esto, se puede teclear el comando ;, donde :

* ; ARM TOL T6 Z

Los lenguajes de programación descritos anteriormente, han sido desarrollados principalmente para la etapa de control, sin tener en consideración el tipo de información que se maneje.

Uno de los primeros lenguajes de programación WAVE {1}, así como su nivel precedente AL {2}, fueron creados teniendo en consideración la gran cantidad de cálculos que se tenían que realizar durante la elaboración del esquema de control adecuado; es decir, eran utilizados durante la fase de planeación, en la cual, se simulaba el programa a ejecutar almacenando todos los cálculos necesarios en forma modificable en un archivo de ejecución.

Sin embargo, esto trajo enormes complicaciones cuando la ejecución del programa variaba significativamente de la etapa de planeación a la de ejecución; o cuando existían ciertas desviaciones del programa principal, ya que era necesario simular todas esas posibles derivaciones.

El sistema VAL {5} junto con un sistema de movimiento cartesiano eliminó la necesidad de simular el programa entero y permitía la interpretación del programa línea por línea.

Todos los sistemas anteriores estaban basados en características simbólicas, involucrando la utilización de analizadores, tablas de símbolos, etc.

A partir de esto, se inició la utilización de lenguajes más directos, llamados lenguajes de alto nivel, entre los cuales se pueden mencionar el lenguaje PASCAL {5}, en donde es necesario definir primeramente la estructura de datos, para posteriormente, definir las transformaciones y expresiones de transformación necesarias para el estudio del manipulador.

La ejecución de un programa realizado en este tipo de lenguajes es considerado en términos de una estructura de co-procesador, ya que es necesario utilizar un procesador para el programa y uno para el manipulador. De esta manera, es necesario elaborar una estructura de sincronización para coordinar ambos procesadores. Estos procesadores pueden estar implementados en un procesador físico o en una configuración de multi-procesador.

La utilización de estos lenguajes de alto nivel, ha permitido la evolución de los robots inteligentes, los cuales, debido a la cantidad de información necesaria para su control, ha sido necesario realizar una estandarización de la información entre el manipulador y el robot, robot-robot, robot-máquina, robot-sistema de manejo de materiales o robot-computadora central.

De esta manera, es posible que en el futuro se incorpore a los robots una multitud de programas, cuya capacidad los haga "rivalizar" con el ser humano. Por otra parte, podrá recurrir a la información almacenada en una computadora central que contenga programas para realizar cualquier tarea que se encuentre dentro de sus posibilidades.

Es así, que en las fábricas del futuro, los robots podrán ser programados con todas las instrucciones necesarias para llevar a cabo la elaboración completa de un producto. Un supervisor en computación podrá despachar a los robots de un lado a otro de la fábrica, logrando con esto, mantener el ritmo de la producción.

2.4.- PERCEPCION SENSORIAL
=====

2.4.- PERCEPCION SENSORIAL

A través del desarrollo tecnológico que se ha presentado en el siglo XX se ha podido llegar a la obtención de máquinas multi - funcionales y reprogramables para realizar tareas de inspección manipulación o ensamblados automáticos, con gran precisión y exactitud: el robot, cuya máquina ha permitido realizar modificaciones en las líneas de producción, obteniéndose una gran flexibilidad de funcionamiento, distinguiéndose con esto de las máquinas automáticas especializadas.

La mayoría de los robots industriales desarrollados en los últimos años, deben trabajar en un medio ambiente previamente determinado e invariable, cuyos movimientos deben ser muy precisos, ya que el robot no posee los dispositivos necesarios para detectar modificaciones en dicho ambiente.

Sin embargo, los trabajos desarrollados en las áreas de Percepción sensorial e Inteligencia Artificial, han permitido la obtención de máquinas denominadas Robots Inteligentes que poseen una mayor flexibilidad y cuentan con dispositivos llamados SENSORES, los que le permiten tener conciencia de su medio ambiente de trabajo y tener una mayor iniciativa en la realización de sus tareas.

Uno de los primeros trabajos desarrollados en la área de Inteligencia Artificial fue el realizado por el Instituto de Investigaciones de Stanford sobre el robot Shakey, el cual se encontraba acoplado a una computadora. Un sistema de cámara de televisión le proporcionaba el sentido de la vista y a través de sensores de proximidad podría descubrir su medio ambiente de trabajo; después de analizar las imágenes proporcionadas por la cámara, eran pasadas a un sistema de reconocimiento de formas, para posteriormente almacenar las imágenes visuales en la memoria de la computadora, las cuales servían de base de datos para investigaciones posteriores realizadas por el robot.

La experiencia adquirida a partir de esta investigación, ha permitido definir la importancia que representa la utilización de sensores para lograr el desarrollo de la Robótica Industrial.

De esta manera, se han podido distinguir las siguientes áreas de aplicación de sensores para el funcionamiento del robot:

- Inspección Visual
- Localización de Objetos
- Control interactivo de la manipulación

La primera de las aplicaciones esta destinada al control de calidad de los productos manufacturados, implicando una comparación entre los patrones de diseño. Esta comparación puede ser cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa, aunque la mayoría de los casos corresponde a una aplicación cualitativa.

Dependiendo de las características de esta función, se seleccionará el tipo de sensores más adecuados para obtener la información necesaria para lograr su objetivo.

La inspección industrial de partes y ensamblados incluye, la detección de grietas en una pieza de fundición, examinar el estado de la superficie de un revestimiento metálico, el aspecto de una soldadura, asegurar las dimensiones deseadas de un objeto manufacturado, asperezas, burbujas o la buena firmeza de una operación de ensamblado. Esta lista no exhaustiva, permite obtener una idea del inmenso campo de aplicaciones que la inspección industrial ofrece a la robótica industrial apoyada en percepción sensorial.

La automatización de los procesos de inspección visual requiere de la creación de una lógica particularmente rica en funciones a realizar. Por otra parte, la gran variedad de características significativas que se examinan de una manera rutinaria por operadores, dan indicación de la complejidad del procesamiento que se requiere efectuar por un sistema de inspección automatizado, generándose necesidades para todos los tipos de sensores: de contacto, de proximidad y telesensores.

Los robots instalados en unidades de producción en grandes series, trabajan con objetos cuya posición y orientación se encuentran necesariamente determinadas con precisión, tanto en el espacio como en el tiempo.

Sin embargo, un gran porcentaje de las operaciones de maquinado y ensamblado requieren primeramente de tomar piezas contenidas a granel en cajas o bandas transportadoras, cuya posición y orientación se encuentran determinadas en forma aleatoria.

De esta manera, se observa que para lograr la automatización de las operaciones de ensamblado y manutención será necesario localizar fácilmente las piezas a manipular, es decir, determinar su orientación y posición que permita identificarlas en el área de trabajo.

La manutención y ensamblado industrial deberán realizar movimientos elementales tales como: prehensión, inserción, ajuste, alineamiento, rotación, etc. Ejecutadas por el hombre, la precisión dependerá básicamente de los sistemas de realimentación sensorial que existan entre las manos y los sentidos: el obrero corrige los desplazamientos de sus manos después de la información visual que recibe y de los efectos proporcionados por el contacto físico con las piezas manufacturadas.

De la misma manera, el robot deberá disponer de dispositivos sensoriales que trabajen a distancia o por contacto, con el fin de lograr funciones específicas; por ejemplo, la utilización de la teledetección a fin de disponer de información relativamente vasta sobre el medio ambiente de trabajo o la medición por contacto, para lograr una realización más precisa.

Otro aspecto de interés para la aplicación de sistemas sensoriales, es el de la determinación automática de las trayectorias de consigna, como en el caso de la industria automotriz, en donde el manipulador deberá identificar la carrocería en una línea de ensamble y localizar las zonas de unión entre dos o más piezas, generando posteriormente la trayectoria de los puntos de soldadura.

Las observaciones anteriores ponen en evidencia la utilidad de los sensores de contacto y telesensores, en el control de tareas de manipulación e indican la necesidad de definir áreas específicas de aplicación para cada tipo de sensor. La identificación de estas relaciones (aplicación/sensor) puede obtenerse a partir de la consideración de que cualquier operación de mantenimiento que trabaja con piezas posicionadas aleatoriamente, se puede dividir en dos etapas de percepción sensorial: primeramente, un sistema de visión artificial resulta muy apropiado para determinar su posición y orientación de una manera aproximada. A partir de esta información el manipulador puede posicionarse automáticamente.

En este momento, el OT del manipulador podrá iniciar la operación de prehensión, apoyándose de sensores por contacto para controlar el movimiento de los dedos cuando hayan tocado la pieza, como lo muestra la figura 1.

Este ejemplo ilustra los méritos relativos de cada tipo de sensor y las ventajas de su utilización coordinada.

En el control interactivo de la manipulación, los sensores de contacto encuentran un gran número de aplicaciones industriales entre las que se pueden mencionar:

-- Maquinados por abrasión o por arranque de viruta, en donde sensores de par y/o fuerza pueden aplicarse con gran éxito en el control interactivo de operaciones de cepillados de piezas de fundición, eliminación de rebabas, lijado, pulido, etc. El uso de estos sensores permite, además, la compensación automática por desgaste de la herramienta.

-- Inserciones de ejes, bujes, tornillos, tuercas, etc., constituyendo acciones elementales de operaciones de ensamble más complejas. La utilización de sensores de fuerza para facilitar la realimentación de información para la corrección de errores en un sistema de manipulación controlado por computadora.

-- Operaciones de empaque y almacenamiento. El empaque ordenado de piezas en cajas o contenedores puede llevarse a cabo automáticamente mediante el uso de sensores de fuerza, acoplados a órganos terminales flexibles, que paren el movimiento del manipulador al entrar en contacto con el fondo o las paredes de la caja o contenedor. Estos sensores también permiten la realimentación global del manipulador con su medio de trabajo, al compensar variaciones en posición/orientación de la caja y/o de las partes, así como variaciones no medibles en la

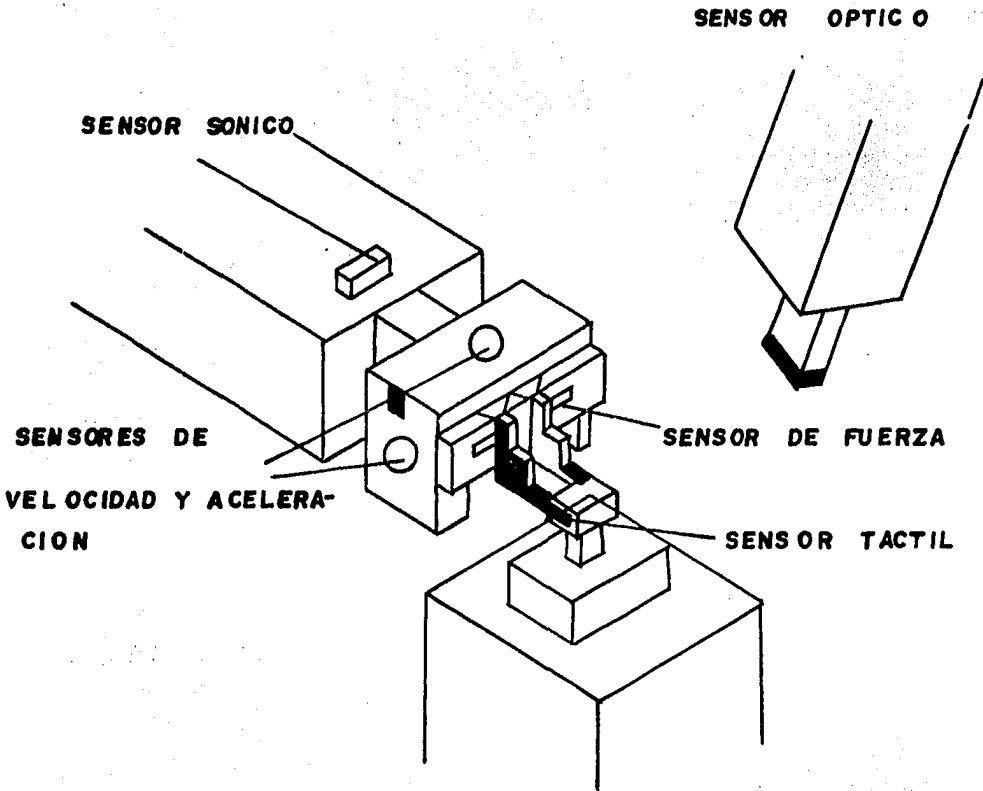


FIG. 1 SISTEMA SENSORIAL POR CONTACTO

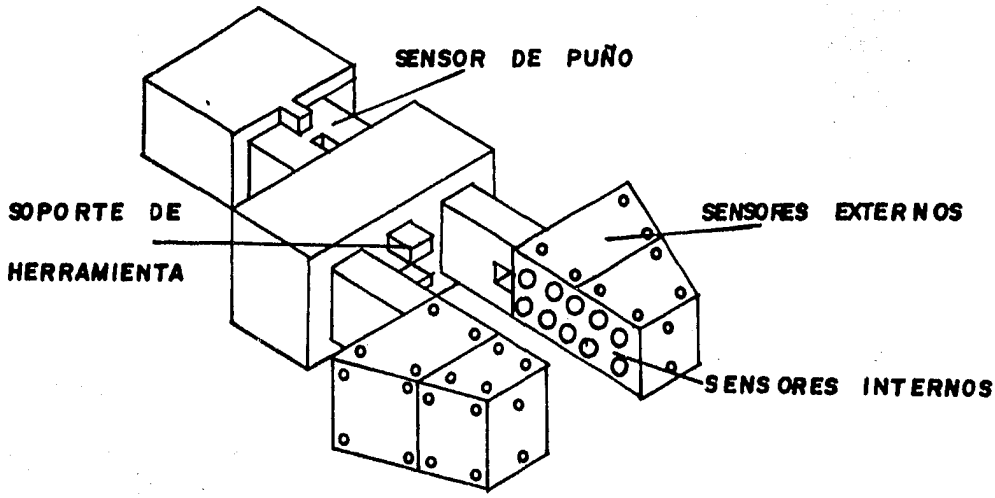


FIG. 2 SENSOR DE FUERZA/PAR DEL TIPO GALGAS TENSOMETRICAS

configuración del manipulador.

-- Impedir colisiones a través de la implantación de sensores de fuerza/par en las uniones y articulaciones de los manipuladores con objeto de detener inmediatamente al manipulador en caso de que algunas de las fuerzas de reacción exceda un valor predeterminado.

Estas aplicaciones manifiestan la importancia de una implantación coordinada de sensores de alta resolución con sensores de baja resolución pero dotados de mayor campo de percepción.

La amplia variedad de sensores utilizados en Robótica Industrial, se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Sensores por Contacto
- Sensores de Proximidad
- Telesensores

2.4.1.- Sensores por Contacto

Anteriormente se trató de poner en evidencia la necesidad de utilizar percepción por contacto combinada con telepercepción para lograr la realización de diversas operaciones industriales:

Sin embargo, muchas veces no es posible utilizar sistemas de visión artificial; en particular cuando existen obstáculos entre el sensor y la zona de interacción, falta de luz o simplemente por costos. En cuyas circunstancias, los sensores por contacto constituyen un recurso importante en la realización de tareas básicas de manipulación y ensamblado.

Las distintas funciones que pueden ser realizadas por estos sensores, se pueden reagrupar de la siguiente manera:

- Escrutación y detección de piezas por medio de "tacto artificial"
- Identificación de la pieza y determinación de su posición y orientación
- Prensión estable de objetos controlando la presión ejercida por el OT sobre el objeto
- Determinar textura y flexibilidad de objetos

Existen ciertas operaciones industriales, se han identificado dos tipos de percepción de fuerzas y pares, según el origen de éstas:

- propioceptiva, cuando las fuerzas y pares son producidos por acciones de los elementos de la estructura misma del manipulador (peso o reacciones de sus accionadores)
- exteroceptiva, cuando son producidos por cuerpos externos a la estructura del manipulador

La percepción propioceptiva se lleva a cabo según el tipo de accionador que se utilice. Por ejemplo, en el caso de motores eléctricos las fuerzas aplicadas a cada articulación del brazo, pueden ser determinadas por la medición de la corriente eléctrica de alimentación para lograr el arranque de cada elemento del manipulador.

La percepción exteroceptiva, sumamente útil para el control interactivo de la manipulación, requiere de sensores especializados. Actualmente existen dos formas similares de sensores para lograr este tipo de percepción.

Una de ellas es la que se ha denominado sensor de muñeca, la cual permite la medición de 3 componentes ortogonales de la fuerza y del par resultante, entre el OT y el resto del manipulador.

Gracias a ciertos transductores como las galgas tensométricas, transductores piezo-eléctrico, magnéticos y otros; es posible medir las deformaciones producidas por las fuerzas y pares aplicados al sensor.

Como lo muestra la figura 2, se han desarrollado varios sensores de este tipo, que poseen la sensibilidad de las galgas tensométricas y la flexibilidad de láminas metálicas.

La segunda forma de sensores de fuerza/par se han denominado de pedestal, el cual, no se acopla al manipulador sino que se monta en un pedestal al cual se fija la pieza de trabajo. La manera de medir las fuerzas y pares es similar a la del sensor de muñeca, solo que se dispone de mayor capacidad de carga y espacio, con lo que se han obtenido sensores que poseen un rango dinámico más elevado y de mejor resolución.

Los sensores de tacto se han empleado en la percepción de contacto, rigidez, textura y forma para tareas de identificación e inspección de partes y en la búsqueda de mejorar la seguridad en la manipulación automática.

A principio de la década de los setenta los únicos dispositivos disponibles como sensores de tacto eran de tipo binario: microswitches, boquillas neumáticas y cojines sensibles a la presión los cuales servían principalmente como topes; sin embargo, con el desarrollo del reconocimiento de formas y la piel artificial, han sido desplazados, aunque todavía se utilizan los sensores binarios en la actualidad.

Los sensores de tacto miden generalmente desplazamientos, ya sean producidos por una forma o por una fuerza; también pueden ser individuales o formar parte de una red o arreglo.

En los sensores analógicos, una forma de obtener una medida continua de la fuerza es a través de la respuesta de un potenciómetro a un desplazamiento producido por un elemento elástico. Por otra parte, se han desarrollado una serie de investigacio--

res en diversos países industrializados referentes a la utilización de hules conductivos y polímeros para lograr la percepción de presión o fuerza. La utilización de estos materiales se ha visto limitada por características no-lineales como histéresis, ruido, fatiga, baja sensibilidad, etc., por lo que ha sido necesario desarrollar nuevas tecnologías para el uso de nuevos materiales.

2.4.2.- Sensores de Proximidad

Los sensores de proximidad tienen como función indicar la presencia o ausencia de objetos, sin que se requiera contacto físico entre dicho objeto y el sensor. Este tipo de sensores pueden ser de características binarias o analógicas.

Los sensores analógicos son los encargados de medir la fuerza de presión de los dedos sobre el objeto manipulado, además de obtener información referente al objeto de trabajo. Un sensor del tipo binario, podría ser la utilización de una sonda eléctrica para detectar la presencia o la ausencia de un objeto entre los dedos de la mano del manipulador.

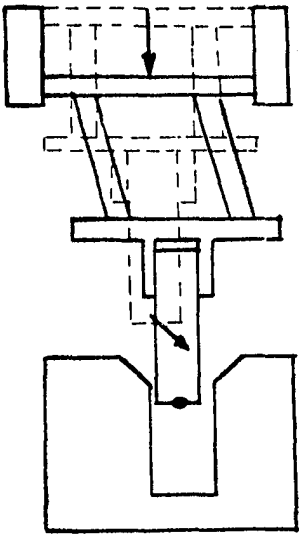
Algunos investigadores han tratado de utilizar la información obtenida mediante el sentido del tacto para reconocer los objetos manipulados según el principio de la figura 3.

Por otra parte, los numerosos sensores de proximidad, tales como los diodos electroluminiscentes y dispositivos fluidicos, son utilizados para analizar a distancia objetos colocados entre los dedos del manipulador. Este tipo de sensores han sido realizados bajo la forma de matrices, aunque algunas veces presentan ciertas insuficiencias a los impactos, siendo peligroso para los manipuladores que trabajan en ambientes industriales pesados (figura 4).

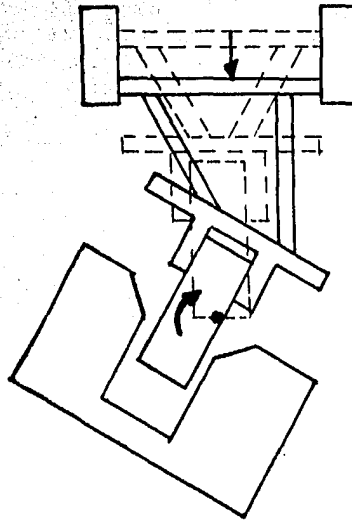
Existen comercialmente una gran variedad de sensores de proximidad, tales como : efectos foto-eléctricos, capacitivos, electromagnéticos, ultrasónicos y de radio frecuencia.

De los sensores mencionados anteriormente, el de efecto foto-eléctrico es el que presenta mayores ventajas; bajas dimensiones de las fuentes electroluminiscentes y fotoreceptoras, además de grandes velocidades de respuesta. El sensor electro-óptico de interrupción de haz infrarrojo, ha sido utilizado durante mucho tiempo en el área industrial y actualmente se esta utilizando en el área de robótica industrial. Este tipo de sensor esta compuesto de un diodo electroluminiscente y de un fotodiodo o de un fototransistor, mostrado en la figura 5.

Algunos investigadores han utilizado una serie de sensores para guiar la mano del robot a lo largo de la trayectoria de trabajo; en este caso, es indispensable realizar un montaje óptico que elimine la influencia del coeficiente de reflexión de la superficie del objeto, con el fin de obtener una información única sobre la distancia que separa al manipulador del objeto.



FALLA LINEAL



FALLA ANGULAR

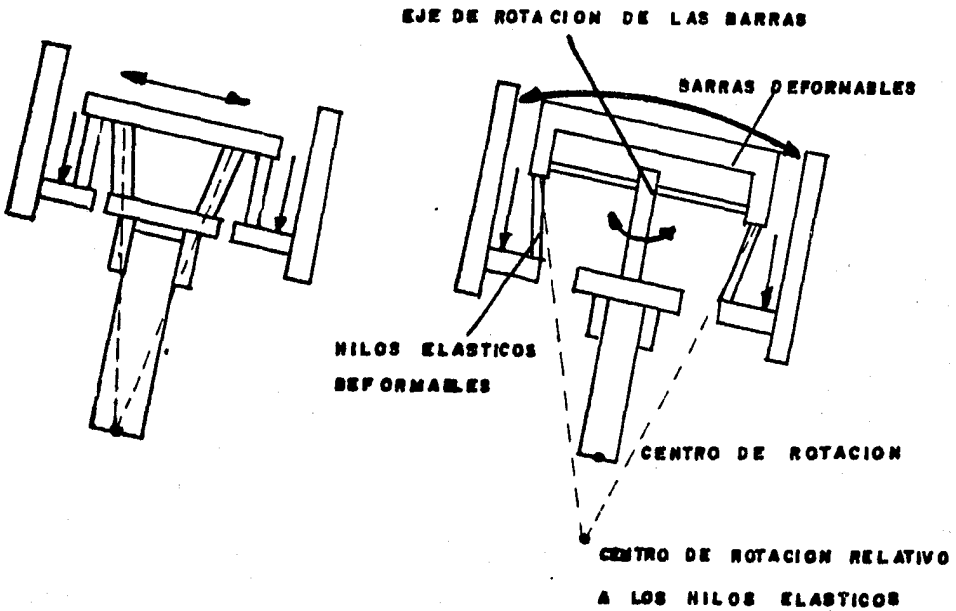


FIG. 3 RECONOCIMIENTO DE OBJETOS POR MEDIO DE INFORMACION TACTIL

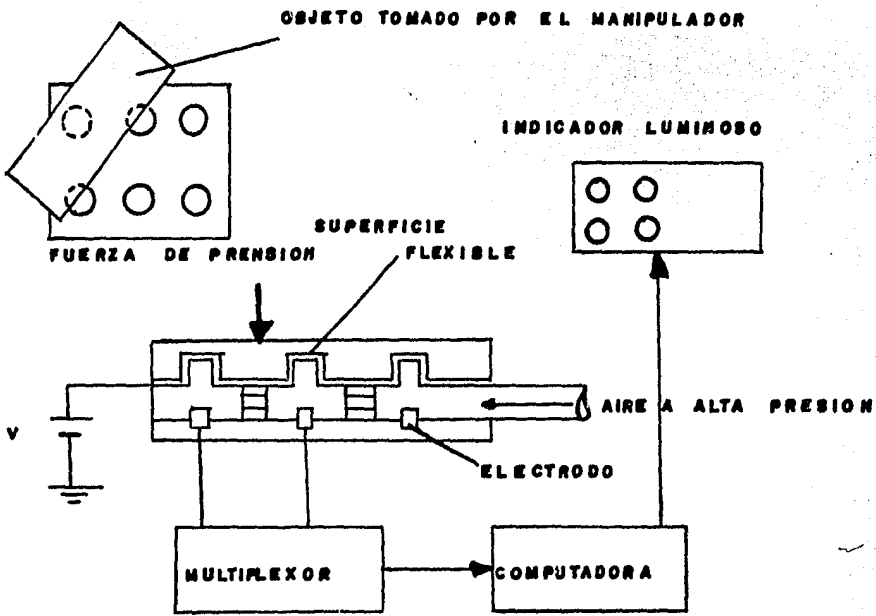


FIG. 4 SENSOR TACTIL NEUMATICO

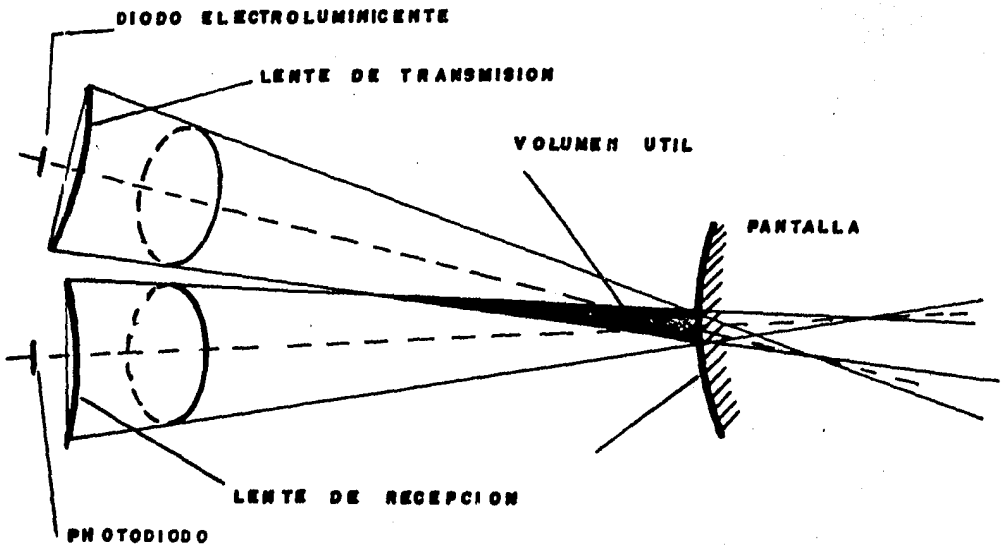


FIG 5 SENSOR ELECTRO-OPTICO DE PROXIMIDAD

De esta manera, en un montaje de laboratorio, un diodo ilumina la superficie del objeto tratado, mientras que la luz re-enviada por este dispositivo es captada por una matriz de foto-elementos independientes entre sí, a fin de eliminar las señales parásitas provenientes de la luz ambiental; la fuente emite impulsos infrarrojos y la medición es ejecutada en dos etapas: primero, cuando la fuente funciona y emite la señal, y después cuando deja de funcionar; la diferencia entre las dos señales recibidas por cada uno de los sensores proporcionan la información referente a la presencia de un objeto, así como la distancia del dispositivo hacia el manipulador (figura 6 y 7).

Por razones económicas, el manipulador deberá desplazarse a grandes velocidades lo que implica grandes riesgos de colisión. El sensor de proximidad deberá estar provisto de un sistema de telemetría que permita al robot evaluar la distancia entre su posición y el punto de consigna por alcanzar.

De una manera general, se puede decir que la utilización de este tipo de sensores (de proximidad), esta asociada a un sistema de reconocimiento de formas, además de poder utilizarlos en otras operaciones, tales como la inspección visual para el control de calidad (figura 8).

2.4.3.- Telepercepción

Una de las ventajas que se persigue al utilizar los sistemas de telepercepción en los robots industriales es la de facilitar la enseñanza de tareas de mayor complejidad, además de permitir el uso de sistemas de control más sencillos que los sistemas pre-programados.

El proceso de telepercepción o percepción remota se puede dividir, dependiendo del tipo de sistema implementado y cuya clasificación permite presentar las herramientas analíticas disponibles para resolver los problemas que se presentan en este campo de aplicación, en las siguientes áreas:

- Detección.- esta etapa comprende la adquisición de información sobre la distribución espacial de alguna variable física (generalmente información visual) su discretización y su memorización, con el objeto de mantenerla disponible para procesamiento digitales posteriores. Los sensores más comúnmente utilizados son las cámaras de video (ortoscopia y vidicon), los arreglos de fotodiodos de estado sólido y las cámaras de CCD ("charged coupled devices").

Los sensores de fotodiodos se utilizan en los casos en que la escena, que constituye la futura imagen, posee un movimiento uniforme y continuo respecto al sensor, como en el caso de las bandas transportadoras.

La configuración del sistema empleado en la adquisición de imágenes así como la iluminación de la escena a visualizar, determinan la complejidad de los algoritmos de segmentación y recono-

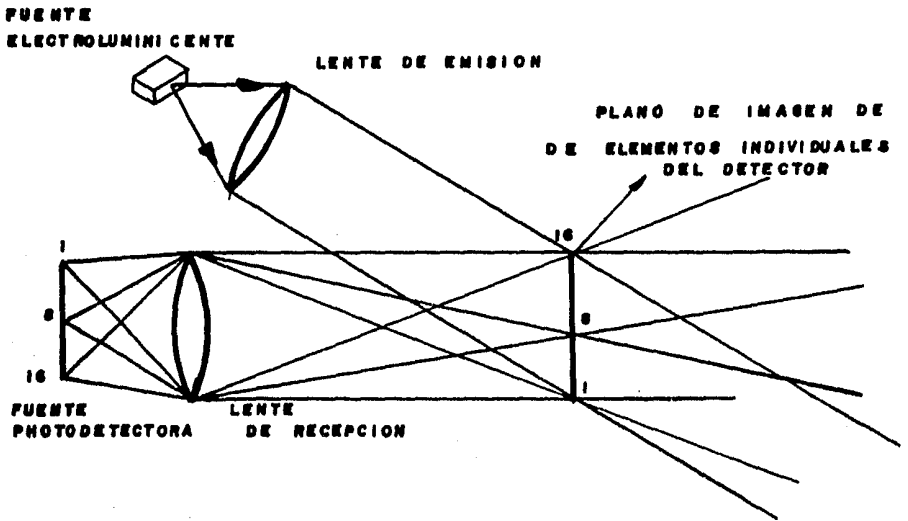
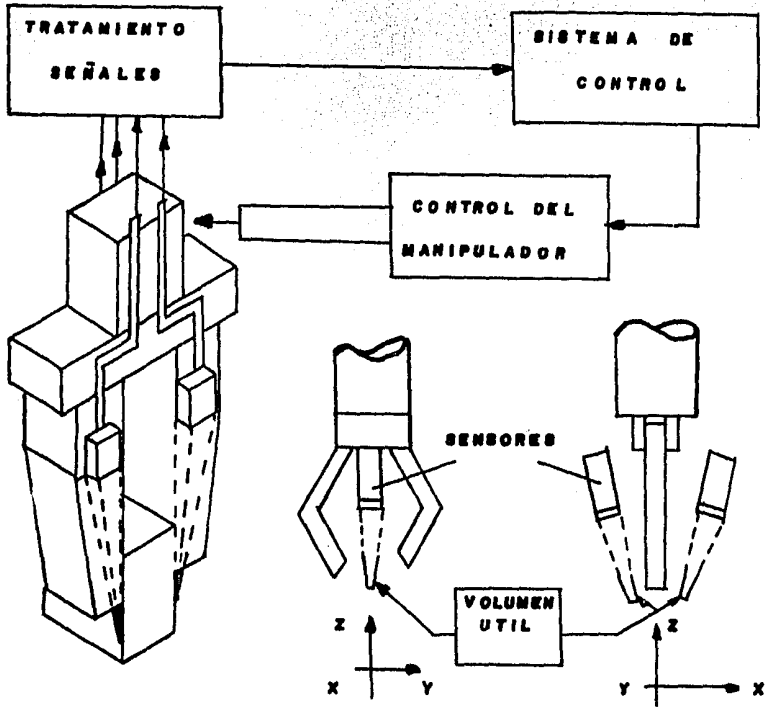


FIG. 6,7 DETECCION DE OBJETOS POR MEDIOS OPTICOS

cimiento de objetos. Por esta razón es importante diseñar un sistema adecuado de iluminación para evitar la generación de imágenes de bajo contraste, sombras y detalles extraños; además de minimizar la complejidad de la imagen resultante, con el fin de realizar de la mejor manera, las tareas de inspección y de manipulación.

En la mayoría de los esquemas utilizados en los sistemas de iluminación (difusa, posterior, modulación espacial y direccional) la fuente luminosa más utilizada es el laser por su intensidad luminosa, coherencia direccional, monocromía y bajo consumo de energía, en comparación con las fuentes ordinarias.

- Segmentación .- el proceso de segmentación consiste en descomponer una escena en sus partes constitutivas, es decir, extraer los objetos que la componen. Los algoritmos de segmentación utilizados hasta ahora, están basados en el principio de discontinuidad o en el de similaridad. Entre los algoritmos basados en el principio de discontinuidad, se encuentra el denominado detección de aristas, que consiste en identificar la frontera entre 2 regiones de una imagen que poseen características diferentes (intensidad luminosa, textura, color, etc.) y uniformes.

En particular, el contorno de los objetos contienen información esencial sobre su forma, posición, orientación, extensión y número de ellos. Por esta razón, la extracción de contornos ha tenido un papel preponderante como técnica de proceso en el reconocimiento de formas y la interpretación automática de imágenes.

Uno de los enfoques más utilizados para la segmentación de imágenes, basado en el principio de similaridad, es el proceso por umbral, siendo el más utilizado en aplicaciones industriales de percepción visual por computadora. Su mayor utilización se debe principalmente a que las técnicas de umbral (en su forma más sencilla) son rápidas y fáciles de implementar en hardware, además de que en las aplicaciones industriales, tanto la iluminación como el medio ambiente en que se encuentran los objetos a segmentar, constituyen un factor controlable, lo que permite la obtención de imágenes fácilmente discretizables en alguna propiedad fotométrica (como intensidad luminosa).

- Descripción .- el problema de la descripción consiste en extraer características representativas de una pieza, con el fin de poder lograr una identificación posterior. Teóricamente, estas características deben ser especialmente invariantes, es decir, ser independientes de la posición y orientación del objeto. Por otra parte, estas características deben describir de una manera precisa, el objeto a identificar con el fin de evitar toda posible ambigüedad en la identificación.

Este proceso se lleva a cabo mediante dispositivos llamados descriptores, los cuales están basados principalmente en información de forma y amplitud de señal. Los descriptores de forma es

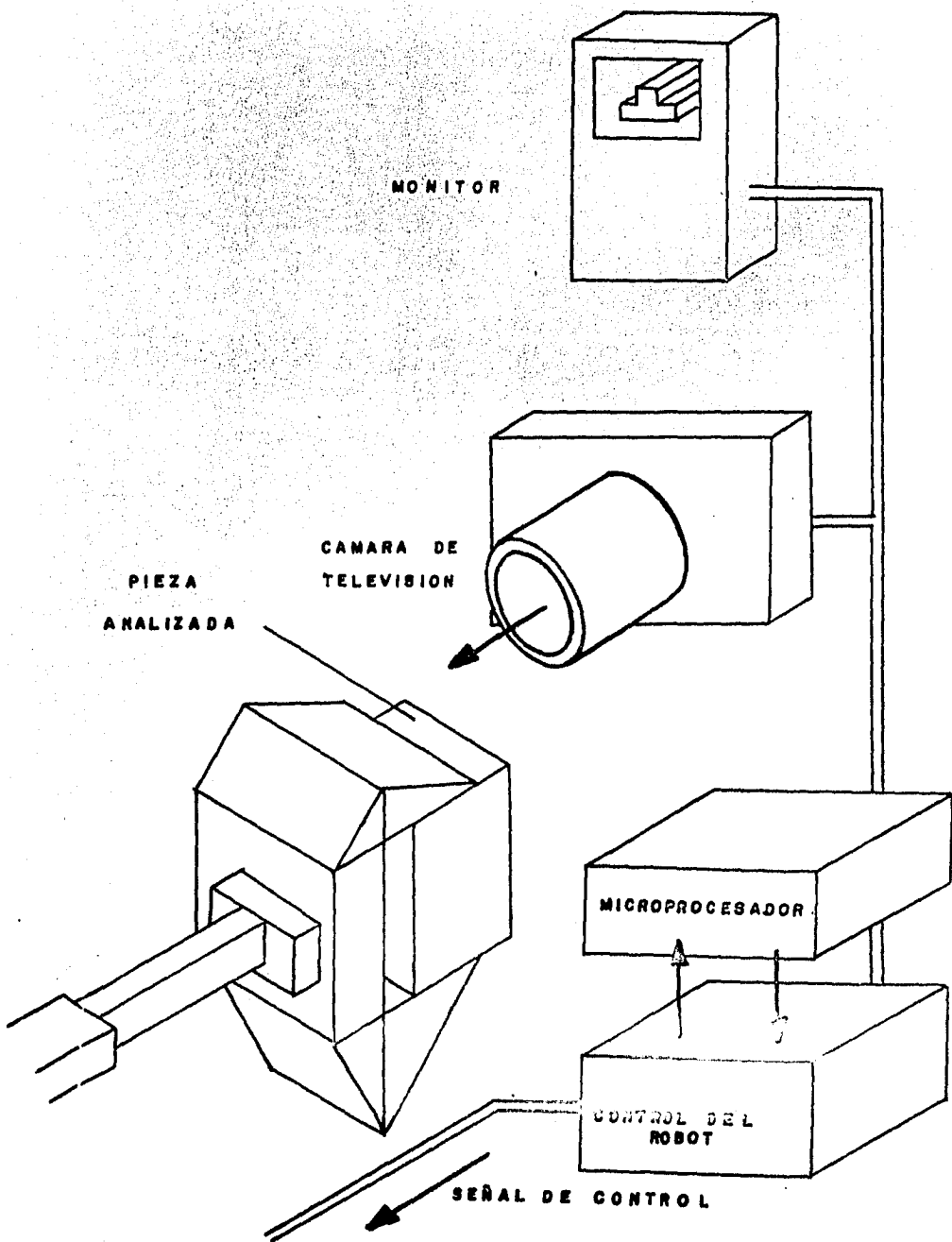


FIG. 8 SISTEMA DE INSPECCION VISUAL PARA EL CONTROL DE CALIDAD

tan diseñados para capturar propiedades geométricas del objeto a manipular (perímetro, cuadrado del área, propiedades topológicas, etc.).

- Reconocimiento .- el reconocimiento consiste básicamente en asignar etiquetas y cuya función de los algoritmos es la de identificar cada objeto segmentado y asociarles un identificador (por ejemplo, tuerca, tornillo, junta, etc.). El proceso de reconocimiento, comprende el aspecto de la representación de patrones, que implica la elección de una representación y el de toma de decisiones o medida de similitud. Los distintos métodos propuestos para el diseño de sistemas de reconocimiento pueden ser agrupados en 3 categorías : el de patrón de referencia, el de discriminante y el sintáctico y estructural.

Los trabajos concernientes a los procedimientos de reconocimiento de objetos, se pueden clasificar en 2 grupos : investigación técnica, que comprende el reconocimiento de formas, clasificación, tratamiento de imágenes, métodos de aprendizaje, análisis de datos; la investigación aplicada enfocada a resolver los problemas ligados a la utilización de sensores en el campo de la robótica industrial.

Los primeros robots utilizados para el reconocimiento de formas, utilizaban cámaras de televisión, las cuales registraban la imagen de la escena o del objeto a manipular, midiendo las intensidades luminosas y transformando la imagen en una matriz de elementos-imágenes o elementos fotográficos, para ser tratados posteriormente por sistemas computarizados.

Para lograr que un robot provisto de PERCEPCION SENSORIAL pueda ejecutar correctamente sus funciones, es necesario elaborar una estrategia que permita controlarlo mediante la utilización de la computadora ; en la medida que se requiera, la computadora permitira realizar una serie de tareas complejas con una gran persición y en el mínimo de tiempo, sin utilizar la energía humana.

Por otra parte, la experiencia acumulada por el operador humano es difícilmente transmisible a otra persona, mientras que una estrategia de control por computadora puede memorizarse y utilizarse indefinidamente inclusive por otra computadora y en otro lugar.

Es decir, la computadora permite al robot ejecutar una serie de tareas diferentes, realizando simplemente los cambios necesarios en los programas de instrucciones, confirmando con esto, la "versatilidad" y la "adaptabilidad" del robot a los sistemas productivos.

2.5.- INTELIGENCIA ARTIFICIAL
=====

2.5.- I N T E L I G E N C I A A R T I F I C I A L

La Robótica Industrial, disciplina técnica y científica, se ha visto favorecida en el transcurso de los últimos 10 años, con el desarrollo de dos nuevas áreas de investigación, la INTELIGENCIA ARTIFICIAL y la AUTOMATIZACION INDUSTRIAL.

La primera tiene en la robótica un campo de estudio bastante amplio y adecuado para la elaboración y experimentación de sus modelos. Se interesa en la construcción de máquinas capaces de interactuar con su medio ambiente físico de una manera relativamente autónoma, es decir siguiendo una secuencia de acciones explícitamente programadas.

Entre los principales puntos de investigación podemos citar la formación y ejecución de planes de acción, se trata de proporcionar a los robots, la capacidad de decidir por sí mismos de las acciones a realizar y de controlar la ejecución de las mismas y la percepción, principalmente la visión artificial, para permitirles "comprender" las características del medio ambiente de trabajo.

El estudio de los procesos elementales subyacentes al comportamiento inteligente de los robots es uno de los objetivos fundamentales de la inteligencia artificial (IA); así mismo, los modelos de toma de decisiones y de percepción han sido elaborados y diseñados en los robots para proporcionarles la capacidad física de manipulación rudimentaria, además de operar en universos simplificados.

Por su parte, la automatización industrial tiene en la robótica un medio de satisfacer las necesidades socio-económicas que cada día se presentan más debido a la supresión de puestos de trabajo repetitivos, penosos o peligrosos, logrando con esto, incrementos notables en la productividad.

La automatización industrial se encarga de integrar a los sistemas productivos, los robots industriales o manipuladores programables que se distinguen de los mecanismos automáticos especializados clásicos, ya que pueden ejecutar una cierta variedad de tareas, diferentes unas de las otras.

Generalmente se ha buscado automatizar aquellas tareas que no requieren de una secuencia de operaciones variada; sin embargo, los mayores esfuerzos han sido encaminados sobre los aspectos mecánicos de los robots así como los relacionados al control y utilización de los sensores.

Estos dos últimos aspectos permanecen muy poco desarrollados dentro del área de la robótica industrial. Estas dos áreas de investigación fueron desarrolladas de una manera independiente y con motivos iniciales de naturaleza muy diferente.

Sin embargo, en la actualidad se ha observado una cierta convergencia entre ambas: por una parte, los laboratorios de investigación interesados en robótica industrial han sido formados dentro de muchos laboratorios de Inteligencia Artificial en diferentes países; por otra parte, el término "robot inteligente" se ha utilizado con mayor frecuencia en el área de la Robótica Industrial.

Se puede demostrar que los objetivos de los trabajos realizados en I.A. pueden contribuir a comprender el campo de aplicación de los robots industriales.

Hace aproximadamente 15 años que la I.A. apareció como un conjunto de ideas y de realizaciones. Esto no es de asombrarse ya que la "inteligencia" es un concepto intuitivo, que de alguna manera la I.A. pretende hacer explícito.

La I.A. se interesa en los modelos de tratamiento de información que, una vez expresado bajo la forma de programas, permite a la computadora realizar una determinada tarea, por ejemplo, diagnosticar enfermedades, controlar un robot, etc., cuyo comportamiento calificado de inteligente, se podría comparar con la del ser humano.

Estos modelos permiten manejar temas como resolución de problemas percepción, comprensión de lenguajes, representación de conocimientos y aprendizaje.

Los dos objetivos fundamentales de la I.A. se pueden considerar como un objetivo único: identificar los principios subsecuentes de la "inteligencia", así como un objetivo aplicado: proporcionar a la computadora una mayor utilización.

El primer objetivo proporcionó temas de investigación durante los años sesentas, además de conducir a seleccionar ejemplos de trabajos que se realizan en universos relativamente abstractos: juegos, demostraciones de teoremas, cálculo simbólico, etc. Estas investigaciones contribuyeron a definir los modelos de resolución de problemas fundados sobre métodos heurísticos.

A partir de 1970, la necesidad de demostrar la utilidad práctica de la I.A. y de los progresos en la área de la informática, condujo a encaminar las investigaciones para buscar ejemplos de aplicación en el mundo real: química, análisis de circuitos eléctricos, concepción de máquinas eléctricas, prospección geológica, diagnósticos médicos, etc. Los sistemas que se obtuvieron de estas investigaciones son capaces no solamente de enfrentar situaciones de análisis combinatorio muy complejos, sino también de utilizar grandes cantidades de conocimientos de naturaleza diversa, científicos o pragmáticos representados bajo la forma de reglas de inferencia, redes o procedimientos.

La I.A. se puede considerar como la combinación de una serie de técnicas, ya sea con ejemplos de trabajo que demuestren la necesidad de modelizar los casos en estudio o ya sea con ejemplos de aplicación sobre los cuales se puedan aplicar los modelos pre-existentes.

La robótica industrial se puede considerar como una fuente inagotable de ejemplos de trabajo y de aplicaciones para la I.A.; ejemplos que parten de la noción de que el robot es una máquina que es capaz de interactuar con su medio ambiente de trabajo.

De esta manera, la robótica ocupa un lugar preponderante en el campo de la I.A. : la creación de una máquina que posea la imagen del hombre, ha sido siempre un tema fascinante y de controversia.

Otra razón más técnica es que la robótica representa una combinación única de potencialidades atrayentes para la investigación en el campo de la I.A.

Un robot inteligente forma un sistema dentro de la I.A. de los más completos que se puedan imaginar en la actualidad. Posee capacidades intelectuales y cognitivas variadas : resolución de problemas, aprendizaje, percepción, etc. Además, la robótica ofrece la posibilidad de integrar una mayor cantidad de modelos en una misma realización, mientras que la ganancia en envoltorio de trabajo, garantiza en parte, la generalidad de los modelos utilizados.

Es decir, cuando un sistema de inteligencia artificial recibe todos estos conocimientos de parte del usuario, sin interactuar directamente con el medio de trabajo, es difícil determinar intuitivamente la parte del esfuerzo intelectual utilizado por el usuario para describir dichos conocimientos.

El hecho de que un robot pueda interactuar con su medio ambiente, determina la representación de los conocimientos anteriores sobre este medio ambiente de trabajo en su verdadera perspectiva : un robot puede poseer una representación de su universo, utilizable por sus modelos de razonamiento y debe ser capaz de interpretar la información obtenida por sus sensores, en términos de esta representación.

Estas potencialidades de la I.A. han motivado la creación de una gran cantidad de trabajos sobre robótica industrial que se pueden agrupar aproximadamente en dos grupos : control de robots y visión artificial por computadora. En cada uno de estos trabajos se puede percibir la dualidad entre los dos objetivos fundamentales de la I.A.

El control de los robots ha dado lugar a su vez, a la realización de trabajos de investigación muy diferentes : la generación de planes de acción, que permite al robot poder tomar decisiones durante la ejecución de una tarea dada, em función de los objetivos de realización; la segunda corresponde a los lenguajes de programación, los cuales han permitido obtener los medios suficientes para describir la manera más eficiente de realizar una tarea.

Los trabajos realizados sobre generación de planes de acción son fundamentales para el desarrollo de la I.A., aunque su interés es limitado a corto plazo para la robótica industrial.

Por otro lado, los trabajos relacionados con los lenguajes de programación representan un interés práctico más evidente, aunque no pertenezcan mucho al campo de aplicación de la I.A.

Los trabajos realizados sobre visión artificial por medio de computadora realizados en el campo de la I.A. no están restringidos al campo de la robótica, pero sin duda es en este campo en donde se encuentran más desarrollados.

En estos trabajos se ha pretendido proporcionar al robot, los elementos necesarios para percibir su medio ambiente de trabajo, con la ayuda de cámaras de televisión.

Hasta hace poco tiempo, la I.A. ha sido la única disciplina interesada verdaderamente en el control de los manipuladores por computadora y en el utilización de sensores sofisticados para lograr la ejecución de tareas más complejas.

La tecnología de la robótica industrial es el resultado de investigaciones realizadas en el campo de la energía nuclear a partir del diseño de manipuladores para el manejo de materiales radioactivos, así como de los conceptos fundamentales de las máquinas herramientas de control numérico: hasta la fecha, la robótica industrial se ha desarrollado principalmente en el marco de la automatización de tareas de producción en serie, teniendo en consideración secuencias simples de operación como carga-descarga de hornos, prensas, máquinas herramientas; aplicación de diversos materiales por aspersión, etc.

El nivel tecnológico actual de estas operaciones, es el resultado de una evolución natural y continua de las características de funcionamiento de los robots (velocidades, exactitud, amplitud de movimiento, etc.), mayor utilización de mejores métodos de programación, aplicación de sistemas sensoriales, etc.

En base a lo anterior, se puede pensar que la robótica industrial se orientará hacia la automatización de tareas que requieran secuencias de operaciones más complejas. Una de estas aplicaciones, de las más prometedoras, es el montaje o ensamblado mecánico en pequeñas series, que requieren actualmente de una cantidad importante de mano de obra.

Este desarrollo irá acompañado de un aumento de la información a manejar y de la utilización de sensores sofisticados: cámaras, láser, sensores de fuerza, etc.. Por otra parte, la computadora será indispensable, no solamente para controlar las secuencias de operación a ejecutar, sino también para interpretar los datos obtenidos a partir de los sensores.

En la actualidad se han desarrollado ciertos trabajos experimentales en el área de ensamblado, como en el caso de las compañías Olivetti para el ensamblado parcial de máquinas de escribir; Kawasaki para motores de motocicletas; Volvo para ensamblar monobloques; General Motors para el ensamblado de ruedas aun automóvil, utilizando una cámara para alinear los ejes roscados y los orificios. Una de las aplicaciones más espectaculares es la realizada por la compañía Hitachi, que corresponde al ensamblado de aspiradoras con la ayuda de un sistema compuesto de 2 manipuladores con 8 grados de libertad cada uno, 8 cámaras y dos computadoras.

Con respecto a la automatización de tareas simples tales como la transferencia de piezas, también se ha notado un crecimiento en la utilización de computadoras y sensores, teniendo en consideración la gran flexibilidad que se requiere para ciertas operaciones. De esta manera, se ha observado que a partir de 1980, la informática ha representado aproximadamente el 50% de los costos en robótica industrial, en comparación al 20% que representaban en 1977.

A pesar de que los sensores visuales como la cámara de televisión ofrecen ventajas importantes para el desarrollo de la robótica industrial ya que trabajan a distancia y permiten obtener una visión global de la situación de trabajo presentan algunas dificultades. Su utilización genera grandes cantidades de datos mal estructurados de la información que se pretende manejar, por ejemplo, la posición de un agujero en una pieza, de la cual solamente una parte es interesante para la ejecución de la tarea.

Más aún, los programas que manejan estos datos deben poseer a priori, los conocimientos necesarios sobre los objetos a reconocer y de los cuales se desea determinar su posición.

Si se desea que estos programas tengan una cierta generalidad para poder ser utilizados por cualquier usuario, es necesario proporcionarles una interfaz de control para describir de una manera interactiva, los conocimientos que se requieran.

2.5.1.- Generación de Planes de Acción.

La ventaja principal de un robot sobre cualquier máquina automática especializada es que el robot puede ser utilizado para ejecutar una gran variedad de tareas, ventaja que le permite ser competitivo en el marco de la producción de pequeñas y medianas empresas, desde el punto de vista de volúmenes de producción.

Se sobre entiende que la puesta en marcha de un robot, para ejecutar una tarea nueva, se realiza en un tiempo muy breve. Los problemas que surgen en la ejecución de estas tareas, están relacionados con la programación y manejo de información obtenida de los sensores; problemas que deben ser resueltos para lograr el desarrollo de la robótica industrial y extender su dominio de aplicación a tareas complejas como la soldadura eléctrica y el ensamblado.

La principal contribución de la I.A a la robótica industrial es la de proporcionar las herramientas necesarias para resolver los problemas descritos anteriormente.

La generación de planes de acción, tema de investigación clásico de la I.A, se encarga principalmente del control de los manipuladores.

Su objetivo principal es el de proporcionar al robot, los medios necesarios para tomar decisiones por sí mismos, con respecto a la ejecución de acciones físicas para lograr los objetivos formulados por un agente externo, generalmente se trata de un operador humano. Estos medios consisten esencialmente en un programa de re

solución de problemas, llamado generador de planes de acción, - complementado por algún otro problema para controlar la ejecución de los planes generados.

El programa generador de planes de acción deberá tener un cierto conocimiento de las acciones de que es capaz de ejecutar el robot así como de las características del universo físico en el cual se desenvolverá: topología, propiedades de los objetos, amplitud de movimientos, etc.

Estos conocimientos pueden ser obtenidos a partir de la interpretación de datos transmitidos por los sensores y/o por un proceso de aprendizaje previo.

El generador de planes de acción se utiliza como un modelo de simulación para determinar el encadenamiento de las acciones a seguir llamado plan de acción, el cual permite al robot alcanzar los objetivos deseados.

Como toda representación, los conocimientos de que dispone el generador de planes de acción, son frecuentemente incompletos y parcialmente erróneos: por ejemplo, ciertos objetos colocados en el área de trabajo pueden ser desplazados por algún agente externo al robot, sin que este perciba dicho desplazamiento. De esta manera, es muy posible que la ejecución de un plan generado con conocimientos erróneos, origine trastornos en el desenvolvimiento del robot.

Teniendo en consideración este contratiempo, será necesario utilizar otro programa para verificar cada acción que deba realizar el robot y que su ejecución cumpla de un era satisfactoria los objetivos para los cuales fue creada.

En el caso contrario, el generador de planes de acción deberá de intervenir nuevamente para modificar la parte aún no ejecutada, - teniendo en cuenta los incidentes presentados durante la ejecución de la tarea.

La generación de planes de acción ha dado lugar a la realización de numerosos programas y hasta la actualidad este tema, ha servido de pretexto para estudiar los aspectos fundamentales en la resolución de problemas que requieran de un razonamiento de las acciones y de sus efectos.

Considerando por ejemplo la representación de acciones de un robot y de su universo, el razonamiento por abstracciones sucesivas al tratamiento simultáneo de objetivos interdependientes (cuando un objetivo puede ser descompuesto en sub-objetivos más elementales, los cuales no siempre son posible de satisfacerlos simultáneamente, se pueden ejecutar en cualquier orden), la generación de planes de acción que contienen acciones que pueden ser ejecutadas paralelamente y de planes iterativos y finalmente el aprendizaje de métodos.

Los programas realizados bajo estas características, constituyen el objetivo fundamental de la I.A. aunque algunas pueden ser compatibles con la robótica industrial, como:

- trabajan a un alto nivel de abstracción lógica, en el cual se considera concentrada la inteligencia. De esta manera, realizan su solución ignorando parámetros tales como dimensiones de los objetos manipulados y las fuerzas ejercidas sobre ellos.

En robótica industrial, la consideración de estos parámetros podría influenciar notablemente en la formación de planes de acción. Si se considera el campo de la I.A. limitado a la generación de planes de acción, se puede considerar como de poco interés para la robótica industrial.

Sin embargo, esta consideración es errónea ya que las características no hacen más que reflejar el hecho de que el problema de la generación de planes de acción, no han sido aún puestos en marcha de una manera más práctica.

De esta manera, es necesario apoyarse en lenguaje de programación para redefinir en términos más realistas la generación de planes de acción.

En esta nueva perspectiva, la creación en ciertos modelos apoyados en programas de computación realizados en I.A. pueden ser utilizados en el campo de la Robótica industrial.

5.2.- Visión Artificial

El objetivo de las investigaciones realizadas en el campo de la visión artificial, es el de proporcionar al robot la capacidad de analizar las imágenes que percibe en su medio ambiente de trabajo y poder identificar formas, colores, posiciones y orientaciones de determinados objetos, con el fin de poder realizar, de una manera satisfactoria tareas tales como la inspección y el ensamblado.

Los primeros robots utilizados para la ejecución de estas tareas utilizaban cámaras de televisión, las cuales registraban la imagen de la escena o del objeto a examinar, midiendo las intensidades luminosas y transformando la imagen en un matriz de elementos imágenes o elementos fotográficos, los cuales son tratados posteriormente por sistemas computarizados.

¿ En que consiste la visión artificial ? Un órgano de visión artificial consiste básicamente de un analizador de modelos y de un dispositivo de reconocimiento de formas: el analizador genera un modelo correspondiente a la imagen que pretende analizar, el cual posee una descripción de esta imagen, en la cual figuran las relaciones espaciales entre los diversos componentes de ésta imagen.

Una vez realizado lo anterior, el dispositivo de reconocimiento, analiza el modelo generado, con el fin de determinar la presencia de tal o cual componente.

Posteriormente, la imagen a analizar es digitalizada por medio de una cámara y la información binaria obtenida es almacenada bajo la forma de una matriz de números enteros; el valor de cada elemento de esta matriz representa una medida de la intensidad luminosa - promedio de la fracción de imagen que representa; la fracción "mo delizada" representa un elemento-imagen o pixel, (contracción - - "picture element").

La precisión que se obtenga de la imagen digitalizada, dependerá de la resolución espacial y por la resolución del nivel de gris.

El primero de estos parámetros está ligado a las características de la cámara; un valor típico del nivel de resolución espacial es de 128 x 128 puntos de muestreo por imagen. El segundo parámetro corresponde al número de niveles distintos que cuantifican los valores analógicos de la intensidad luminosa: en general, se consideran 16 niveles de gris, lo que requiere el almacenamiento de 4 bits por pixel.

Una imagen digital puede ser simplificada, en el momento de convertirla a imagen binaria: todo elemento de la imagen cuya intensidad luminosa es superior a un umbral, es considerado como blanco; los elementos de imagen cuya intensidad sea inferior a este umbral serán considerados como negros.

Una gran cantidad de esta información se pierde en el momento de esta conversión; sin embargo, si se selecciona un umbral adecuado es posible obtener una imagen aceptable.

Los procesos de división de una imagen digital en grupos contiguos de pixels correlacionados entre sí se denominan procesos de segmentación. La discretización de una imagen sirve de base para transformar la imagen binaria en una lista de regiones con sus propiedades locales, coordenadas y superficies. Las regiones generadas a partir de este procedimiento, son clasificadas por tamaño y por posición. La distribución de estas regiones es determinada de tal manera que es posible localizar rápidamente una de la otra, dentro de una zona de la imagen original.

Posteriormente, un intérprete ejecuta el programa de reconocimiento de la imagen. La validez de la solución obtenida a partir de este procedimiento dependerá de un coeficiente de confianza.

La ejecución normal de este intérprete se ve interrumpida cuando, en una cierta región, es insuficiente el valor de este parámetro, siendo necesario regresarse y volver a analizar la imagen.

Finalmente, el sistema de visión artificial genera una lista de componentes que responden a las interrogaciones propuestas por el dispositivo de reconocimiento, así como las regiones de la imagen asociadas a dichas componentes. Esta información sirve para controlar el movimiento del brazo del robot hacia el objeto que deberá de manipular.

Actualmente existen varios laboratorios de investigación dedicados al estudio de los procesos de control de los robots provistos de sensores visuales, con el fin de que sean capaces de tomar, orientar y transportar los objetos de trabajo.

Tal es el caso del grupo de investigación sobre robótica industrial de la Universidad de Rhode Island, que se encuentra estudiando el problema de la alimentación a máquinas-herramientas, realizada por un robot provisto de visión artificial. Este robot debe tomar una pieza colocada en un cesto, orientarla convenientemente y efectuar la alimentación. Estos experimentos se han realizado utilizando un manipulador con 6 grados de libertad equipado con dos cámaras de televisión.

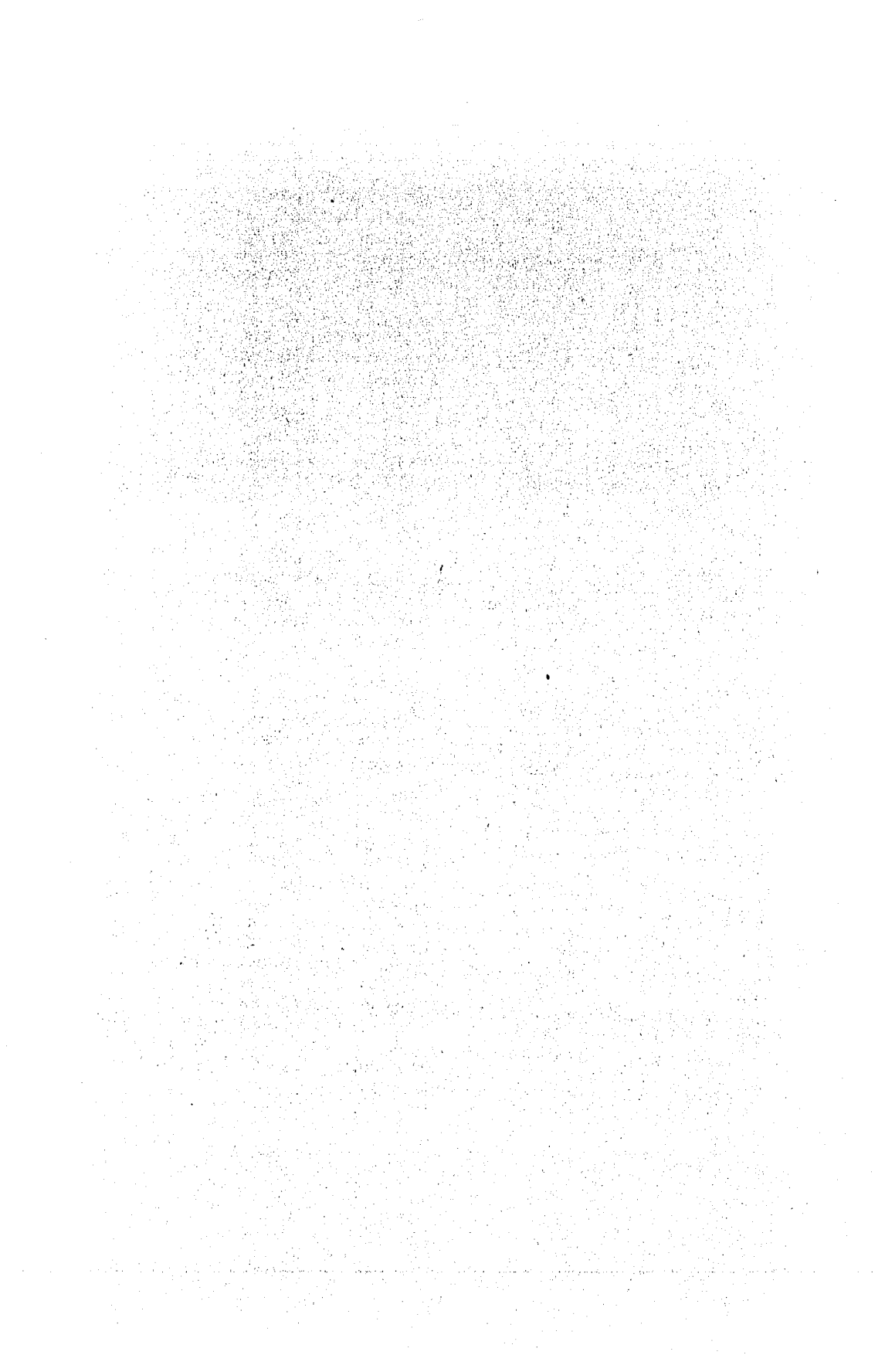
Paralelamente a estas investigaciones, la General Motors desarrolló un sistema de visión artificial llamado Consight-1 utilizado para el control de circuitos electrónicos empleados en los dispositivos de iluminación de los automóviles. Este sistema determinaba en principio, la orientación de los circuitos, estudiando los contornos y comparándolos con patrones de referencia. Una de las principales desventajas que presentaba este sistema era que no permitía más que el reconocimiento de un solo tipo de formas, siendo un impedimento para ser utilizado en la industria automotriz, dada la variedad de piezas que se manejan.

De esta manera, se desarrolló un sistema más elaborado, el Consight-2, el cual permite localizar una pieza determinada dentro de un ensamble mecánico cualquiera; por ejemplo, una biela dentro de una cadena cinemática, aunque estuviera mal iluminada, mal contrastada o simplemente parcialmente visible.

Paradójicamente, fue una compañía pequeña la que comercializó el primer robot con visión artificial: Auto-Place Inc. Este robot estaba integrado a dos cámaras de televisión y a una micro-computadora para permitirle "ver" lo que estaba ejecutando y tomar decisiones después de haber analizado dicha ejecución.

Para lograr esto, Auto-Place realizó un experimento durante el cual, el robot debería seleccionar las cartas de una baraja: el sistema visual evaluaba la superficie de la carta con el fin de determinar que figura tenía, comparandola con las registradas en la memoria de la computadora, para posteriormente separarlas y colocarlas en uno de 4 grupos diferentes; si una carta era colocada al revés, el robot la volteaba y realizaba el análisis anterior; si después de analizar 2 veces la misma carta, no podía identificarla, la retiraba de las demás, para seguir con su análisis.

Evaluando los trabajos de investigación descritos anteriormente, se pueden determinar las grandes ventajas que se obtendrán con la utilización de los sistemas de visión artificial, para lograr una integración completa de los robots industriales a los procesos productivos de las fábricas del futuro.



II.- AREAS DE INVESTIGACION Y PERSPECTIVAS DE DESARROLLO

INDUSTRIAL EN MEXICO

En los últimos años, los progresos alcanzados por la ciencia y la tecnología han llegado a magnitudes insospechables con respecto al crecimiento y floración del ingenio humano, desarrollando en toda su plenitud la llamada Revolución Científica y Tecnológica.

En varias universidades y centros tecnológicos de los países altamente industrializados, se han empeñado, en coordinación con la industria, en desarrollar los ingenios de la automatización electrónica, presentes en todas las ramas del conocimiento humano y que ya empiezan a tomar decisiones y a "pensar" por sí mismos. Estos procesos de automatización, van desde los procesos de información en el control de los enfermos, hasta la navegación cósmica, la cibernética participa cada vez más en las actividades del ser humano.

Profesores del Instituto Max Plank de Física y Astrofísica de Munich y de la Universidad de Luisiana, midieron recientemente la intensidad de los protones primarios de las "ultraradiaciones", y profesores de la Universidad de Harvard y de la Universidad de Utrecht, identificaron ráfagas de rayos X provenientes del cúmulo NGC que se encuentra a 30 000 años luz de la tierra, formado por un millón de estrellas.

En la angustiosa batalla por la conservación del agua para satisfacer las necesidades primordiales del hombre, las universidades y centros de investigación del Cercano Oriente, han creado técnicas para producir el vital líquido por desalación de salmueras geotermales, calentadas por las rocas fundidas que se encuentran cerca de las intrusiones volcánicas de la corteza terrestre.

En química, la Universidad de Columbia Británica, esta perfeccionando los métodos para la síntesis de las macromoléculas orgánicas a partir de hidrocarburos simples no saturados, por medio de la polimerización catalítica, y de esta manera, la petroquímica posee ahora más de 30 000 productos del más preciado valor, derivados del petróleo.

Un grupo de investigación sobre Robótica Industrial de la Universidad de Rhode Island, se encuentra estudiando el problema de la alimentación a máquinas-herramientas realizada por un robot de 6 grados de libertad, provisto de un sistema de visión artificial.

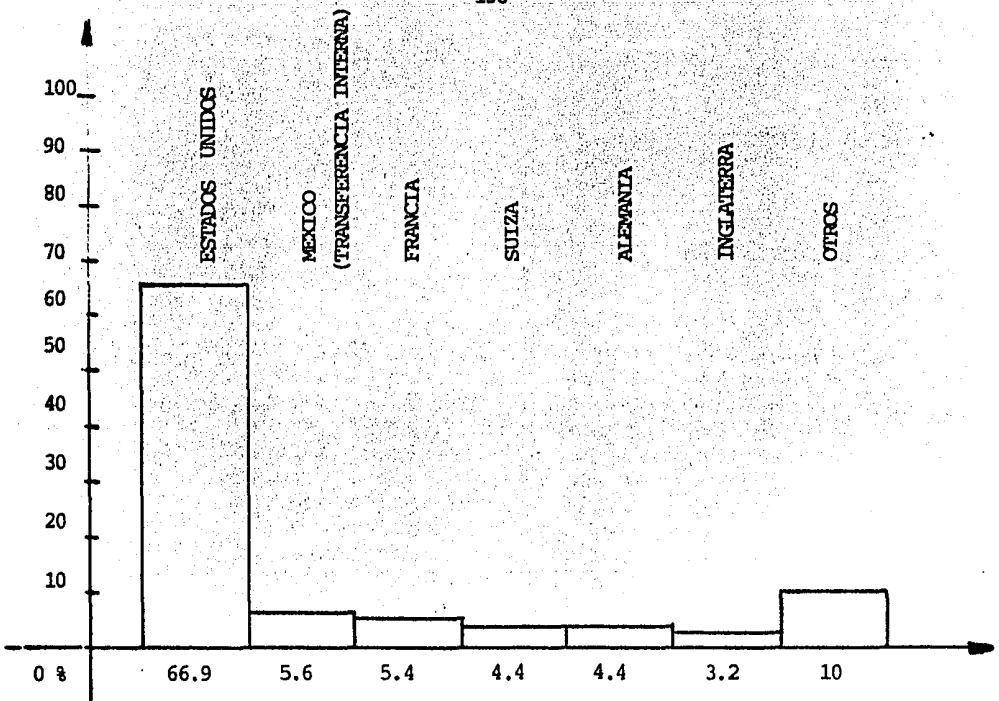
¿ Y en México ? ¿ Que aportes originales han ofrecido las universidades y los institutos técnicos ? ¿ Que descubrimientos han brindado los profesores en la ciencia, la técnica y la metodología de la investigación ?

En esta llamada Revolución Científica y Tecnológica que se esta realizando en varios países del mundo, México, en gran medida, solo ha sido espectador, ya que no ha sido capaz de desarrollar una tecnología propia que responda a las necesidades y posibilidades con que cuenta el país.

En la actualidad, la mayoría de los procesos tecnológicos que se utilizan en la planta industrial de México, se han venido incorporando a través de 3 canales principales : la importación de bienes de capital, la contratación de recursos humanos calificados necesarios para la ejecución de los proyectos, ingeniería básica, de detalle, asistencia técnica y operación de empresas. Por otra parte, esta transferencia de tecnología se ha caracterizado por su inadecuación a las condiciones locales, es decir, esta tecnología no esta sujeta a ningún proceso de adaptación interno, salvo en casos de instalación de plantas de tamaño subóptimo, dada capacidad de absorción del mercado.

Analizando la actividad empresarial en México, se observa que las empresas trasnacionales dominan las ramas tecnológicas más dinámicas y de mayor rentabilidad y son, por lo tanto, las mayores demandantes de tecnología. Esta tecnología es obtenida, en la mayoría de los casos, a través de sus casas matrices, lo que les proporciona una alta capacidad tecnológica en el aspecto productivo y mercadológico ocasionando un impacto, no siempre benéfico, en la participación de los otros sectores de la economía. Sin embargo, se puede pensar que este fenómeno, marca ciertas pautas a seguir por lo otros sectores de la economía en lo que respecta a la adquisición de tecnología, con el fin de elevar el índice de competitividad de sus empresas.

En la década de los setentas se pagaron en promedio 15 mil millones de pesos anuales en la adquisición de tecnología (1), mientras que en la actualidad esta cantidad se ha aumentado a 65 mil millones de pesos anuales (1), de los cuales el 50 % se realiza en solo 4 sectores de la economía : el farmacéutico -- (14.5 %), el de petroquímica secundaria (14%), el de equipo eléctrico-electrónico (11 %) y el de alimentos (9 %). Mucha de esta tecnología es anticuada y no se adapta a las necesidades del país, imponiendo una dependencia negativa. A continuación se presenta una tabla de los principales exportadores de tecnología a México :



México no puede permanecer al margen de esta revolución ya que la subestimación de su importancia se tendrá que pagar a un costo muy alto y probablemente no se contará con los recursos para cubrirlo, condenándose a vivir indefinidamente como simples servidores del extranjero.

Por otra parte, se ha dicho que uno de los problemas principales a los que se enfrenta México, es el de elevar el nivel de instrucción y capacitación de su población. El país requiere de trabajadores especializados que dispongan de una adecuada capacidad y formación profesional que le permita estar en condiciones de ser receptor de la tecnología moderna, adaptarla a sus necesidades y perfeccionarla. Es por esto que México requiere de un gran número de investigadores de alto nivel. En este punto, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ha dedicado sus esfuerzos en hacer que la ciencia y la tecnología de México se desarrollen más rápido, dirigiendo su apoyo a la formación de recursos humanos, ya que la escasez de investigadores de alto nivel ha sido un obstáculo muy importante en el avance científico y tecnológico del país. A continuación se presenta una tabla comparativa en la que respecta al número de investigadores con que cuenta el país: (2) :

| <u>PAIS</u> | <u>INVESTIGADORES/10000 HABITANTES</u> |
|---------------------|--|
| ARGENTINA | 5.6 |
| ESTADOS UNIDOS | 26.0 |
| RUSIA | 52.7 |
| JAPON | 48.0 |
| ALEMANIA OCCIDENTAL | 37.4 |
| MEXICO | 2.4 |

Las experiencias que deja el tiempo, revelan que bien poco es el apoyo que se da en el país a los investigadores y hombres de ciencia, primero, porque la política y la economía tienen prioridad ante la opinión pública. Pero aún, así, se han realizado en México importantes trabajos de investigación científica y tecnológica que muchas veces han rendido frutos pero que no son aprovechados talentosamente. Ha sido común que empresas trasnacionales vengan a negociar con los investigadores y se lleven las patentes o inclusive al investigador. Constancias de todo esto existen lo mismo en los archivos del Instituto Politécnico Nacional, así como en los expedientes de las universidades de todo el país.

Una manera de agrupar los diferentes trabajos de investigación científica y tecnológica que se realizan en un país para lograr su desarrollo e independencia tecnológica es considerando las siguientes categorías de organizaciones en las cuales se llevan a cabo dichos trabajos :

- 1.- Universidades y Centros de Investigación
- 2.- Industria Privada
- 3.- Gobierno

En lo que respecta a la área de Robótica Industrial, se están realizando en México varios trabajos de investigación básica en los principales centros de investigación de las universidades del país, entre los que se pueden mencionar la Universidad Autónoma de Puebla, el Instituto Tecnológico de Monterrey, la Universidad Autónoma de Guadalajara, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. (CIEA), la Universidad Metropolitana y la Universidad Nacional Autónoma de México. La finalidad de estos trabajos de investigación ha sido la de desarrollar los fundamentos necesarios que permitan el desarrollo futuro de una tecnología propia dentro del campo de la Automatización Industrial.

A continuación se presentan los trabajos realizados en 2 de los centros de investigación que pueden considerarse más importantes en cuanto a su participación en la educación superior del país, localizados en el área metropolitana : el I.P.N. y la U.N.A.M.

Lo anterior no significa que sus trabajos sean los más importan-

tes en cuanto a su nivel de desarrollo, ya que existen centros de investigación como la Universidad Autónoma de Puebla que esta realizando trabajos sobre Inteligencia Artificial bastante interesantes, así como el Instituto Tecnológico de Monterrey, en donde se esta desarrollando un manipulador industrial con 6 grados de libertad provisto de un sistema de visión artificial; lo que se ha considerado importante en la selección de estos 2 centros de investigación es que presentan patrones de desarrollo muy diferentes, proporcionando determinadas pautas a seguir para lograr la planificación dentro del desarrollo científico y tecnológico del país.

En lo que respecta al CIEA, sí cuenta con un departamento de Robótica Industrial iniciado hace aproximadamente 2 años y medio y en el cual colaboran 2 doctores en ingeniería, 3 maestros en ciencias, 4 ingenieros y 4 estudiantes de maestría; todos ellos en las áreas de aeronáutica, industrial, comunicaciones, mecánica y electrónica.

A continuación se presenta una lista de los proyectos que se han realizado hasta la fecha :

| <u>AREA</u> | <u>PROYECTO</u> |
|-------------|---|
| MECANICA | - Diseño y Construcción de Robots (brazos, manos, órganos terminales) |
| | - Cinemática (modelos geométricos y cinemáticos) |
| PERCEPCION | - Sensores de Proximidad de Rayos Infrarojos |
| | - Sensores de Posición y Velocidad |
| | - Sistema de Visión Artificial por Cámara de Televisión |
| | - Procesadores de Imágenes |
| | - Algoritmos en Computadora (contornos, seguimientos, cálculo de baricentros) |
| CONTROL | - Servos |
| | - Modelado (Esquemas de Control) |
| | - Modelos Dinámicos (Universidad de Toulouse y modelo de R.P. Paul) |
| | - Modelos Adaptables (Berkley y CIEA) |

PROGRAMACION

- Modelos Optimos
- Modelos No-lineales
- Modelo Jerárquico (CIEA)
- Programas Ejecutores
- Transformación de Coordenadas
- Intérpretes de Comandos

En base a lo anterior, ha sido posible llevar a cabo los siguientes :

- 1.- Diseño y construcción del manipulador POLEN con 3 grados de libertad, eléctrico-neumático
- 2.- Diseño y construcción del manipulador RULO con 4 grados de libertad (3 para la posición y uno para la orientación) y de accionadores eléctricos
- 3.- Sistema de visión artificial para el manipulador RULO
- 4.- Diseño y construcción de la herramienta de trabajo para el manipulador POLEN con 3 grados de libertad

El objetivo de este centro de investigación ha sido el de crear material de investigación básica que sirva de apoyo para el diseño y construcción de los mecanismos que sirvan para un desarrollo industrial futuro. Existe la posibilidad de que los trabajos que se están realizando en este centro de investigación puedan ser desarrollados por una empresa que se encuentra ubicada en Monterrey para su posible industrialización.

El Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. no cuenta con un departamento de Robótica Industrial bien establecido y con objetivos bien definidos; ya que hasta ahora se han venido realizando algunos proyectos de investigación sobre esta área, como resultado del interés particular de una sola persona. Entre los problemas a los que ha enfrentado este centro de investigación, ha sido la falta de personal capacitado e interesado, así como la poca participación del sector industrial, lo que ha reducido la posibilidad de desarrollar trabajos de investigación sobre esta área. Los proyectos que se mencionan a continuación han sido desarrollados dentro del departamento de Automatización; actualmente no existe ningún proyecto que se esté realizando en este centro de investigación :

| <u>AÑO</u> | <u>PROYECTO</u> |
|------------|---|
| 1981 | - Estudio Analítico y Simulación de Manipuladores |
| 1982 | - Desarrollo de herramientas de Análisis para Manipuladores Automáticos |
| 1983 | - Percepción Sensorial en Manipulación Industrial Automática |

En la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M se están realizando desde hace 4 años, trabajos de investigación encaminados a elaborar material de investigación básica que sirva de apoyo para aplicaciones industriales futuras. Esta división no cuenta con el personal necesario para el desarrollo de ciertos proyectos, lo que ha ocasionado una cierta lentitud en la ejecución de los proyectos realizados hasta ahora. Al igual que los otros centros de investigación, no cuenta con el apoyo necesario o la participación adecuada del sector industrial. La siguiente lista muestra los trabajos desarrollados en esta división :

- 1.- Modelo para cadena cinemática de 7 eslabones con pares de revolución (R)
- 2.- Estudio de cadenas cinemáticas con 7 eslabones acoplados por 6 pares de revolución (R) y uno prismático (P) colocados arbitrariamente
- 3.- Modelo para cadenas cinemáticas con 5 pares de revolución (R) y 6 eslabones
- 4.- Programa para cadenas cinemáticas abiertas con pares cinemáticos redundantes
- 5.- Modelo dinámico para robots manipuladores
- 6.- Modelo para el análisis de cadenas cinemáticas simples de n-eslabones y n-1 pares prismáticos o de revolución.

En lo que respecta a la industria privada, en su mayoría no lleva a cabo labores de investigación científica y tecnológica, debido principalmente a los siguientes factores :

- Tratándose de empresas extranjeras, obtienen toda su tecnología por parte de sus casas matrices mediante acuerdos con tractuales a cambio de la aportación financiera de la filial a las actividades de investigación y desarrollo de la casa matriz;
- Tratándose de empresas nacionales, la falta de recursos necesarios para llevar a cabo este tipo de actividades además del reducido tamaño de dichas empresas. Al respecto conviene mencionar que la cantidad de industrias que existían en el país en 1981, era alrededor de 125 000, de las cuales, no más del 1500 eran grandes, el resto, 123 500, correspondían a pequeñas y medianas empresas; y,
- En ambos tipos de empresas, el largo período de gestación de las actividades de investigación, el gran riesgo inherente y la lenta y dudosa recuperación de las inversiones.

En base a estos factores, se puede decir que el empresario nacional ha mantenido una actitud ambivalente en cuanto al papel de la tecnología en el desarrollo. Hace algunos años estaba dispuesto a importar, casi a cualquier costo, la tecnología extranjera que suponía le ayudaría a modernizar su planta, sustituir fuerza de trabajo y elevar su margen de utilidad, actualmente ya no está tan dispuesto a hacerlo aunque esta dispuesto a aceptar su responsabilidad y contribuir en la medida que le corresponde para lograr el desarrollo tecnológico independiente del país.

En lo que respecta a la transferencia de tecnología a México en el área de Robótica Industrial, es muy importante considerar a las diferentes empresas constructoras de robots que cuentan con oficinas en México (ASEA, Kawasaki, Cincinnati Milacron), las cuales se encargan de realizar, en colaboración con las empresas interesadas, estudios sobre proyectos de inversión en aplicaciones de robots a la industria mexicana. La empresa interesada presenta a concurso la realización del estudio de factibilidad y diseño del sistema automatizado que desee, con el fin de obtener los menores costos posibles y mayores beneficios de la inversión. Por su parte, la empresa constructora colabora en proporcionar la asesoría necesaria para determinar las necesidades que presenta la empresa en estudio y pueden elaborar conjuntamente, el sistema adecuado.

Tal es el caso de la compañía sueca ASEA, la cual ha realizado en los últimos 3 años, los estudios de aplicación de robots a las empresas DM Nacional, Volkswagen, Chrysler y recientemente a la empresa Ford la cual se encuentra en vías de instalar una nueva planta en el estado de Sonora. Sin embargo, muchos de estos proyectos, no se han podido llevar a cabo, ya que para muchas empresas no ha resultado factible debido a factores como bajos volúmenes de producción, baja utilización del equipo, altas inversiones, etc.

Finalmente, en lo que respecta al gobierno, no existe ningún proyecto de investigación o de desarrollo industrial con respecto a esta área de la Automatización. Su participación se ha limitado simplemente a proporcionar todas las facilidades para la importación de tecnología y, en cierta medida, ayuda económica a los diferentes centros de investigación científica y tecnológica del país.

A continuación se presenta una tabla que muestra el gasto nacional en ciencia y tecnología durante los últimos 7 años (2):

| <u>AÑO</u> | <u>MILLONES</u> | <u>%</u> |
|------------|-----------------|----------|
| 1977 | 6386 | - |
| 1978 | 9519 | 49.0 |
| 1979 | 12924 | 35.8 |
| 1980 | 20021 | 54.9 |
| 1981 | 32492 | 62.3 |
| 1982 | 43507 | 33.9 |
| 1983 | 63085 | 44.8 |

Las cantidades anteriores han llegado a representar solamente entre el 2 y 3% del producto interno bruto (PIB), siendo necesaria una mayor asignación de recursos para lograr la independencia tecnológica del país.

SEGUNDA PARTE :
=====

ASPECTOS SOCIO-ECONOMICOS
=====

III.- EL ROBOT COMO HERRAMIENTA
=====

DE PRODUCCION
=====

"Recuerdo perfectamente el cuerpo de mi padre y sus historias. Cuando era niño, mi padre llegaba cada noche a la casa después de haber trabajado más de 10 horas como soldador. Al despojarse de su camisa se podían apreciar muchas cicatrices en su torso. Al principio no comprendía; después supe que, al estar trabajando, pedazos al rojo vivo se le incrustaban dolorosamente en su cuerpo. Si mi padre viviera ahora entendería perfectamente la sustitución del hombre por una máquina automática, por un robot.... "

1.- I N T R O D U C C I O N

El robot, un sueño tan viejo como el hombre, esta emergiendo finalmente de las páginas de la ciencia ficción, para transformar las actitudes y hábitos del hombre en relación a la ejecución de trabajos industriales.

El advenimiento de los robots industriales ha significado nuevas oportunidades de producción en la industria manufacturera, además de proporcionar a empresas pequeñas la capacidad de la producción en masa, apoyándose en los adelantos tecnológicos, así como por los cambios económicos que se estan desarrollando en los últimos años.

Durante la década 1960-1970, la industria manufacturera de los Estados Unidos se vió afectada por una serie de problemas económicos, entre los que se pueden mencionar: incrementos considerables en los costos de mano de obra, altos costos de energía, imposición de normas gubernamentales e indisponibilidad de los trabajadores para realizar trabajos repetitivos y peligrosos.

Otros de los problemas de mayor impacto, era que las grandes inversiones de capital que tenían que hacer los empresarios, poseían bajas tasas internas de retorno. Debido a estos factores, los proyectos a largo plazo, así como las inversiones de capital en equipo y los proyectos de modernización se vieron suspendidos incrementando con esto, los periodos de vida útil de las instalaciones y equipos existentes.

Ya que el incremento de productividad está directamente relacionado tanto con las tasas de nuevas inversiones de capital como con la tasa de desarrollo de nuevos avances tecnológicos, era de esperarse que el crecimiento promedio anual de la productividad resultara el más bajo de todas las naciones industrializadas durante la década 1960-1970.

De 1947 a 1965 el crecimiento de la productividad se incrementó en un 3.4% anual; sin embargo, la tasa de crecimiento decayó a 2.3% en el período de 1965-1975, para que finalmente, en el año de 1979 decayera por primera vez en la historia de los Estados Unidos, a un decremento anual de 0.9%.

Al mismo tiempo que los índices de productividad disminuían, los costos directos de mano de obra se incrementaban dramáticamente. Hace dos décadas, un robot instalado en una línea de ensamblado costaba alrededor de 25 mil dólares que, trabajando a un máximo rendimiento y considerando un período de vida útil de 8 años, generaba un costo por hora de \$4.20, ligeramente mayor de lo que percibía un trabajador. En los últimos años, este mismo robot cuesta 40 mil dólares generando un costo por hora de \$4.80 mientras que los costos de mano de obra se elevaron de \$15.00 a \$20.00 por hora.

Parte de estos incrementos en los costos de mano de obra se

debieron a efectos inflacionarios y en parte también a la indisponibilidad de los trabajadores para realizar tareas consideradas como monótonas, fastidiosas o peligrosas. A partir de esto, los industriales consideraron la posibilidad de utilizar robots como una solución a los problemas antes mencionados. El robot no solamente podía trabajar las 24 horas del día, sino que tampoco necesitaba de descansos, no faltaba a trabajar los lunes, no requería de vacaciones ni derecho a pensiones.

Por otra parte, la evolución de los robots industriales se vio favorecida por el desarrollo de nuevas tecnologías entre las cuales se pueden mencionar los sistemas de control numérico (NC), sistemas de diseño por computadora (CAD), sistemas de fabricación por computadora (CAM) y el desarrollo del microprocesador a mediados de los años sesentas; los que permitieron la expansión del campo de aplicación de los robots industriales.

Una de las mayores ventajas que representaban los robots con respecto a los sistemas automáticos de fabricación clásicos, era que podrían ser utilizados en una serie de operaciones que requerían un cierto grado de manipulación, mientras que los otros solo podrían realizar un cierto tipo de tareas mediante la ejecución de movimientos simples.

El surgimiento de los robots apenas esta comenzando pero esta evolucionando de una manera muy rápida.

El primer robot industrial fue instalado en la planta automotriz de la General Motors en el año de 1961; actualmente, esta planta cuenta con 270 robots, instalados en operaciones de soldadura, pintura y ensamblado, principalmente.

Una de las primeras aplicaciones de los robots fue en las operaciones de fundición, tal como la carga-descarga de máquinas de fundición por troquel, así como en las operaciones de soldadura por puntos para el ensamblado de carrocerías en la industria automotriz.

Desde sus inicios, se tenían predicciones de que el crecimiento de los robots industriales sería muy similar al desarrollo de la industria de la computación. Sin embargo, los patrones de crecimiento de estas máquinas no se comportaron de tal manera. Primero, porque las características económicas de los años sesentas no permitieron su rápido crecimiento. El costo promedio de los primeros robots era de 25 mil dólares con un período de vida útil de 8 años. Segundo, no se podrán hacer grandes inversiones en capital en una tecnología que era nueva, riesgosa y no probada. Tercero, estaban limitados para aplicaciones simples, ya que no contaban con sistemas de control y sistemas de realimentación sensorial que les permitieran un mayor campo de aplicación.

Por otra parte, los costos de los robots se incrementaron de 25 mil dólares a 40-50 mil dólares, generando un costo por hora de

\$5.00 aproximadamente. La razón de que los costos no se hayan incrementado excesivamente, era que aproximadamente el 75% del costo de los primeros robots se debían al hardware electrónico y el 25% al hardware mecánico. De esta manera, los sistemas electrónicos utilizados en los robots se volvieron más sofisticados y sus costos se incrementaron muy poco en comparación con los costos del hardware mecánico, los cuales ocupan una mayor proporción en el costo del robot.

Como se puede ver en la figura 1, los costos promedio de la mano de obra directa en la industria automotriz se elevaron más del 100% con respecto a los costos por hora de los robots, a mediados de la década de los sesentas, época en la cual se empezó a observar un crecimiento significativo en la utilización de los robots. En los últimos años se ha observado un crecimiento anual del 50% aproximadamente, el cual se estima que se conservará en los próximos años.

La compañía más grande de los Estados Unidos, la Unimation Inc. fue fundada en 1959 contando con un capital de 12 millones de dólares. En la actualidad esta fabricando 40 robots Unimates y 15 robots PUMA mensualmente y tiene ventas estimadas de 42 millones de dólares anuales. La compañía Cincinnati Milacron que fabrica el robot sofisticado T3, tenía ventas estimadas para 1980 de 32 millones de dólares.

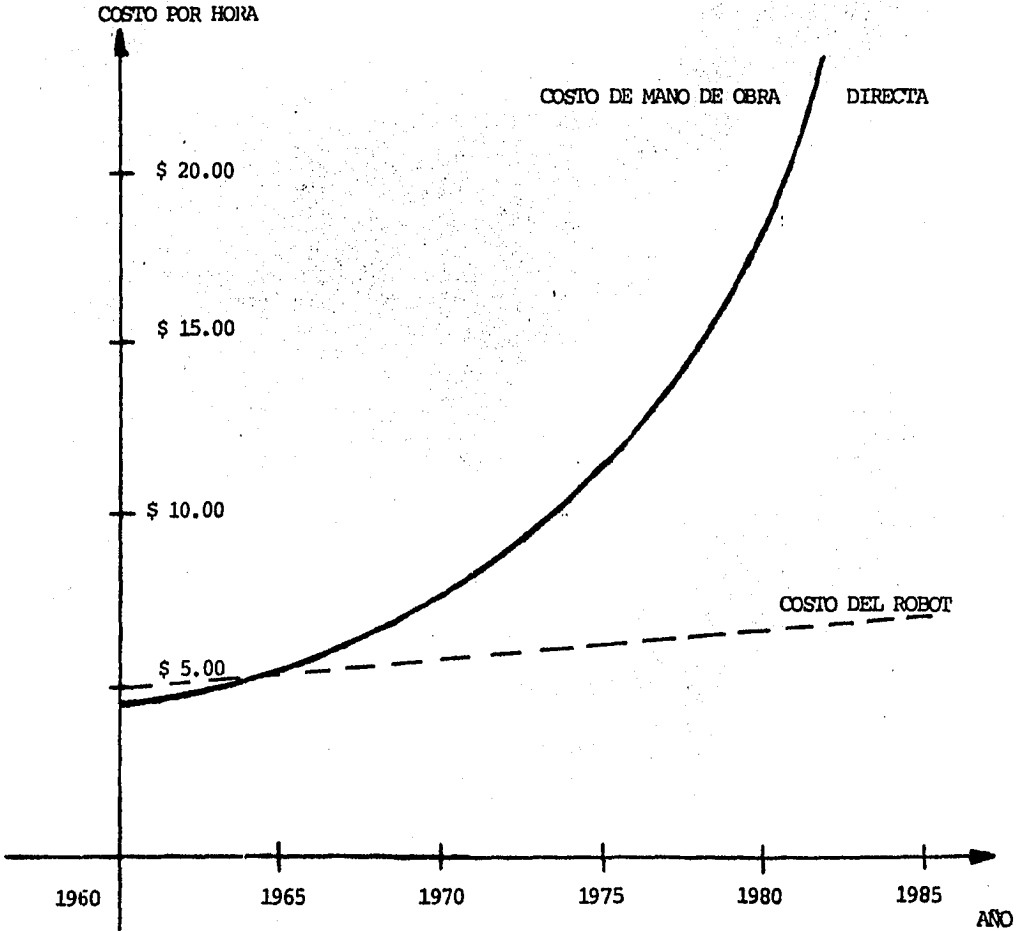
Teniendo en consideración todas las compañías ensambladoras de robots en los Estados Unidos, se espera tener en ventas potenciales la cantidad de 2 billones de dólares para fines de 1990.

Analizando el mercado de robots en los Estados Unidos, se puede observar que predominan las ventas de 6 compañías, las cuales cuentan con el 90% del total de las ventas. La siguiente tabla muestra la distribución de ventas de robots en los Estados Unidos, para el año de 1981:

| <u>COMPANÍA</u> | <u>% DE LAS VENTAS</u> |
|------------------------|------------------------|
| UNIMATION | 37 |
| CINCINNATI MILACRON | 29 |
| ASEA | 8 |
| PRAB | 8 |
| DEVILBISS | 7 |
| COPERWELD (AUTO-PLACE) | 4 |
| OTRAS (40-45%) | 7 |
| | <u>100%</u> |

Como era de esperarse empezaron a surgir los competidores en otros países industrializados; tal es el caso de Japon, el cual importó su primer robot Unimate en 1967 y actualmente cuenta con 16 mil robots operando en sus líneas de fabricación, cantidad que rebasa a la que poseen los Estados Unidos y Europa (1). Japon esta produciendo más robots que Estado Unidos en una relación promedio de 5 a 1.

FIG. 1.- COSTOS DE MANO DE OBRA EN RELACION A LOS COSTOS DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ DE ESTADOS UNIDOS EN EL PERIODO 1960-1981



En enero de 1980 la FUJITSU FANUC, instaló una nueva planta con un capital de 38 millones de dólares; esta nueva planta cuenta con robots que están trabajando para la fabricación de robots industriales con una tasa de producción de 100 unidades mensuales.

Una de las razones por las cuales la cantidad de robots industriales instalados en Japon se dispara mucho de las de los otros países es que la JIRA (Japanese Industrial Robots Association) ha definido cuatro niveles de robots industriales:

- Manipuladores manuales que realizan operaciones con secuencias de ejecución fijas
- Robots tipo "play-back" que ejecutan de una manera repetitiva una serie de instrucciones grabadas con anterioridad en la memoria de la computadora
- Robots de control numérico
- Robots inteligentes, que ejecutan sus tareas modificando su comportamiento a través de información que reciben de su medio ambiente.

En base a lo anterior, se estima que el número de robots industriales que se encuentran funcionando en Japon es alrededor de 80 mil unidades, de las cuales el 20% cumple con la definición de la RIA.

Según estadísticas publicadas por la JIRA (2), la producción japonesa acumulada en el período 1968-1979 de robots de todo tipo era de 56000 unidades, de las cuales 2410 eran robots industriales tipo "play-back" y 1340 presentaban características de Inteligencia Artificial. La siguiente tabla muestra la demanda estimada de manipuladores en Japon para el período 1980-1990:

| | 1980 | | 1985 | | 1990 | |
|--|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | VALOR | NUMERO | VALOR | NUMERO | VALOR | NUMERO |
| ----- | | | | | | |
| A.- Manipuladores controlados manualmente y telemanipuladores | 2.5 | 1500 | 9.5 | 5500 | 13.5 | 8000 |
| | GY* | | GY | | GY | |
| ----- | | | | | | |
| B.- Manipuladores automáticos de ciclos previamente determinados : | | | | | | |
| B1.- Secuencia fija | 32 | 15000 | 55 | 27500 | 95 | 47500 |
| B2.- Secuencia variable | 10 | 1800 | 50 | 9000 | 75 | 14000 |
| ----- | | | | | | |

* 1 GY = 20 millones de francos = 420 millones de pesos

| | VALOR | NUMERO | VALOR | NUMERO | VALOR | NUMERO |
|----------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| C.- Robots Inteligentes : | 4 | 350 | 26 | 2250 | 81.5 | 6800 |
| D.- Robots Industriales : | | | | | | |
| D.1.- Por aprendizaje | 10 | 900 | 40 | 3500 | 70 | 6500 |
| D.2.- Por Control Numérico | 3 | 150 | 10 | 900 | 15 | 1400 |
| Exportación | 1 GY | | 45 GY | | 90 GY | |

Con lo que respecta a Europa (3), Alemania Oriental cuenta con 3500, Suecia 1300, Italia 700, Francia 1100 y por último Rusia que cuenta con 45 unidades.

Suecia es el país que cuenta con el mayor número de robots per cápita, siendo el primer productor europeo y el tercero a nivel mundial (ASEA) después de las compañías Unimation y Kawasaki; - además cubre el 35% del mercado europeo y exporta el 60% de su producción.

A continuación se presenta una lista no exhaustiva y no ordenada de los principales constructores de robots en el mundo:

Japon: Hitachi, Kawasaki, Mitsubishi, Kimatsu, Nissan, Seiko y Fujitsu Fanuc

Estados Unidos: Unimation. AMF, General Electric, Cincinnati Milacron y Andromat

Suecia: ASEA, Electrolux, Kaufeldt, Atlas Copco

Italia: Fiat, Olivetti

Alemania: Volkswagen, Siemens y Bosh

Francia: Acma-Renault, La Calhere, Languépin y Cerci

La mayoría de las tareas realizadas por los robots consisten en tomar un objeto, moverlo, colocarlo y depositarlo, tales tareas caen dentro de las máquinas utilizadas para el manejo de materiales, incluyendo las máquinas para carga-descarga, alimentación a prensas, además de tareas rudimentarias de ensamblado.

Otras operaciones que pueden ser realizadas por los robots consisten en el manejo de una herramienta a través de la envolvente de trabajo para realizar de esta manera, operaciones de soldadura por puntos o pintura por aspersion, siendo estas últimas las más utilizadas.

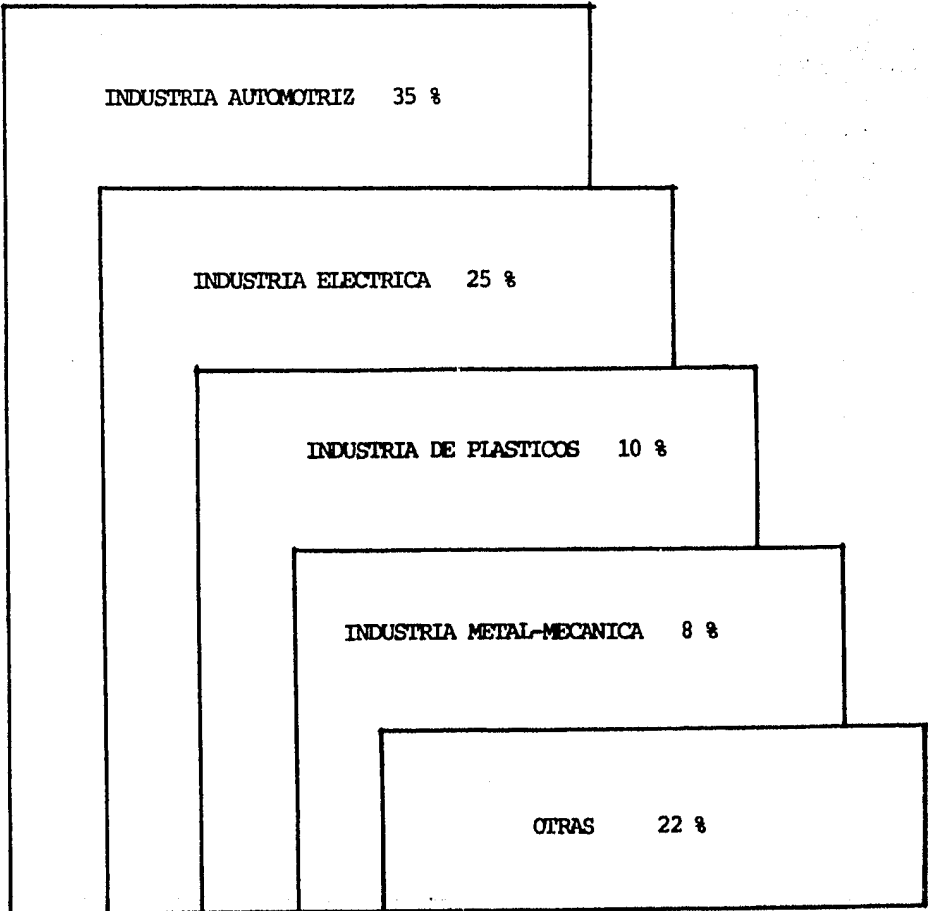
Las aplicaciones de los robots industriales, se pueden clasificar en 3 grandes grupos: la manutención, los procesos industriales y el ensamblado. En manutención, carga-descarga de máquinas herramientas (tornos, taladros, fresadoras, prensas, etc.), - alimentación a máquinas de moldeo o para el manejo de piezas - que requieren de tratamientos térmicos.

En los procesos industriales para operaciones de soldadura (e - eléctrica o por puntos) cuya aplicación se justifica por las condiciones de trabajo, la falta de soldadores calificados y la necesidad de reducir los costos; procesos de pulverización de pintura, aislantes, revestimientos de cables, procesamientos de materiales de plástico y metálicos, acabados superficiales, desbarbado de piezas de fundición, medición sw piezas de grandes - dimensiones, etc.

Las operaciones de ensamblado permanecen aún un poco desarrolladas ya que requieren de sistemas de percepción sensorial para lograr mayores beneficios.

De los robots instalados en Japon (4), el ensamblado representa el 9.8% mientras que los procesos de manufactura ocupan el 22%, la soldadura por puntos el 11.4%, la soldadura eléctrica el 7.3% la pintura el 4.3 % y los tratamientos térmicos el 1.6%

Si se clasificaran los sectores industriales que utilizan robots en sus operaciones de producción, se obtendría la siguiente gráfica:



Ejemplos de estas aplicaciones es el robot Pragma A-300 que es capaz de armar válvulas de compresoras a partir de las 12 partes que las componen. Sus dos brazos le permiten realizar simultáneamente varios trabajos totalmente diferentes, cuando detecta una pieza defectuosa la hace a un lado y coge otra. Puede trabajar las 24 horas del día produciendo 320 válvulas por hora

Una empresa italiana ha logrado en su taller que un solo robot produzca en serie perfiles destinados a la construcción de puentes elevadores. Cada pieza mide 1.0 a 1.4 metros de longitud y su peso varía entre 48 y 60 Kg. El robot recientemente incorporado inicia la secuencia de sus actividades cuando recibe al perfil de hierro, toma la pieza de un transportador automático y la presenta ante dos máquinas-herramientas. Luego de terminado el fresado y torneado, él mismo quita la rebaba del producto mecanizado y por último lo coloca hacia el puesto de acabado superficial, al fin del ciclo.

Nada conocido, excepto un robot industrial, puede ser capaz de realizar la portentosa actividad desempeñada en dicha fabricación. El robot de la empresa italiana ha permitido duplicar la productividad total, reducir el 50% de la superficie del taller antes utilizada y disminuir el costo de la mano de obra utilizada en un 80%.

Esta renovación industrial, una de las tantas surgidas en los últimos años, ha sido posible ante todo, gracias al surgimiento del robot. Su penetración en la industria es irreversible, a pesar de que todavía no existen soluciones a los trastornos sociales que ella provoca.

Pero la industria del futuro no consiste en hacer las operaciones más rápidas, a menor costo y con mayor confiabilidad. Los cambios se operan en las líneas de producción y al mismo tiempo en la organización empresarial y el estilo de la alta dirección quien tendrá que aceptar los cambios en cuanto a los supuestos hábitos acerca de la buena marcha empresarial.

Otro tanto debe ocurrir en los cálculos habituales para analizar las inversiones en bienes de capital. Ya no se trata solo de evaluar la rentabilidad simple y pura de la inversión. Resulta obligado considerar cual será la posición competitiva dentro de 5, 10 o 20 años sino se realiza la inversión ahora.

También los conceptos tradicionales de Mercadotecnia darán lugar a nuevos criterios. El producto que se obtenga en las fábricas del futuro será responsabilidad compartida entre investigación, ingeniería, mercadotecnia y producción.

El mercado bajo estas circunstancias se caracterizara por productos de corto ciclo de vida, ya que actualmente el plazo entre nuevas generaciones de productos es muy breve. Por tanto, el ciclo de fabricación deberá asimilarse al del producto, ya que muy pocos mercados mantendrán los ciclos anteriores, en donde existía tiempo suficiente para cambiar los procesos antes de que el producto fuera sustituido por otro distinto.

Los métodos tradicionales de fabricación eran apropiados para series largas de productos normalizados, con muy poca variedad. Con las nuevas tecnologías llamadas por unos flexibles y por otros horizontales, se modifican las estructuras productivas que hasta ahora se desarrollaban bajo el signo de lo gigantesco (las denominadas economías de escala) con producción en masa, integración vertical y productos poco diferenciados. Al menos en lo relativo a las plantas fabriles, crecerá la descentralización coordinada de la producción.

Las condiciones de trabajo mejorarán sustancialmente, disminuyendo el clima de agobio y contaminación que durante tantos años ha reinando en el ambiente manufacturero. Incluso hasta en la enmarañada producción de hierro y acero es posible crear condiciones de trabajo similares a las de un laboratorio como lo muestra el caso de la acería japonesa "SUMITOMO METAL", la sexta en el rango siderúrgico mundial, que ha robotizado virtualmente todas las actividades productivas y de servicio.

Se piensa que la fábrica tradicional atravieza una profunda descomposición y transformación. En plena adolescencia tecnológica el modelo fabril iniciado hace 3 siglos ha sufrido un grave espasmo y la única salida, por ahora, es acelerar el modelo fabril del futuro que ofrece la tecnología hoy disponible y probada.

Con todos estos cambios, es factible creer en una transformación radical en el concepto de productividad como un aspecto de poder ya que si una fábrica puede trabajar los 365 días del año con solamente pocos trabajadores, tremendas ventajas económicas, produciendo cantidades sin límites y con costos extremadamente bajos, es fácil pensar que un país que posea estas facilidades de producción domine económicamente al mundo.

Teniendo en consideración lo anterior, será necesario aprovechar todas las ventajas que representa esta nueva tecnología, aplicando un criterio ético y bajo una organización social adecuada para disfrutar al máximo los beneficios que esta nueva tecnología representa para el hombre y evitar que se cumpla lo que J.J. Rousseau expresara en su "Discurso Sobre las Ciencias y las Artes" ;

"Parece inevitable que el desarrollo de las ciencias, lejos de engrandecer el espíritu del hombre, solo logre su enajenación y corrupción".

2. - EL ROBOT DENTRO DEL DESARROLLO
DE LA AUTOMATIZACION
INDUSTRIAL

En la antigüedad, el hombre no se interesó por la invención de maquinaria debido a la existencia de abundante mano de obra ser vil y barata; los esclavos; sin embargo, la automatización que se está realizando en la industria en los últimos años, se caracteriza por la introducción de máquinas automáticas que son capaces de realizar todas sus operaciones por sí solas sin necesidad de estar presente algún obrero que la conduzca. Esta nueva tecnología no es sino la continuación del proceso de mecanización que se iniciara a mediados del siglo XVIII durante la Revolución Industrial.

El fenómeno de la automatización ha dado lugar a una serie de definiciones cuyo número varía en función inversa del grado de validez de cada una de ellas.

Es lógico pensar en las variaciones de estas definiciones, ya que dependerán del punto de vista del observador; el técnico, el sociólogo, el industrial o el economista, los cuales poseen intereses diferentes.

Considerando la esencia del automatismo industrial, se puede mencionar la siguiente definición; "es un medio de analizar, organizar y controlar los medios de producción, con el fin de obtener una utilización óptima de todos los recursos productivos, mecánicos, materiales y humanos".

Una definición más cercana a la realidad industrial sería: "La automatización aparece cada vez que existe una operación continua e integrada de un sistema de producción racionalizado, utilizando sistemas mecánicos y electrónicos para controlar y coordinar la cantidad y calidad de la producción".

Desde el punto de vista técnico, se tiene la siguiente: "la mecanización existe cuando una máquina realiza el trabajo del hombre, controlando sus propias operaciones y corrigiendo sus propios errores".

Si se analizan los factores humanos se puede decir que la automatización reemplaza las manos, los sentidos y el cerebro del trabajador; mediante dispositivos extraordinariamente complicados y sensibles. Por otra parte, se puede decir que reside en la sustitución de las características humanas, esfuerzo, observación, memoria y decisión, por dispositivos técnicos.

A partir de la definición técnica, que considera que las máquinas pueden controlar y corregir sus errores por sí mismas, se elimina del campo de la automatización a las máquinas de transfe

rencia, cuyas consecuencias deberan ser examinadas por los economistas. Consecuencias en cuanto a costos, precios, salarios, beneficios, empleo, etc.

Entre las características de los procesos automatizados se pueden mencionar las siguientes:

- La integración en las diferentes líneas de producción, - consiste en combinar las diferentes estaciones de trabajo, de tal manera que la transferencia de una máquina a otra se realiza de una manera automática
- El control automático basado en el principio de la "reacción, esta integrado por un circuito de realimentación, el cual se encarga de efectuar los ajustes necesarios para obtener las normas de producción establecidas con anterioridad
- Las máquinas electrónicas, principalmente la computadora seran utilizadas en los trabajos de dirección y administración, logrando ventajas notables con respecto al hombre, en operaciones de cálculo, planificación y gestión administrativa.

El surgimiento de los procesos automáticos de fabricación, o - riginaron cambios notables en los principales parámetros de - los sistemas productivos; tiempos de fabricación, volúmenes de producción, requerimientos de mano de obra, etc.

En Rusia, (1) una fábrica de mono-blocks para camiones logró reducir el tiempo de fabricación de 3 horas 25 minutos a solamente 15 minutos; de 180 trabajadores repartidos en 3 equipos, solo se requirió de 3 trabajadores para efectuar todas las operaciones necesarias.

En los Estados Unidos, la compañía FORD concentró sus esfuerzos en las operaciones de metalurgia y en los trabajos de fundición; un block que requería de 9 horas, podría ser fabricado en solo 15 minutos, produciendo 4600 motores diariamente sin la intervención del trabajo manual.

En en este país, en donde las ventas de equipos automáticos se acrecentaron en un 230% entre los años 1949 y 1953, afirmando que todas las ramas de actividad susceptibles de ser automatizadas, lo estarían en los próximos 10 años.

En Alemania, la fabricación de motores automotrices, industria química, industria alimentaria, fabricación de material eléctrico y otras actividades se beneficiaron con la aplicación de procesos automáticos de fabricación.

Sin embargo, la adopción de estos nuevos sistemas de fabricación implicaba una serie de consideraciones que se deberían de tener en cuenta: cambios en las líneas de producción, inversión, desplazamientos de mano de obra, factores psicológicos, etc.

En el aspecto económico, era necesaria la producción en grandes series para poder amortizar los costos elevados de las inversiones. Por otra parte, las tasas de inversión, se veían desfavorecidas por las normas fiscales de la mayoría de los países industrializados debido a las restricciones de las reservas financieras.

Analizando los diferentes adelantos tecnológicos surgidos desde la época antigua hasta la actualidad, muchos autores se complacen en afirmar que las modificaciones actuales en las técnicas de producción, no constituyen más que una etapa lógica dentro de una cadena de eventos sucesivos, ligados los unos con los otros, superando cada etapa subsecuente los adelantos logrados por la anterior, pudiendo pensar que cualquier cambio cuantitativo ocasionará transformaciones cualitativas.

De esta manera, se puede decir que una revolución se mide por sus consecuencias y no por sus antecedentes; por lo que el automatismo parece generar grandes promesas.

Para los industriales proporcionara precios de ventas más bajos, elevadas producciones, mayores rendimientos, etc.

Para los trabajadores, jornadas de trabajo más cortas, tareas más interesantes, mejores condiciones de trabajo, etc. En el área sindical, se espera que en pocos años la automatización genere semanas de 4 días, períodos de vacaciones más largos jubilaciones más rápidas y por lo tanto, una elevación sustancial del nivel de vida de los trabajadores.

Así mismo, la automatización liberará a los trabajadores de labores monótonas, en las cuales es el servidor de la máquina. Con el advenimiento de la energía atómica y de las máquinas electrónicas, el mundo entrara en fase de una nueva revolución industrial, que generará cambios notables en la evolución social del hombre.

El anuncio de una segunda revolución industrial no deja de causar temor a los trabajadores de todas las empresas manufactureras de todo el mundo, en lo que se refiere a los procesos de automatización que se están integrando en los países altamente industrializados como Japón, Estados Unidos, Alemania, Inglaterra, Francia y Suecia.

En 1955 se consideraba que uno de los problemas a los que se enfrentaba el mundo era el crecimiento demográfico considerado en 34 millones de habitantes anualmente. Por lo que sería necesario lograr un desarrollo de la producción alimentaria del 25% en un período de 3 a 4 años, seguido de un crecimiento de 1.3% anualmente.

La pregunta que surgía era saber si las transformaciones profundas a las que se enfrentaban los procesos de fabricación, serían capaces de proporcionar los beneficios esperando con las técnicas tradicionales de fabricación.

La población de Estados Unidos se elevó de 162 millones en 1955 a 220 millones en 1975, de los cuales, el número de habitantes considerados como mano de obra activa era de 2 millones (1) ocasionando grandes deficiencias en la productividad.

La productividad debería incrementarse del 40% antes de 1965 a más del 100% antes de 1975, para lograr mantener el nivel de vida de la población. Es por esto, que se puede pensar, que se inició la introducción de los sistemas automáticos de fabricación con el fin de elevar los índices de productividad.

Para obtener un análisis global de los efectos económicos la autmatización, es recomendable examinarlos desde diferentes puntos de vista:

- 1.- Desde el punto de vista de los factores de la producción para los cuales se presenta el problema de modificaciones cuantitativas y cualitativas, en base a las necesidades económicas
- 2.- Desde el punto de vista empresarial, el cual deberá coordinar los factores de la producción
- 3.- Desde el punto de vista de mercados, en donde se deberá realizar un ajuste entre ofertas y demandas globales, teniendo en consideración sus efectos sobre los precios y la estabilidad de la economía

El análisis de dos de los factores de producción más importantes, generará una serie de problemas concernientes a cada uno de ellos como son:

- Problemas relativos al capital.- para la introducción de nuevas tecnologías será necesario modificar o reemplazar ciertas máquinas, lo que requiere de grandes inversiones de capital. Es importante subrayar la interdependencia de este factor con el factor humano, ya que para realizar grandes inversiones de capital, será necesario reducir el capital circulante.
- Problemas relativos al trabajo.- es evidente que los problemas que se presentan con respecto a la mano de obra son tanto en el aspecto cuantitativo como en el aspecto cualitativo. Los nuevos sistemas de producción deberán ser capaces de absorber la mano de obra desplazada por las máquinas, en cuyo caso será necesario proporcionar una etapa de capacitación, para adaptarlos a las nuevas necesidades.

Entre los gastos que se generan en la realización de inversiones para nuevas tecnologías, se pueden mencionar los siguientes

- Al nivel de la empresa, la utilización de una nueva tecnología exige de trabajos de investigación cuya duración puede tomar muchos años antes de que se puedan obtener los primeros beneficios como resultado de la aplicación de las nuevas técnicas de producción.

Los costos involucrados en esta etapa, podrán ser amortizados a través de grandes volúmenes de producción que se podrán obtener con esta nueva tecnología. Por otra parte, la rentabilidad del equipo dependerá de la evaluación de un cierto número de elementos los cuales se pueden enumerar de la siguiente manera:

- 1.- Costos totales del equipo
- 2.- Ahorros anuales esperados sobre los costos
- 3.- Vida útil del equipo
- 4.- Cantidad y período de amortización
- 5.- Costos de mantenimiento
- 6.- Tasas de impuestos sobre los beneficios obtenidos

-- Al nivel de la nación.- es obvio que al incrementarse - los gastos de inversión a nivel empresarial, también el gobier- no partio pará en estas inversiones, ya sea a través de finan- ciamientos o mediante la creación de industrias propias para sa- tisfacer las necesidades generadas (nueva maquinaria); incremen- tando con esto, el valor per cápita utilizado en dichas inver- siones.

La primera idea que se tiene en relación a la utilización de - sistemas automáticos de fabricación, es que generara un mayor - índice de desempleo.

¿En que trabajarán los obreros cuando solamente existan fáabri- cas que funcionen con máquinas automáticas?

A primera vista se puede justificar este "miedo", ya que las - máquinas automáticas presentan mayores ventajas competitivas - en cuanto a la ejecución de ciertas tareas, superando algunas veces las habilidades del hombre.

Sin embargo, supóngase que las máquinas llegan a desplazar a todos los trabajadores de una línea de producción y que estos trabajadores no son colocados en otros puestos de trabajo sino que son despedidos.

¿ Quienes comprarán todos los productos que se fabriquen en es- tas líneas de producción y que los industriales desean vender?

En este aspecto, se puede decir que la automatización se vería detenida no tanto por la fuerza productiva que representan los obreros, sino porque son los consumidores por excelencia. Es decir, se puede prescindir de él como trabajador, pero no se - puede prescindir de él como consumidor.

Examinado 10 años de automatización en la industria francesa - Régie Renault, (2) se pueden considerar los siguientes datos ; en 1947 37296 obreros producían 280 vehículos por día; en 1957 56400 obreros producían más de 1400.

En base a los datos anteriores, se observa que el número de ve- hículos producidos aumentó en proporción más considerable que el número de obreros (500% contra 50%).

En otras palabras, la producción promedio por obrero, es decir, la productividad se triplicó. También se puede observar que di- cha empresa podía producir el mismo número de autos en 1957, - disminuyendo 3 veces el número de obreros.

Sin embargo, la empresa contrató 17104 empleados nuevos. La automatización que teóricamente provoca desempleo, en este caso aumento el empleo.

Para entender un poco esta contradicción que se presenta en torno a la automatización, supongámonos gerente de una empresa: ¿a qué interés tendría para nosotros automatizar nuestra empresa?

A primera vista se pueden considerar dos alternativas: o disminuir el personal y mantener el nivel de la producción, o aumentar la producción y conservar el personal.

Es evidente que si las características del mercado permiten aumentar los volúmenes de producción, se seleccionará la segunda alternativa. Pero si por el contrario, el mercado se encuentra restringido, es decir, no existe una demanda suficientemente alta para absorber dichos volúmenes de producción, ¿para que se quedará automatizar una empresa? ¿para reducir el personal y así mismo el monto de los salarios?

Realizando un análisis de los diferentes factores que se deben tener en cuenta en un estudio de factibilidad, se podrá ver que la economía de salarios, en algunos casos, no es comparable con los costos que se tendrán que realizar en la inversión de nueva maquinaria.

Analizando las características de mercado descritas anteriormente, se podría decir que la automatización es rentable, si se cuenta con estados incrementales de ventas y mercados amplios, es decir, que exista una expansión económica.

Siendo la expansión económica una condición indispensable para el desarrollo de la automatización, se puede entender la introducción de dicho fenómeno en las industrias después de la postguerra ya que la economía presentaba características de expansión.

Por otra parte, si se analiza el funcionamiento de una fábrica de carrocerías que cuenta con dos líneas de prensas se tiene lo siguiente: cada una de las líneas de producción esta compuesta de 6 prensas. En una, la transferencia de la materia prima no se realiza de una manera automática, siendo necesario contar con 6 obreros para accionar cada una de las prensas, mientras que en la otra línea un solo obrero controla las 6 máquinas. La primera produce 280 piezas/hora mientras que la segunda produce 400. Es decir, en la primera línea cada obrero produce 47 piezas/hora, nueve veces menos que el único obrero de la segunda línea.

A partir de esto, surge un problema con respecto al pago de salarios: ¿sería justo que el obrero de la segunda línea ganará 9 veces más que los otros, cuando su trabajo consiste simplemente en mover, en un momento dado, una palanca de control?

Por otra parte, aunque la segunda produce más, su costo de in -

versión fué más elevado, por lo que era necesario trabajar a máximo rendimiento, con el fin de amortizar la cantidad de la inversión.

Otro problema que se presenta en la automatización, es el problema de la readaptación de los trabajadores desplazados hacia los nuevos puestos de trabajo. Por otra parte muchas de las nuevas tareas a realizar exigirán el empleo de especialistas calificados.

De esta manera se puede decir que la automatización presenta un doble problema en relación al trabajo: un aspecto cuantitativo y un aspecto cualitativo.

1.- El problema cuantitativo del empleo.-

Para poder determinar la magnitud de este problema, es recomendable analizar los siguientes fenómenos:

- a) Variaciones del empleo en cada una de las empresas consideradas, es decir, la mano de obra desplazada de un puesto de trabajo, podrá ser reinstalada dentro de la misma empresa, en áreas no-automatizadas.
- b) Variaciones del empleo por sectores industriales: se puede pensar en una transferencia de mano de obra de una empresa a otra empresa dentro de un mismo sector industrial
- c) Tendencias generales del empleo: en última instancia, la mano de obra desplazada en una determinada empresa podrá ser instalada dentro de otra empresa, sin importar que sector pertenezca, es decir, realizar la reubicación de empleados a un nivel nacional

Una manera de lograr esto es a través de la elaboración de un plan de desarrollo industrial adecuado para lograr una planificación industrial adecuada.

Un problema que se puede presentar en la planificación del desarrollo industrial es el de conciliar el papel del Estado con respecto a la libertad empresarial, la cual, en los países occidentales constituye el móvil de la economía. Planificar sería limitar el juego de este móvil.

2.- El problema cualitativo del empleo.-

Uno de los aspectos más sensibles a considerar dentro de los cambios ocasionados por la automatización, es que las industrias requerirán de técnicos y obreros más calificados que puedan responder a las características del desarrollo y evitar que sean desplazados completamente por las máquinas y que puedan quedar integrados al sistema productivo.

De las características físicas que requería anteriormente el trabajo (fuerza, movimientos rápidos, etc.), la automatización requiere atención y responsabilidad, ya que muchas veces estará a cargo de la supervisión de equipos muy costosos.

En el aspecto de requerir personal más calificado, se presenta el grave problema de la formación y capacitación del personal que se requerirá para desempeñar las nuevas

funciones generadas por la automatización.

De esta manera, es necesario que el gobierno y los Institutos de Enseñanza Superior creen las estructuras necesarias para la formación de los nuevos profesionistas que se requerirán, al ritmo al que se presente la automatización.

Como se puede ver, el problema que presenta la automatización no requiere de una solución anarquista, ya que se requiere de la colaboración entre los industriales, los sindicatos, los trabajadores y el Estado, para lograr un equilibrio entre los intereses que persigue cada uno de ellos.

Actualmente, la mayoría de los países de America Latina, incluyendo México, se encuentran en un proceso de recesión que será largo y difícil, mientras que por otra parte, están surgiendo una serie de innovaciones tecnológicas en los países industrializados referentes a la microelectrónica que incluyen la automatización, la robotización, telecomunicaciones, biotecnología, etc, las cuales ocasionarán un impacto desde el punto de vista socio-económico y cultural en America Latina. De esta manera, será necesario diseñar una estrategia social para asimilar estos cambios.

El proceso de ROBOTIZACION Y AUTOMATIZACION en la industria y los servicios, es un proceso evidentemente irreversible que consiste en desplazar mano de obra por máquinas que realizan el trabajo del hombre, como ocurrió en los inicios de la Revolución Industrial.

Se puede observar en los países industrializados de Europa que existe una tasa de desempleo del 10% y en Estados Unidos del 14% con ninguna tendencia a disminuir. Eso en parte se debe a circunstancias coyunturales como puede ser la recesión, pero básicamente se debe a que cada vez se necesita menos mano de obra para producir la misma cantidad de bienes y servicios.

Si se comparan con los países de America Latina que poseen altas tasas de crecimiento demográfico que pasan por lo general del 2%, que tienen capacidad de acumulación de capital mucho menor que otros países y que padecen una desocupación estructural es obvio que el problema de desocupación va a agravarse y que no existen inversiones en nuevas industrias que puedan evitarlo además de que las nuevas empresas que se instalen lo harán con las nuevas tecnologías, por lo que la absorción de mano de obra será bajísima.

Analizando lo anterior, se puede pensar que el desarrollo de nuevas tecnologías solo traen consecuencias negativas para el desarrollo de un país.

Sin embargo, hay que recordar que la historia humana es la historia del hombre por liberarse del trabajo rutinario o difícil; cuando el hombre fabrica la primera herramienta de piedra está tratando de facilitar con el instrumento el trabajo humano, por

lo que se puede decir, que el proceso de robotización es una tecnología positiva.

En los inicios de la Revolución Industrial existía una gran oposición de la mano de obra hacia las máquinas porque la desplazaba; sin embargo, esta mecanización elevó el nivel de vida de la población, mejoró las condiciones de la clase obrera, etc.

En la actualidad, este proceso se está acelerando; sino existe una estrategia social adecuada es claro que esto puede resultar catastrófico, de modo que el problema no es que la tecnología por sí sea negativa. El problema son las estrategias sociales para absorberlas sin que sean un gran problema, como sucedió en los inicios de la Revolución Industrial, cuando se dieron condiciones terribles de vida de los obreros, desocupación, etc.

El problema principal, es que esa estrategia social implica cambios radicales en la organización social. A medida que se va eliminando la mano de obra, que es esencialmente obrera, los trabajos que van quedando son más creativos, y eso modifica radicalmente el papel del salario en la distribución de bienes y servicios; hasta ahora la distribución no igualitaria, la distribución diferencial de bienes y servicios se hacía a través del salario, y por lo tanto, de la calificación de la mano de obra.

Por eso, a medida que va desapareciendo la mano de obra, el papel del salario tiende a ser menos importante en la distribución de bienes y servicios y la sociedad tiene que adaptarse a este cambio. El tiempo libre, entonces empieza a aparecer como el tiempo más importante en el cual las personas podrán dedicarse a ser personas realmente y o simplemente piezas del aparato productivo.

De esta manera, la potencialidad de la revolución tecnológica será positiva, si es que se sabe introducir los cambios sociales, económicos y culturales necesarios.

Es lógico pensar que con el tiempo, México tendrá que incorporarse a esta corriente moderna de la automatización, a medida que sus manufacturas adquieran mayor volumen e importancia, ya que entonces le será conveniente una mayor demanda de trabajadores acompañada por la elevación natural de los salarios, y por lo tanto, del nivel de vida de los trabajadores.

Parece inevitable, que los robots y los artefactos robóticos harán importantes contribuciones para aumentar la productividad en la industria, aumentando con esto el tiempo libre del hombre y tal vez, por que no, cumplirse el sueño de Aristóteles:

"Si cada máquina pudiera ejecutar su trabajo por anticipado, obedeciendo las órdenes de otros..... si una embarcación pudiese navegar, y una lira ser pulsada sin una mano que la guiara, entonces los jefes no necesitarían sirvientes ni los amos esclavos".

3.- METODOLOGIA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA SELECCION

E IMPLEMENTACION DE ROBOTS INDUSTRIALES

La implantación de robots industriales en los países desarrollados (Estados Unidos, Japón, Inglaterra, Francia, Italia, Alemania Suecia) esta ganando cada día más fuerza, incrementandose el porcentaje de las operaciones de pintura, soldadura, forja, fundición, carga-descarga de máquinas-herramientas en la industria metal-mecánica, que estan siendo realizadas por los robots industriales.

El desarrollo e implementación de las aplicaciones del robot, generalmente sigue la misma secuencia básica que para cualquier otro proceso de manufactura. Sin embargo, tomando en cuenta la combinación especial de flexibilidad y limitaciones de los robots, es importante considerar una serie de factores para lograr éxito en la aplicación de un robot industrial. Durante el proceso de planeación de las operaciones a realizar por los robots, es muy importante tener en consideración los siguientes aspectos:

- 1).- ¿ Se podrá o deberá seleccionar a los robots respecto a la mano de obra o a los diferentes niveles de automatización existentes?
- 2).- En tal caso: ¿ Que tipo de robot se deberá seleccionar y como deberá de funcionar ?

Teniendo en consideración los dos aspectos anteriores, se podría enunciar la siguiente premisa:

"Se puede decir que se tiene la capacidad de diseñar no solamente el sistema de trabajo, sus componentes y medio ambiente, sino también la estructura y las capacidades del "operador".

De esta manera, la incorporación de los robots industriales en las industrias manufactureras requiere de analizar una serie de alternativas complejas que deberán ser tomadas en cuenta antes de tomar la decisión de adquirir dichos dispositivos. Para lograr este objetivo se requiere de todo un proceso, el cual debe ser planeado y ejecutado siguiendo una secuencia lógica.

Una manera de considerar este proceso desde la etapa de planeación hasta la puesta en marcha del robot en una línea de producción, sería la de analizar las 4 etapas siguientes:

1.- PLANEACION.-

Antes de seleccionar e instalar un robot específico, se requiere de una fase de planeación para evaluar la naturaleza de las operaciones para las cuales se esta considerando la aplicación de los robots y determinar cuales seran factibles de utilizar. Al finalizar esta etapa se podrá tomar una decisión con respecto a que tipo de robot se deberá seleccionar, determinando una serie de modelos de los posibles candidatos a considerar.

2.- APLICACIONES DE INGENIERIA.-

Durante esta etapa, los posibles candidatos a utilizar, son estudiados con más detalle. En base a seleccionar una primera aplicación se seleccionará un modelo de robot específico, es decir, se analizarán los requerimientos de "layout", posibles modificaciones del área de trabajo, equipo auxiliar y servicios auxiliares.

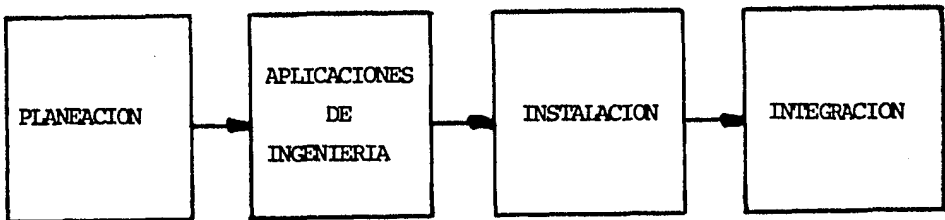
3.- INSTALACION.-

Esta etapa comprende el tiempo desde la preparación del trabajo a ejecutar en el área de trabajo, pasando por la instalación y terminando en la puesta en marcha en la línea de producción.

4.- INTEGRACION.-

Una vez que el robot ha empezado a trabajar, se requiere de un proceso que asegure que continuará ejecutando su trabajo de una manera efectiva. Entre las actividades a realizar durante esta etapa se encuentran las siguientes: mantenimiento, relaciones humanas, pruebas y una constante evaluación de las características del robot con respecto al uso de nuevas tecnologías, así como para la aplicación en nuevas operaciones de manufactura.

El siguiente diagrama de flujo muestra la secuencia de las etapas descritas anteriormente:



PLANEACION

Al igual que en los estudios de máquinas automáticas, la decisión inicial para iniciar la consideración de utilizar robots en determinadas operaciones de manufactura, se inicia teniendo en consideración al personal de ingeniería de manufactura/producción así como al personal directivo de la empresa. Ya que los robots representan una nueva tecnología, se considera necesario evaluar el criterio del gerente general en la decisión inicial de considerar a los robots como herramienta de producción.

A partir de este análisis se puede evaluar la factibilidad de utilizar robots, además de identificar las aplicaciones adecuadas. Sin embargo, esto no proporciona la información necesaria para realizar estudios económicos que demuestren las ventajas que se obtendrán con los robots sobre la mano de obra. Para la realización de esta fase, es recomendable realizar los siguientes pasos: organización del proyecto, definición de objetivos, identificación de posibles aplicaciones de robots, determinación del equipo auxiliar y análisis económico.

a).- Organización del Proyecto

La organización del proyecto consiste en seleccionar al personal que ejecutará la implementación. Generalmente este grupo está integrado por el gerente de planta, gerente de producción y gerente de ingeniería, los cuales deberán participar de una manera activa para asegurar el éxito de la implementación del proyecto.

El gerente de planta deberá encargarse de proporcionar la política de dirección, además de proporcionar cierta información necesaria para el proceso de evaluación. A pesar de que no estará involucrado en los detalles de ingeniería de aplicación e instalación es importante que posea una idea clara de los beneficios y limitaciones que representa la utilización de robots, de tal manera que su decisión pueda considerarse dentro del contexto de los objetivos y normas establecidas con anterioridad. El gerente de producción será el encargado de proporcionar la información referente a las características de cada etapa de la operación de manufactura a considerar, desde el inicio hasta el fin. El gerente de ingeniería deberá estar sumamente relacionado con las características técnicas y de ejecución de los robots, así mismo, deberá estar involucrado en las etapas de aplicaciones de ingeniería e instalación.

b).- Definición de Objetivos

Una vez que se ha integrado al grupo de trabajo encargado de llevar a cabo el estudio del proyecto, será necesario definir los objetivos que deberán cumplir.

Existen una serie de beneficios potenciales que se pueden obtener en la utilización de robots, incluyendo incrementos de productividad, reducción de costos (mano de obra, materiales y otros), productos de mayor calidad, mejoramiento de las condiciones de trabajo o simplemente cambiar la imagen de la empresa en base a utilizar una tecnología sofisticada. Muchas empresas que utilizan robots consideran como objetivo fundamental la reducción de costos. Es importante que los objetivos específicos que persigue el gerente general sean definidos con claridad con el fin de tomarlos como base para la evaluación de las necesidades de utilizar robots. A continuación se presenta una tabla que muestra los factores motivacionales más considerados para la utilización de robots en Estados Unidos y Japón:

| ESTADOS UNIDOS | JAPON |
|------------------------------------|---|
| Reducir costos de mano de obra | Ventajas económicas |
| Mejoramiento de la calidad | Incrementar la seguridad en el trabajo |
| Eliminación de trabajos peligrosos | Univerzalisación de los temas productivos |
| Reducción de Materiales de desecho | Calidad estable en los productos |
| Incrementos de flexibilidad | Disminución de tiempos de fabricación |
| Reducción de turnos de trabajo | |

c) Identificación de las Posibles Aplicaciones del Robot

El siguiente paso consiste en determinar cual área de la empresa se considera factible de automatizar mediante la utilización de robots. El objetivo de esto, es identificar un conjunto de posibles aplicaciones para la utilización de robots. Es importante - considerar el concepto de robot como un todo cuando se examinan las aplicaciones potenciales, ya que la operación de manufactura a realizar deberá ser estudiada como un sistema para ser compatible con el concepto de robot. En este aspecto es muy útil emplear unas formas llamadas listas de inspección para la aplicación de robots en cada aplicación considerada, como lo muestra la figura 1.

En esta forma existe una serie de requerimientos básicos que deberán ser satisfechos para considerar la utilización del robot en una aplicación determinada. Si alguno de estos requerimientos no es satisfecho, es posible pensar que el robot no será la mejor solución, siendo necesario considerar los sistemas rígidos de automatización o el trabajo manual.

Para evaluar la atracción relativa del robot en cada aplicación, se puede aplicar una escala de puntuación para evaluar hasta que punto un robot es capaz de satisfacer cada una de las condiciones anteriores. Asignando un peso apropiado (0-10) a cada una de estas condiciones, se puede determinar la atracción relativa, determinando una puntuación del factor de peso, multiplicando cada uno de ellos por la cantidad obtenida de las mismas y sumando los puntajes resultantes. Este valor proporcionará un método aproximado para indicar en que áreas será factible utilizar robots obteniéndose un beneficio máximo.

Analizando los factores motivacionales para la aplicación de robots, se podrá determinar el conjunto de aplicaciones potenciales por ejemplo, si se desea reducir los costos de desperdicios, se podrá pensar en utilizar robots en operaciones de pintura por aspersión, en donde la evaluación cuantitativa de los desperdicios, puede representar una justificación en la utilización de robots.

Ya que los robots pueden ser utilizados en una amplia variedad de aplicaciones, no sera una operación de manufactura en particular lo que defina donde o no se deberán utilizar robots. Por el contrario, existen un número de factores que deberán ser considerados para cada caso, con el fin de evaluar las ventajas relativas que ofrece el robot sobre los otros métodos de producción (automatización rígida y trabajo manual.)

De una manera general, los robots ofrecen ciertas ventajas sobre el trabajo manual en los siguientes casos:

- 1.- Cuando el robot posee capacidades que el hombre no tiene
- 2.- Cuando los robots pueden ejecutar una tarea mejor que el hombre
- 3.- Cuando existen tareas en las que el hombre no debe ser utilizado

| | PESO | POSIBLES APLICACIONES | | | | | |
|---------------------------------|------|-----------------------|----|-----|----|-----|----|
| | | 1.- | | 2.- | | 3.- | |
| | | SI | NO | SI | NO | SI | NO |
| <u>REQUERIMIENTOS BASICOS</u> | | | | | | | |
| -Medio Ambiente Ordenado | | | | | | | |
| -Operación Repetitiva | | | | | | | |
| -Tiempo de Ciclo de Trabajo | | | | | | | |
| -Manejo de Partes Uniformes | | | | | | | |
| -Percepción Sensorial | | | | | | | |
| -Criterio de Inversión | | | | | | | |
| <u>CARACTERISTICAS DESEADAS</u> | | | | | | | |
| -Medio Ambiente Peligroso | 10 | | | | | | |
| -Operación Monótona | 9 | | | | | | |
| -Manipulación Difícil | 8 | | | | | | |
| -Varios Turnos de Operación | 7 | | | | | | |
| -Volumen Medio de Producción | 7 | | | | | | |
| -Complejidad de la Operación | 6 | | | | | | |
| -Apoyo Gerencial | 4 | | | | | | |
| -Aceptación del Trabajador | 4 | | | | | | |
| -Mejoras en la Productividad | 4 | | | | | | |
| -Mejoras en la Calidad | 3 | | | | | | |
| -Problemas de Instalación | 3 | | | | | | |

FIG 1. - LISTA DE INSPECCION PARA LA APLICACION DE ROBOTS

Las dos primeras consideraciones generalmente se aplican cuando se trata de comparar la utilización de robots con respecto a sistemas de automatización rígida. Sin embargo, es en estos casos en donde la habilidad de los robots para ejecutar tareas normalmente asociadas al hombre, es lo que les da ciertas ventajas sobre la automatización rígida. Los robots pueden ser analizados como un tipo de equipos automáticos que combinan ciertas características de la automatización rígida y la mano de obra. Para determinar cual alternativa de fabricación sera la mejor para una situación particular, se requiere de la consideración de 3 criterios básicos:

- Capacidades.- para terminar cuales seran las capacidades que requiera cada aplicación y cuales seran las ventajas que presentara cada alternativa
- Medio ambiente de trabajo.- determinar cual sera la naturaleza o características del medio ambiente de trabajo en el que se desarrollara cada alternativa
- Ejecución.- tener conocimiento acerca de la manera en que se realizará cada alternativa.

CAPACIDADES.-

En toda empresa manufacturera existen 3 operaciones básicas que pueden ser realizadas sobre los objetos con el fin de lograr la transformación de una serie de materias primas a lo largo de varios procesos para obtener un producto terminado. Primero, las materias primas son transportadas de un punto a otro para ser almacenadas, maquinadas, ensambladas o envasadas. Segundo, son manipuladas, esto es, son insertadas, orientadas o colocadas para estar en una posición adecuada para su maquinado, ensamblado o algunas otras operaciones. Tercero, son supervizadas a lo largo del proceso para asegurar su correcta localización, orientación, dimensiones y composición superficial. Estas tareas pueden ser ejecutadas manualmente o mediante la utilización de máquinas automáticas.

Los primeros equipos automáticos fueron diseñados para eliminar la necesidad de utilizar el trabajo manual para tareas de transporte de objetos. Estos equipos pueden manejar objetos pesados, moverlos más rápido y trabajar durante largos periodos de tiempo sin reducir su ritmo de trabajo. En lo que respecta a las otras dos operaciones, se puede decir que son mejor ejecutadas por el hombre, ya que es capaz de realizar movimientos complejos como los que se requieren en las operaciones de ensamblado. La percepción sensorial es otra de las ventajas del hombre para ejecutar operaciones complejas como el reconocimiento de formas. Muchas operaciones de fabricación que requieren la manipulación de partes, deberan utilizar ciertos sistemas de percepción para determinar piezas mal posicionadas o mal acabadas.

Otra de las capacidades favorables para el hombre, que no ha podido ser superada por las máquinas automáticas es su flexibilidad para cambiar de actividades. La automatización rígida es completamente inflexible para ejecutar una tarea diferente.

El desarrollo de los robots industriales representa una evolución lógica de los equipos automáticos para combinar ciertas - características de la automatización rígida y del trabajo manual. Los robots poseen capacidades de manipulación, capacidades sensoriales limitadas y la versatilidad suficiente para ser reprogramados para la ejecución de tareas diferentes. Al mismo tiempo ofrecen confiabilidad, resistencia y exactitud en la ejecución de sus tareas.

En una empresa completamente automatizada, todas las operaciones de manufactura deberan ser ejecutas por equipos automáticos bajo el control de sistemas computarizados. De esta manera, el robot representa el eslabon que pueda conducir a incrementar la automatización de las fábricas del futuro. Pero los robots no - solo rempazan al ser humano sino que también pueden ser utilizados para ejecutar las operaciones de las máquinas automáticas rígidas.

MEDIO AMBIENTE DE TRABAJO.-

La naturaleza del medio ambiente de trabajo es otra de las características más importantes que se deberan analizar para determinar que tipo de operaciones podran ser realizadas por los robots . Existen ciertos ambientes de trabajo en los cuales los robots pueden representar mayores ventajas sobre la automatización rígida o el trabajo manual. Para analizar este punto es conveniente examinar las siguientes características de manufactura que pueden estar involucradas en la utilización de robots:

-Tipo de operaciones.- una operación de manufactura puede ser ejecutada bajo condiciones de producción en masa, por los lotes o por pedidos, con variaciones en el tiempo de fabricación y en las características de los productos a fabricar. La automatización rígida, dedicada a ejecutar una sola tarea, esta enfocada a la producción en masa, mientras que la mano de obra presenta mayores ventajas en las operaciones de fabricación por pedidos, en las cuales se requiere una alta flexibilidad. Los robots tienden a ser utilizadas para la fabricación por lotes, ya que pueden ser reprogramados para ejecutar diversas tareas en la fabricación de productos diferentes o en otras etapas de la fabricación de un mismo producto.

-Número de turnos.- dependiendo de los volúmenes de producción requeridos, se determinara el número de turnos a trabajar En lo que respecta a los diferentes niveles de automatización, se puede justificar la utilización de cada uno de ellos para un determinado número de turnos. Por ejemplo, la utomatización rígida se justifica para operar en 2 o 3 turnos, obteniendose mayores ventajas que si se utilizara en un solo turno. Los robots pueden ser apropiados para 2 o 3 turnos, ya que los altos tiempos efectivos de trabajo tienden a compensar la relativa lentitud de los robots. Por ejemplo, muchos robots son utilizados en operaciones de carga-descarga de máquinas herramientas durante 3 turnos, mientras que los robots utilizados en la aplicación de pintura son utilizados solamente en un turno. La justificación para utilizar estos robots es la eliminación de ambientes de trabajo desagradables o el mejoramiento de la calidad del - producto, más que la obtención de elevados volúmenes de producción.

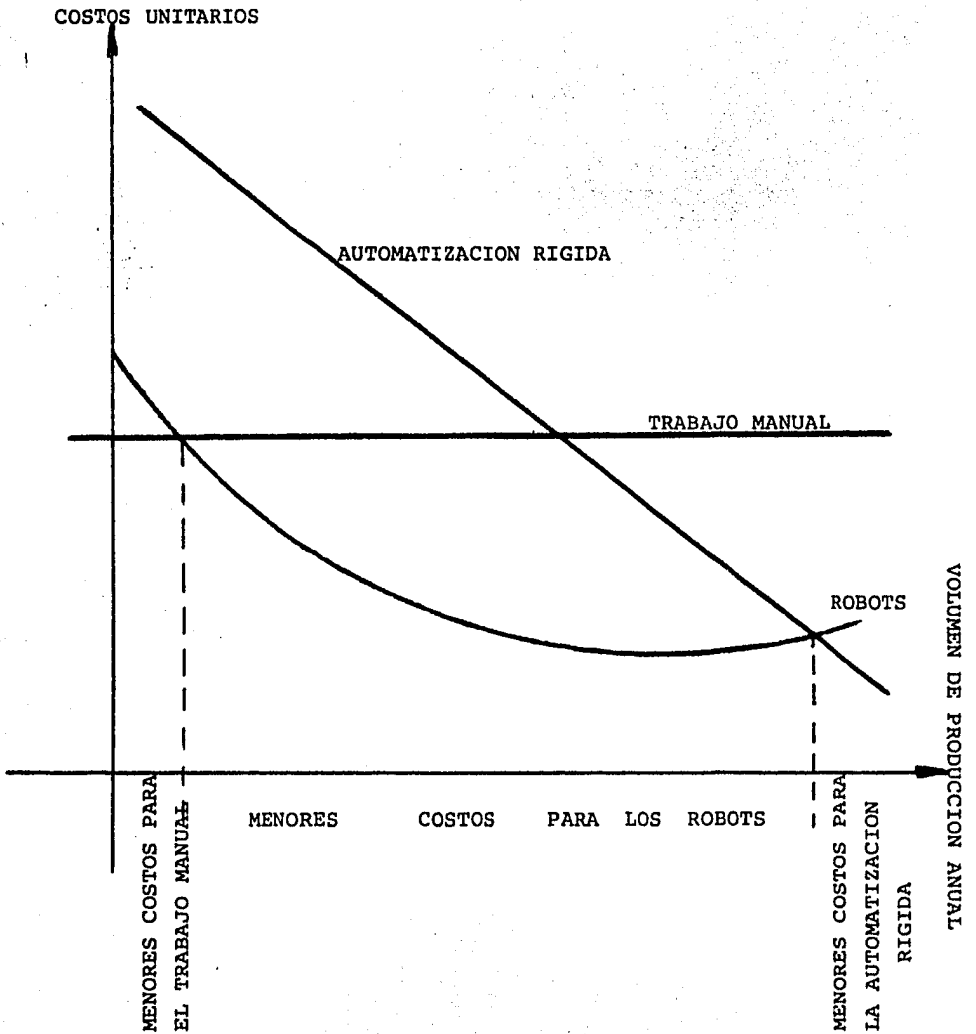
-Complejidad de la tarea.- las operaciones que pueden realizar los robots no son bastantes simples ni demasiado complejas en su ejecución. La complejidad de una tarea puede estar en función del número de pasos que se requieren para la ejecución de un ciclo de trabajo. Por otra parte, algunas operaciones de transporte pueden requerir de un proceso simple de ejecución en donde no se justificaría la utilización de robots, mientras que algunas operaciones requieren de manipulaciones complejas apoyadas en sistemas de percepción sensorial para determinar la posición y orientación de las piezas a manipular, lo cual podría ser ejecutado por robots sofisticados. Las operaciones bastante complejas serán mejor realizadas por el trabajo manual.

-Grado de desorden.- los robots no pueden operar en un medio ambiente desordenado; las partes a manipular deberán estar previamente orientadas y posicionadas. Para un robot simple, su medio ambiente deberá estar perfectamente controlado; para un robot más sofisticado, que posee sistemas de percepción sensorial se puede permitir un cierto grado de desorden ya que el robot es capaz de poder localizar las partes de trabajo, ya sea en bandas transportadoras o cestos, orientado adecuadamente su OT para realizar la sujeción de las piezas de trabajo; por otra parte, le permiten al robot realizar el reconocimiento de formas en operaciones de inspección o control de calidad. A partir de esto, se puede decir que el desorden en el medio ambiente puede ser fatal en el funcionamiento del robot.

-Volumen de Producción.- existen dos factores relacionados al volumen de producción a considerar: el tamaño del lote de producción y el tamaño de la corrida, dependiendo de las características de la empresa. En el caso de pequeños lotes, es necesario tener en cuenta el tiempo que se requiere para realizar los cambios necesarios antes de ejecutar la corrida de un nuevo lote. Un robot puede llegar a ser impráctico cuando los tiempos necesarios para los cambios llegan a ser de aproximadamente del 10% del tiempo requerido para la producción del lote. Para la producción de altos volúmenes de una sola parte durante algún tiempo, es posible considerar la alternativa de utilizar sistemas rígidos de automatización, en lugar de sistemas con robots. Al utilizar sistemas rígidos, los costos efectivos de producción tienden a ser más altos, a medida que disminuyen los volúmenes de producción figura 2. La gráfica de esta curva puede variar para una aplicación particular, sin embargo, los robots proporcionarán los costos efectivos más bajos para volúmenes medios de producción.

-Tasa de Producción.- los robots operan generalmente al mismo ritmo que el ser humano, sin embargo, un robot tipo no-servo (pick and-place) puede operar a velocidades más altas que el hombre. Si una operación requiere de sujetar, transferir y colocar una pieza de trabajo en menos de 3 segundos, se podría decir que un robot no sería capaz de ejecutar dicha tarea. La exactitud de ejecución tiende a disminuir a medida que aumenta la velocidad de trabajo. Los incrementos de productividad resultantes de la utilización de robots no son porque trabajen más rápido, ya que generalmente son más lentos que el hombre, sino porque el tiempo efectivo de trabajo es más alto en los robots, ya que no se requiere de tiempo para comer, descansos, vacaciones o faltas por enfermedad. El robot puede llegar a estar fue-

FIG. 2.- COMPARACION ENTRE COSTOS UNITARIOS/VOLUMEN DE PRODUCCION PARA LOS DIFERENTES METODOS DE FABRICACION



ra de servicio hasta un 4% de su tiempo efectivo debido principalmente a tareas de mantenimiento y reparación. Como un ejemplo del tiempo productivo, se ha visto que en una operación manual de soldadura solamente el 30% del tiempo de trabajo se utiliza en la ejecución de la operación, mientras que el robot utiliza del 70-90%.

-Grado de peligrosidad.- una de las mayores ventajas de los robots en su habilidad para ejecutar tareas en medios ambientes peligrosos. Una de las primeras aplicaciones de los robots fue en la carga-descarga de máquinas de fundición a presión, tarea que es realizada a altas temperaturas, contaminación ambiental, etc. Un ejemplo más claro de este tipo de operaciones es la de pintura por aspersión, en donde las características del medio ambiente justifican la utilización de los robots.

EJECUCION. -

Como tercera consideración para determinar las posibles aplicaciones de los robots se se refieren a la manera en que se ejecutara la tarea. Generalmente los equipos automáticos realizan una tarea determinada mejor que el hombre. Como se ve en la figura 3, tanto la calidad como incrementos en productividad, son obtenidas en la utilización de equipos automáticos. Los robots pueden operar a un nivel más constante de calidad automatización rígida, los robots pueden proporcionar niveles más altos de productividad debido principalmente a una mayor utilización del tiempo de trabajo.

Otra ventaja de la ejecución de una tarea realizada por robots es la relacionada a los costos de operación, ya que existen ciertas operaciones en las cuales la mano de obra llega a ser más cara que los sistemas automáticos de fabricación o viceversa. Lo anterior dependera de los volúmenes de producción a considerar, ya que para la fabricación por pedido, la mano de obra suele ser más barata que los otros sistemas de fabricación.

Una de las mayores ventajas de utilizar robots sobre los otros sistemas de fabricación, es que tienen la capacidad necesaria para controlar la ejecución de su tarea, razón por la cual se utilizan en operaciones de ensamblado ya que tienen que interactuar con el medio ambiente y corregir su funcionamiento. Sin embargo, no podrán ser utilizados en operaciones bastante complejas, ya que se requeriría de robots muy sofisticados.

Finalmente, se puede decir que los robots representan una ventaja potencial en las industrias manufactureras por medio del desarrollo de sistemas de percepción sensorial que le permitan al robot poder llegar a tomar decisiones de ejecución.

d) Análisis de las Especificaciones del Robot

Después de haber obtenido una lista de las posibles aplicaciones del robot, sera necesario obtener una mayor información acerca de las categorías, marcas y modelos de los posibles candi

AUTOMATIZACION ROBOTS TRABAJO
RIGIDA MANUAL

CAPACIDADES

| | | | |
|--------------|--------------|----------|----------|
| TRANSPORTE | EXCELENTE | BUENO | LIMITADO |
| MANIPULACION | DESPRECIABLE | SIMPLE | COMPLEJA |
| SENSIBILIDAD | NINGUNA | LIMITADA | COMPLEJA |
| FLEXIBILIDAD | NINGUNA | MODERADA | ALTA |

CARACTERISTICAS DE PRODUCCION

| | | | |
|-----------------------|------------------|-------------|------------------|
| TIPO DE OPERACION | EN MASA | MASA/LOTE | LOTE/PE- DIDO |
| NUMERO DE TURNOS | 2-3 | 2-3 | 1 |
| COMPLEJIDAD | BAJA | MEDIA | ALTA |
| GRADO DE DESORDEN | ALTO | ALTO | BAJO |
| VOLUMEN DE PRODUCCION | GRANDES CORRIDAS | MEDIANAS | PEQUEÑAS |
| TASA DE PRODUCCION | ALTA | BAJA | BAJA |
| GRADO DE PELIGROSIDAD | NO-LIMITADO | NO-LIMITADO | NINGUNO |

EJECUCION

| | | | |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| CALIDAD | ALTA | ALTA | MEDIA |
| PRODUCTIVIDAD | ALTA | MEDIA | BAJA |
| COSTOS DE OPERACION | BAJOS PARA GRANDES CORRIDAS | BAJOS PARA CORRIDAS MEDIANAS | BAJOS PARA PEQUEÑAS CORRIDAS |

FIG. 3.- COMPARACION DE LOS CRITERIOS BASICOS DE APLICACION PARA DIFERENTES METODOS DE FABRICACION

datos que cumplan con los requisitos para una aplicación determinada.

En general, un robot industrial debe satisfacer 3 requerimientos básicos : ser flexible, confiable y programable. En base a estos aspectos existen una serie de características de funcionamiento específicas de los robots, que también deberán ser analizadas en el momento de adquirir un robot. Entre estas características se pueden mencionar las siguientes :

- Exactitud de Posicionamiento .- se refiere a la habilidad del manipulador para posicionar su OT en un punto específico asignado por su dispositivo de control. Esta exactitud se especifica en un cierto rango (ejemplo $\pm 0.020''$) alrededor de un punto de consigna, dentro del cual se espera que se posicione el centro del OT. La exactitud es una medida significativa solamente en los robots que poseen sistemas de control computarizados. En el caso de una operación de pintura (trayectorias continuas) en donde se utiliza un sistema de programación específico y una vez que la secuencia inicial ha sido programada, será importante considerar la exactitud del manipulador para alcanzar la misma posición varias veces. Esto se conoce como repetición de movimientos.

- Repetición de Movimientos .- esta característica determina que tan capaz es el manipulador de alcanzar una posición específica al repetirse una y otra vez el ciclo de trabajo. Un factor de repetición del $\pm 0.010''$ significa que el OT alcanzara una cierta posición después de varios ciclos, alrededor de $\pm 0.010''$ de la posición original.

- Confiabilidad .- la confiabilidad del robot esta normalmente especificada como un porcentaje del tiempo durante el cual se espera que el robot se encuentre funcionando normalmente. La mayoría de los robots industriales actuales poseen un factor de confiabilidad muy bueno, alrededor del 96-98% lo cual ha sido comprobado en las experiencias de los últimos años.

- Tiempo Promedio antes de Falla .- esto se refiere al número estimado de horas que se espera que un robot opere continuamente antes de que se presente su primera falla y quede fuera de servicio. Algunas compañías constructoras lo estiman alrededor de 200 y 800 horas, con algunos estimados de hasta 2000 horas.

- Capacidades de Carga .- la cantidad de carga útil que podrá manipular un robot durante una operación, es un factor muy importante para determinar el tamaño del robot que se requiera. La capacidad de carga útil es el peso máximo que puede manejar un robot a baja velocidad (dado como un porcentaje de velocidad máxima) y a velocidad normal de operación. Este valor puede variar de 1-2 libras y hasta más de 2000 libras.

- Velocidad del OT .- este es un factor un poco difícil de definir debido a las variaciones del movimiento del brazo, posicionamiento y carga a manejar. Sin embargo, es muy útil compa-

rar las velocidades a las cuales el robot puede mover un objeto de un punto a otro. Las velocidades más comunes de los robots comerciales varían entre 30-60 pulgadas/segundos. Los robots no servo tienden a ser más veloces que los robots servo-controlados.

-Capacidad de Memoria.- la capacidad de memoria en un robot servo-controlado es un factor muy importante, ya que determina la longitud y complejidad del ciclo de operación que podrá realizar el robot. Los robots no-servo no poseen una memoria como normalmente se define. La capacidad de memoria esta definida por el número de pasos o movimientos que podrán ser realizados durante un ciclo de trabajo. La mayoría de los robots comerciales ofrecen una capacidad de memoria de varios cientos de pasos o "puntos". De esta manera, el movimiento de robot servo-controlado punto-a-punto puede ser programado de una manera tan precisa que podrá asemejarse al movimiento de un robot de trayecto rias continuas.

Todas estas especificaciones de ejecución así como otras características de los robots, se pueden resumir en la figura 4, en donde se comparan las 3 categorías básicas de robots.

e) Análisis Económico.-

La parte final durante la etapa de planeación consiste en realizar una serie de análisis económicos que justifiquen la aplicación de los robots en determinadas tareas industriales. En algunos casos existen ciertos factores no-económicos (incrementos de productividad, mejorar la calidad, evitar tareas peligrosas, avances tecnológicos, etc.) que se consideran primordiales para justificar la utilización de robots, aunque a fin de cuentas, es el análisis económico el que determinará su aplicación o no.

El obtener ciertas justificaciones económicas se vuelve importante cuando se trata de hacer una inversión en equipo de 100 a 200 mil dólares. Por otra parte, todos los criterios de justificaciones se pueden dividir en factores económicos y no-económicos, aunque ambos tienen un impacto económico en una determinada inversión.

Las técnicas empleadas para evaluar las justificaciones económicas incluyen análisis de amortización de inversiones, tasa interna de retorno, período de recuperación de la inversión, etc. De una manera general, las técnicas empleadas para el análisis de costos mínimos y análisis de costos de oportunidad.

El análisis de costos mínimos consiste en evaluar los costos generados por las diferentes alternativas, con el fin de seleccionar la que proporcione los costos mínimos. Por ejemplo, si se de sea instalar una línea de producción para una planta automotriz, se deberá realizar una evaluación de las diferentes alternativas de producción existentes, es decir, se deberán considerar los sistemas de mano de obra, sistemas automáticos rígidos y sistemas a base de robots.

FIG. 4.- CARACTERISTICAS DE LOS TIPOS BASICOS DE ROBOTS

| | SERVO | | |
|---|---------------------------|-----------------|-----------------|
| | NO-SERVO | PUNTO-A-PUNTO | TRAYECTORIA |
| | | CONTINUA | |
| RANGO DE PRECIO | - \$ 5000-40000 | \$ 30000-90000 | \$ 50000-130000 |
| GRADOS DE LIBERTAD | 2-5 | 5-6 | 5-6 |
| CONFIGURACION : | | | |
| RECTANGULAR | * | | |
| CILINDRICA | | * | |
| ESFERICA | | * | |
| ARTICULADA | | * | * |
| CAPACIDAD DE CARGA (Lbs.) | 2-100 | varios cientos | 10-30 |
| VELOCIDAD DEL OT (Pulg/seg) | 40-50 | 30-40 | 40-50 |
| APRENDIZAJE | Dispositivos Mecanicos | Microprocesador | Microprocesador |
| CAPACIDAD DE MEMORIA | 20-100 pasos | Varios cientos | 0.5-2 horas |
| PROGRAMACION : | | | |
| MANUAL | * | | |
| DIRECTO | | * | |
| INDIRECTO | | | * |
| TIPO DE ENERGIA: | | | |
| HIDRAULICA | | * | * |
| NEUMATICA | * | | |
| ELECTRICA | * | * | * |
| EXACTITUD DE POSICIONAMIENTO (± pulg) | ± 0.010 | ± 0.040 | ± 0.10 |
| FACTOR DE REPETICION (± pulg) | ± 0.010 | ± 0.040 | ± 0.10 |
| CONFIABILIDAD (%) | 97 | 96 | 95 |
| APLICACIONES TIPICAS; | | | |
| MANEJO DE MATERIALES | * | * | |
| ASPERSION | | * | * |
| SOLDADURA | | * | |
| MAQUINADO | | * | |
| ENSAMBLADO | * | * | |
| INSPECCION | * | * | |

Entre los costos que se deberan considerar para estas alternativas se encuentran los costos iniciales de inversión, costos de operación, costos de actualización de tecnología, costos por equipos de seguridad y costos de instalación.

El otro tipo de análisis es el de los costos de oportunidad, que consiste en realizar un análisis comparativo de las diferentes alternativas con la posibilidad de "no hacer nada" con el fin de evaluar la utilidad que proporcionará cada alternativa. Para lograr esto, existen ciertas técnicas para realizar la evaluación económica de una serie de alternativas de inversión, como son las siguientes:

-Utilidad de la inversión.- es quizá la herramienta más utilizada para comparar las alternativas de inversión. Consiste en evaluar una serie de flujos de caja anuales, teniendo en consideración los ingresos y los egresos posibles. Estos flujos de caja son comparados con una inversión inicial o egreso inicial, con el fin de obtener una tasa de retorno para la inversión, la cual es comparada con el criterio de inversión mínima aceptable para cada alternativa.

-Valor presente neto.- en esta técnica, se considera una serie de flujos anuales decrecientes para cada alternativa, teniendo en consideración la vida útil del proyecto. Este tipo de gradiente es generalmente igual a los costos de respaldo del capital de la compañía, los cuales son generalmente superiores al 20%. Estos flujos de caja decrecientes son sumados y comparados con la inversión inicial. Si la suma es mayor que la inversión inicial entonces, la diferencia entre los dos, representa el valor presente neto de la alternativa. Esta diferencia debe ser positiva para que la compañía la considere como una buena inversión.

-Período de Retorno.- es una medida del tiempo que se requiere para recobrar los costos de la inversión inicial de cada alternativa. Por ejemplo, si este período es de 3 años, significa que la suma de los flujos de caja durante los 3 primeros años, será igual al costo de la inversión inicial. Después de este tiempo, la inversión generará ganancias para la compañía. El período de retorno para la inversión en robots, se puede evaluar de la siguiente manera:

$$P = \frac{R + T}{(L + M - C)(I - t) + D}$$

donde:

- P período de retorno en años
- R costo total del robot
- T impuestos por crédito de la inversión
- L ahorros anuales en costos de materiales
- C costos anuales de operación y mantenimiento
- t tasa de interés
- D depreciación anual
- M ahorros anuales en costos de mano de obra

Esta ecuación es adecuada para cuando el período de retorno varía entre 1 y 2 años. Sin embargo, se puede considerar un período de retorno más realista, utilizando flujos de caja decrecientes, considerando el valor del dinero a través del tiempo. Para los robots industriales, en los cuales el período de retorno es muy corto la ecuación anterior se puede considerar una buena aproximación.

La técnica del valor presente neto proporciona la manera más realista y significativa de evaluar una serie de alternativas de inversión. En el caso de una nueva tecnología, se puede considerar más adecuado el período de retorno para justificar la instalación de robots. Muchas compañías constructoras de robots pretenden establecer un período de retorno de uno o dos años, lo cual ha sido aceptado por la mayoría de las empresas que han utilizado robots.

Para evaluar el valor presente neto en la inversión de un robot particular en una aplicación especial, se puede realizar un análisis financiero como el que se muestra en la figura 5. Este ejemplo muestra que el costo total de la inversión incluyendo accesorios e instalación fue de 120 mil dólares; los ahorros en costos de operación fueron de \$ 52,500 anuales considerando 3 turnos de trabajo y una tasa de depreciación del 10% anual.

En casos actuales se puede considerar una serie de disminuciones de costos, como los siguientes:

- 1.- Mano de obra directa (considerando un trabajador desplazado por robot y por turno)
- 2.- Eliminación de puestos de supervisión
- 3.- Reducción de costos de energía
- 4.- Reducción de costos administrativos
- 5.- Disminución en ciertas áreas de servicios como baños, estacionamiento y comedores
- 6.- Reducción en equipos de seguridad para ciertas áreas

Aunque algunos pueden llegar a representar una cantidad mínima, se es necesario considerarlos para realizar un mejor análisis económico que justifique la utilización de los robots.

Boothroyd {1} desarrolló un modelo de costos más elaborado para evaluar y comparar diferentes alternativas de configuraciones de sistemas robóticos para operaciones de ensamblado. Para lograr éxito, es necesario calcular en promedio una serie de medidas de ejecución, como son envoltentes de trabajo, tiempos de ciclos de operación, tiempos de espera, capacidades de carga, exactitud de posicionamiento, número de estaciones controladas, número de operaciones realizadas y grados de libertad.

APLICACIONES DE INGENIERIA

La siguiente etapa en el proceso de selección de un robot, consiste en determinar que tipo de robot deberá ser adquirido, además de realizar un análisis detallado de ciertas aplicaciones con el fin de preparar lo necesario para su instalación. En esta etapa se pueden considerar los siguientes puntos:

a) Selección de la aplicación inicial

A partir de la lista de las posibles aplicaciones del robot, se procederá a realizar un análisis de cada aplicación con el fin de poder determinar cual será la aplicación inicial que tendrá el robot, en base a considerar los posibles modelos de robots que podrán ejecutar la tarea en estudio. Es muy importante que se seleccione adecuadamente la aplicación inicial, ya que si se comete un error también podrá ser el último. Por otra parte, es mejor seleccionar la aplicación más simple, considerando que los beneficios potenciales que se podrán obtener llegarán a ser razonables. El objetivo que se persigue con una primera instalación de robots, es probar que la nueva tecnología funciona y que puede mejorar significativamente algunos aspectos de la empresa.

Una vez seleccionada una aplicación inicial, deberá ser estudiada con más detalle, documentandola adecuadamente, no en términos humanos, pero si en términos de los resultados finales que se esperan obtener. En esta parte es necesario especificar todos los requerimientos y capacidades que deberá poseer el robot para lograr la ejecución de una tarea determinada. Si en cualquier momento se descubre que una tarea se encuentra fuera de las capacidades del robot, será necesario considerar otra alternativa, siendo importante pensar en todas las posibles limitaciones que pueden llegar a representar las aplicaciones de los robots.

b) Selección del Robot adecuado

Se puede considerar que el proceso de selección de un robot es el mismo que para cualquier otro equipo automático. Para lograr esto será necesario obtener información de varias compañías constructoras para tener una mayor visualización de los modelos disponibles en el mercado. Otro motivo por el cual se deben consultar varias fuentes de información es que muchas veces las capacidades y facilidades de ejecución no llegan a ser tan obvias a primera vista.

Actualmente existen ciertas empresas dedicadas a proporcionar asesoría en el proceso de selección. Muchas veces llega a ser de gran utilidad la demostración de un robot en operación, ya sea en la compañía constructora o en cualquier otra empresa que este utilizando robots en sus líneas de producción, sin embargo, muchas de estas empresas no permiten realizar visitas por considerar su tecnología como una ventaja competitiva con respecto a las demás empresas. Un último recurso sería obtener cierto material audiovisual sobre aplicaciones de robots, para tener una mayor visualización de su ejecución.

Otras técnicas desarrolladas para llevar a cabo la selección de robot, consisten en aplicar las técnicas tradicionales de la Ingeniería Industrial para evaluar diferentes alternativas de funcionamiento para varios modelos de robots. Una técnica básica de predicción para determinar los tiempos de los ciclos de trabajo fue desarrollada por Rogers {2}, quien utilizó los perfiles de velocidades de accionamiento y midió la complejidad en cuanto al número de robots, órganos terminales y herramientas, con el fin de poder evaluar el tiempo de ejecución de un ciclo de trabajo.

Una aproximación más sistemática llamada RTM (Robot Time and Motion) fue desarrollada {3,4,5,6} a partir de los elementos estándar de trabajo (similar al MTM) y mediante la utilización de tablas, ecuaciones de regresión, perfiles de velocidad y modelos geométricos, fue posible a partir de este método, predecir los tiempos de realización de ciertas aplicaciones para una variedad de modelos diferentes de robots. Utilizando este método se pueden comparar las alternativas de los métodos de trabajo con las alternativas de los modelos de robots lo que dará como resultado una mejor selección. El siguiente diagrama de flujo esquematiza el proceso a realizar para la planeación y selección de la mejor alternativa de trabajo para los robots industriales:

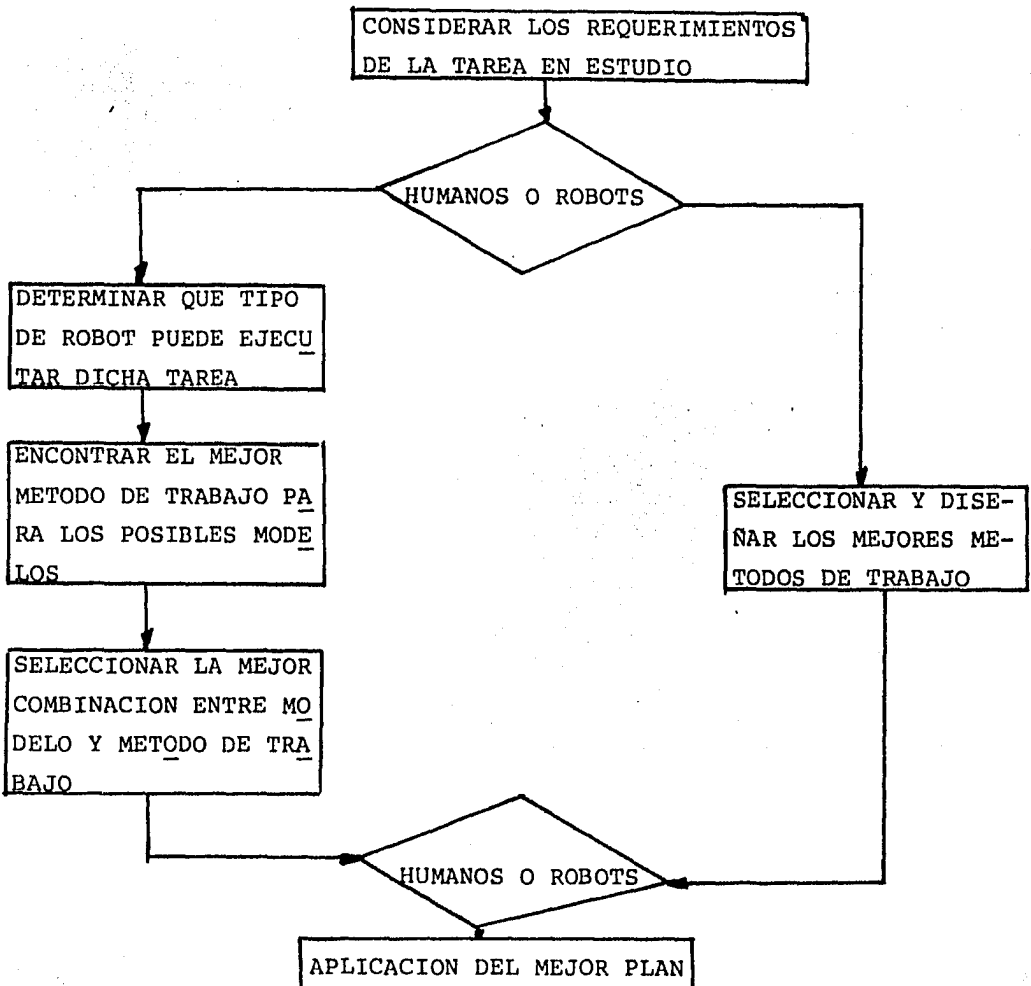


TABLA 1.- ELEMENTOS Y SIMBOLOS DEL SISTEMA MTM

| <u>ELEMENTO</u> | <u>SIMBOLO</u> | <u>DEFINICION</u> |
|-----------------|----------------|--|
| 1 | RA | Alcanzar a un objeto en situación fija, o a un objeto en la otra mano o sobre el cual descansa la otra mano |
| 2 | RB | Alcanzar a un solo objeto en situación que puede variar ligeramente de un ciclo al siguiente |
| 3 | RC | Alcanzar a un objeto amontonado con otros, de forma que ocurra buscar y seleccionar |
| 4 | RD | Alcanzar a un objeto muy pequeño en donde es necesario coger con mucha precisión |
| 5 | RE | Alcanzar a una situación indefinida para poner la mano en posición de equilibrar el cuerpo para realizar el próximo movimiento |
| 6 | MA | Mover el objeto a la otra mano o contra un tope |
| 7 | MB | Mover el objeto a una posición_a proximada o indefinida |
| 8 | MC | Mover el objeto a una posición exacta |
| 9 | GIA | Coger agarrando objetos pequeños medianos o grandes, solitarios y que se puedan coger fácilmente |
| 10 | G1B | Coger un objeto muy pequeño o que yace próximo y sobre una superficie plana |
| 11 | G1C | Coger un objeto cilíndrico con interferencia por debajo y a un lado |
| 12 | G2 | Volver a coger un objeto |
| 13 | G3 | Coger un objeto por transferencia |
| 14 | G4 | Coger un objeto amontonado con otros de tal forma que ocurra buscar y seleccionar |
| 15 | G5 | Coger por contacto, deslizamiento o por gancho |
| 16 | P1 | Posicionar un objeto sin presión |
| 17 | P1, P3S | Posicionar un objeto que requiere gran precisión y simetría |
| 18 | P3SS, P3NS | Posicionar un objeto con precisión y sin simetría |

TAECLA 2.- ELEMENTOS Y SIMBOLOS DEL SISTEMA RTM

| <u>ELEMENTO</u> | <u>SIMBOLO</u> | <u>DEFINICION</u> |
|-----------------|----------------|---|
| 1 | Rn | Alcance de n-segmentos: mover al manipulador sin carga a lo largo de una trayectoria de n-segmentos |
| 2 | Mn | Mover n-segmentos: mover un objeto a través de una trayectoria de n-segmentos |
| 3 | ORn | Orientación de n-segmentos: mover al manipulador hacia una orientación específica |
| 4 | SE1 | Paro en error de posición: |
| 4.1 | SE1 | Detener al manipulador inmediatamente, sin esperar anular los errores de articulación |
| 4.2 | SE2 | Detener al manipulador dentro de una posición específica con una tolerancia de error |
| 5 | SF1 | Detener en fuerza o momento: |
| 5.1 | SF1 | Detener al manipulador en presencia de fuerza específicas |
| 5.2 | SF2 | Detener al manipulador en presencia de pares de fuerza |
| 5.3 | SF3 | Detener al manipulador en presencia de pares de fuerzas o de fuerzas |
| 5.4 | SF4 | Detener al manipulador al entrar en contacto con un objeto |
| 6 | VI | Movimientos relativos a sistemas de visión artificial |
| 7 | GR1 | Sujeción de un objeto: |
| 7.1 | GR1 | Sujeción de un objeto mediante el cerrado simple de dos dedos |
| 7.2 | GR2 | Sujeción de un objeto centrando el OT sobre él |
| 7.3 | GR3 | Sujeción de un objeto cerrando uno por uno de los dedos |
| 8 | RE | Soltar un objeto abriendo los dedos del OT |
| 9 | T | Tiempo de demora cuando el robot es parte del proceso |
| 10 | D | Tiempo de demora cuando el robot es para para la terminación de un proceso |

TABLA 3.- EQUIVALENCIA DE LOS ELEMENTOS DE TRABAJO ENTRE LOS SISTEMAS RTM Y MTM (6)

| <u>SISTEMA MTM</u> | <u>SISTEMA RTM</u> |
|--------------------|--------------------|
| RA | Rn, SE |
| RB | Rn, SE, SF |
| RC | # |
| RD | Rn, SE, VI, SF |
| RE | Rn, SE |
| MA | # |
| MB | Mn |
| MC | Mn, SF |
| G1A | GR |
| G1B | SF, ST |
| G1C | # |
| G2 | # |
| G3 | SE, SF, RE |
| G4 | # |
| G5 | GR |
| P1 | SF |
| P1 y P3S | SF, M1, SF |
| P3SS y P3NS | Sf, M1 |

imposible de realizarse por un robot
RTM para el caso del manipulador Stanford:

TABLA PARA EL ELEMENTO ALCANCE (Rn)

| Distancia (cm) | Tiempo | | | | | Descripción |
|-------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|--|
| | número de segmentos (n) | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 1 | 0.4 | 0.7 | 1.1 | 1.5 | 1.9 | Mover al manipulador la distancia indicada ; el elemento Rn debe ser seguido por los elementos SE o SF |
| 30 | 0.5 | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 1.9 | |
| 100 | 0.7 | 0.9 | 1.3 | 1.7 | 2.0 | |

TABLA PARA EL ELEMENTO ORIENTACION (ORI)

| Angulo (grados) | Tiempo (seg) | | | | |
|--------------------|--------------------|------|------|------|-------|
| | Velocidad (cm/seg) | | | | |
| 15 | 5.0 | 12.5 | 25.0 | 50.0 | 100.0 |
| | 3.0 | 1.4 | 0.8 | 0.6 | 0.6 |
| 60 | 10.8 | 4.6 | 2.5 | 1.5 | 0.9 |
| 120 | 21.3 | 8.7 | 4.6 | 2.5 | 1.4 |

c) Estudio de los Requerimientos de la Aplicación Inicial

Una vez seleccionado el robot, será necesario estudiar a fondo la aplicación correspondiente, con el fin de preparar lo necesario para llevar a cabo la instalación del robot. Se deberá determinar el layout necesario, utilizando si es posible, un modelo a escala que considere los requerimientos de ingeniería que se necesitarán para ejecutar la instalación. Entre las áreas que se deben estudiar, están las siguientes:

-Sistemas de protección para el robot contra características - peligrosas del medio ambiente de trabajo como contaminación ambiental (polvo, gases), partículas de metal, calor, efectos corrosivos, etc.

-Obstáculos e interferencias que impidan el movimiento del brazo del manipulador

Requerimientos de interfaces entre el robot y otras máquinas, bandas transportadoras, computadoras y otros dispositivos

-Requerimientos de herramental como accesorios especiales o cambios de herramientas para localizar una pieza de trabajo en una posición precisa en relación al robot

-Áreas de seguridad para el personal que trabaje en el área del robot

-Requerimientos de servicios auxiliares

-Facilidades para cambios en equipo o modificaciones al "layout"

De la misma manera que existen 3 formas de relajar un "layout" para lograr la distribución del equipo (por proceso, por producto y punto fijo), también existen 3 arreglos diferentes para los sistemas de fabricación que utilizan robots:

- 1.- El área de trabajo rodea al robot.- el robot permanece fijo mientras que las demás máquinas se encuentran dispuestas al rededor del robot.
- 2.- El trabajo se mueve hacia el robot a lo largo de la línea de producción.- en estos arreglos las piezas de trabajo se mueven por medio de bandas transportadoras, mientras que el robot permanece fijo
- 3.- El robot se mueve hacia el trabajo.- el robot está provisto de sistemas de locomoción (vías o rieles) para dirigirse hacia la pieza de trabajo, como en el caso de manejo de cargas o transferencia de partes.

Finalmente, se puede decir que la etapa de aplicaciones de ingeniería es muy importante en el proceso de implementación del robot, por lo que será necesario contar con dicha función en una planta que desee introducir robots en sus líneas de producción.

INSTALACION

La etapa de instalación de un robot se puede analizar teniendo en consideración los siguientes puntos:

a) Preparación para la Instalación

Esta etapa consiste básicamente en determinar las facilidades, equipo y trabajadores que se requirieran para llevar a cabo dicha función. Es muy importante preparar los servicios y requerimientos de espacio, así como las interfaces que se necesitaran para el funcionamiento del robot. Es necesario considerar todos los cambios realizados durante el diseño del producto, así como las modificaciones realizadas en el diagrama de flujo de fabricación antes de llevar a cabo la instalación del sistema.

El área de trabajo debiera ser diseñada teniendo en consideración la localización del equipo auxiliar, además de considerar posibles cambios en el arreglo del equipo, como sucede en las operaciones de manejo de materiales y soldadura. Otro aspecto importante a considerar, es el diseño y adquisición de las herramientas de trabajo que deberan ser colocadas en el OT para la ejecución de la tarea en estudio. Esto se puede realizar en colaboración con la compañía constructora, con el fin de obtener la asesoría adecuada para lograr tal objetivo.

Cuando se tiene en consideración llevar a cabo la instalación de un robot, es muy importante tener en cuenta las necesidades de seguridad, principalmente cuando las operaciones a realizar se encuentran en ambientes peligrosos, con el fin de reducir o eliminar los accidentes de trabajo.

Es muy importante que todas las personas que estan involucradas en el funcionamiento del robot, sean estrictamente entrenadas en relación a las capacidades, operación y programación, además del mantenimiento que necesitara el robot. Por lo menos dos personas, incluyendo personal de mantenimiento, jefes de producción, trabajadores y en algunos casos, el gerente de la planta, deberan tomar un programa de entrenamiento de 3-5 días, los cuales, generalmente son proporcionados por las compañías constructoras. Estos programas de entrenamiento son muy importantes ya que no existe una estandarización de las capacidades de funcionamiento de los robots.

b) Instalación y Puesta en Marcha

Una vez realizadas todas las preparaciones necesarias para llevar a cabo la instalación, se podra proceder de una manera más fácil a su ejecución. Muchas compañías constructoras ofrecen generalmente asesoría durante la instalación, siendo de gran utilidad la participación del personal que trabajara con el robot, con el fin de obtener una mayor familiarización. Por otra parte, algunas compañías prefieren realizar una serie de pruebas durante varios días, antes de instalar al robot a la línea de producción.

Ya que el robot no posee una curva de aprendizaje similar a la del ser humano, sera necesario considerar un periodo de puesta en marcha para resolver los problemas que se puedan presentar al inicio de su funcionamiento. Algunos de los problemas que se presentan durante la etapa de instalación son los relacionados a la

programación, por lo que será necesario aprovechar al máximo los programas de entrenamiento para poder resolver estos problemas.

Los tiempos de instalación para la mayoría de los robots varían de 3-4 días hasta 90-100 días. Una instalación típica requiere un tiempo total de aproximadamente 3 semanas, tiempo que representa gastos para la empresa al igual que el tiempo que se requiere para que el robot alcance un nivel de producción del 100%

INTEGRACION

Una vez que el robot ha empezado a trabajar, se inicia el período de integración del robot al medio ambiente de trabajo, durante el cual se transforma la imagen que se tiene del robot a una imagen aceptada como un equipo estandar de producción. Es un poco difícil estimar el tiempo de duración de esta fase. La primera parte se inicia con la supervisión del robot para observar los problemas que se puedan presentar (tiempos muertos, interferencias, etc.) además de evaluar la aceptación del robot por parte del personal de la empresa. Es decir, esta etapa consiste básicamente en vigilar el funcionamiento del robot con el fin de asegurar que se obtendrán los resultados establecidos al inicio del proyecto.

Otra parte de la fase de integración, consiste en realizar una serie de operaciones de mantenimiento para asegurar que la empresa podrá resolver los problemas que se presenten sin tener que recurrir a los servicios que la compañía constructora puede proporcionar. Al igual que toda compañía de este tipo, ofrece una variedad de servicios que pueden consistir desde proporcionar una pequeña pieza para un equipo especializado hasta la reparación completa de un sistema de robots.

El diseño de un sistema integrado por robots puede incluir un estudio de factibilidad, servicios de ingeniería, instalación, métodos de programación, interfaces con otros equipos, fabricación de herramientas y diferentes programas de entrenamiento. La figura 6 muestra una serie de servicios proporcionados por las empresas manufactureras de robots.

Un problema que se presenta con respecto a los programas de mantenimiento es que los robots poseen una alta confiabilidad, por lo que es un poco difícil para este departamento, mantener un cierto nivel de destreza. Una manera de resolver esto, es programando ciertos períodos para tareas de mantenimiento con el fin de que el personal pueda checar tanto sus habilidades como el funcionamiento del robot.

Otra actividad desarrollada durante esta etapa es la constante búsqueda de formas para actualizar al sistema, ya sea mediante la programación para la ejecución de nuevas tareas, integrando nuevos desarrollos tecnológicos o mediante la integración del robot a los llamados Sistemas Flexibles de Fabricación que consisten en agrupar un cierto número de robots en celdas de trabajo que permitan la fabricación de pequeños lotes y productos variados, ampliando con esto, el campo de aplicación de los robots industriales.

| COMPANIA MANUFACTURERA | SERVICIOS | DEMOSTRACIONES | PROGRAMAS DE ENTRENAMIENTO | ARRENDAMIENTOS | GARANTIA. (MESES) | CONTRATOS DE SERVICIOS | CENTROS DE SERVICIO | TIEMPO DE ENTREGA (SEMANAS) | PRIMERA INSTALACION | NUMERO DE ROBOTS INSTALADOS |
|------------------------|-----------|----------------|----------------------------|----------------|-------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| ADVANCED ROBOTIC CORP. | * | * | * | 12 | * | 5 | 26 | 1976 | 85 | |
| AMERICAN ROBOT CORP. | | * | | 3 | * | 2 | 18 | 1981 | # | |
| ASEA | * | * | * | 12 | * | 2 | 20 | 1973 | 1000 | |
| AUTOMATION CORP. | * | | * | 12 | * | 1 | 16-20 | 1973 | 0 | |
| AUTOMATIX INC. | * | * | * | 3 | * | 5 | 8-12 | 1980 | 12 | |
| BINKS | * | * | | 12 | * | 2 | STOCK | 1975 | 1 | |
| CINCINNATI MILACRON | * | * | * | 12 | | 12 | 20 | 1973 | # | |
| COPERWELD ROBOTICS | * | * | * | 12 | * | 2 | 12 | 1968 | # | |
| CYBOTECH CORP. | * | * | * | 12 | * | 1 | 24-36 | 1975 | 300 | |
| DEVILBISS CO. | * | * | * | 12 | * | 9 | 12-24 | 1972 | 900 | |
| GAMETICS | | * | | 12 | | 1 | 16-20 | 1972 | 27 | |
| GENERAL ELECTRIC | * | * | * | 12 | * | 62 | 8 | 1975 | 251 | |
| GENERAL NUMERIC CORP. | * | * | | 12 | * | 10 | 16-20 | 1973 | # | |
| HOBART BROTHERS | * | * | * | 12 | * | 2 | 20 | 1980 | 500 | |
| HODGES | * | * | * | 12 | * | 2 | 8 | 1981 | 2 | |
| INDUSTRIAL AUTOMATES | | | | 6 | * | 2 | 4 | 1973 | # | |
| MANCA INC. | | | | 6 | | 2 | 4-6 | 1970 | 400 | |
| MOBOT CORP. | | * | * | 12 | * | 3 | 20 | 1974 | 102 | |
| NORDSON CORP. | * | * | * | 12 | | 1 | 10-16 | 1979 | 50 | |
| PICK-O-MATIC | | | | 12 | | 2 | 8 | 1974 | 2000 | |
| PLANETCARMAX | * | * | * | 12 | * | 4 | 16-20 | 1956 | 2 | |
| PRAB ROBOTS | * | * | | 12 | | 3 | 12-24 | 1958 | 800 | |
| REIS MACHINES | * | * | | 12 | | 1 | 16 | 1981 | 22 | |
| ROB-CON | * | * | | 12 | * | 2 | 20-22 | 1975 | 40 | |
| SEIKO INSTRUMENTS | * | * | | 12 | | 15-20 | 2 | 1968 | 3000 | |
| STERLING DETROIT CO. | * | * | * | 6 | | 1 | 10-12 | 1968 | 510 | |
| THERMWOOD | * | * | * | 12 | | 3 | 14-16 | 1980 | # | |
| UNIMATION INC. | * | * | * | 12 | * | 16 | 4-20 | 1961 | 3600 | |
| UNITED STATES ROBOT | * | * | * | 12 | | 2 | 16 | 1981 | 5 | |

Información no disponible

FIG. 6.- COMPANIAS MANUFACTURERAS INSTALADAS EN ESTADOS UNIDOS

Una manera de lograr una mayor utilización de los robots en procesos de fabricación complejos es a través del mejoramiento de las capacidades de funcionamiento del robot. Entre estas capacidades se pueden mencionar las siguientes : exactitud de posicionamiento, confiabilidad, capacidad de carga y diseño de herramientas. Aunque son capaces de lograr exactitudes del orden de 0.010", manipular cargas entre cientos y miles de libras y ejecutar secuencias de movimientos que requieren de cientos de pasos ; no son capaces de realizar tareas de ensamblado complejas u operaciones de máquina que requieren un alto grado de exactitud y características sensoriales, por lo que será necesario en un futuro próximo lograr un mejoramiento en ciertas características de funcionamiento del robot, como pueden ser las siguientes :

- Sistemas de Percepción Sensorial Efectivos y a Bajo costo.-
Una de las mayores limitaciones de los robots para la ejecución de tareas que requieran una localización, orientación y reconocimiento de la pieza de trabajo, es la falta de un sistema de percepción sensorial efectivo y a bajo costo. Más aún, el software que se requiere para analizar la información procedente de los sensores, no se encuentra aún desarrollado.

- Estandarización de la Programación.-
Uno de los mayores problemas que se presentan en la utilización de los robots, es lo relacionado a la etapa de programación, ya que el tiempo que se requiere para programar al robot para una nueva tarea, llega a ser muy alto, debido a la falta de lenguajes estandarizados de programación para cada nivel de aplicación del robot. Otro aspecto a lograr sería el desarrollo de ciertos lenguajes que permitan una mejor interfase con los sistemas de fabricación por computadora (Computer-aided-manufacturing).

-Reducción de los Costos del Equipo.-
Aunque los precios de los robots se han mantenido constantes durante los últimos años, los precios en promedio para la instalación de un robot típico se consideran altos, debido principalmente a los períodos de retorno muy cortos que se requieren para justificar una inversión en bienes de capital. Estos precios podrán disminuir en el futuro si se consideran altos volúmenes de ventas y mejoramientos en los equipos de control y programación.

A fin de cuentas, es posible considerar una mayor oferta en líneas de robots, lo que se podrá traducir en una caída considerable en los precios. Si el precio actual de un robot servo-controlado es de 60 000 dólares, se podrá conseguir en 10 000 dólares para 1990 lo que equivaldría a tener una demanda de 200 000 unidades {9} anuales, según estadísticas proporcionadas por la RIA.

4.- APLICACIONES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES

El número de aplicaciones diferentes para las cuales los robots están siendo utilizados, aumentan cada día, al igual que el número de modelos disponibles en el mercado. Su utilización depende de las características del proceso de manufactura y de la naturaleza del producto a fabricar, por lo que su utilización se ha expandido a una gran variedad de tareas industriales.

Las aplicaciones específicas para las cuales los robots se están utilizando, son aquellas en las cuales ofrecen ciertas ventajas con respecto a la mano de obra o a la automatización rígida. Generalmente, los robots ofrecen ciertas ventajas en procesos de manufactura que se caracterizan por un alto grado de orden, simplicidad, repetición, flexibilidad y volúmenes medios de producción. A partir de estas consideraciones, se están utilizando en operaciones de carga-descarga de máquinas-herramientas, manejo de materiales, soldadura, pintura por aspersión, operaciones de maquinado y muchas otras aplicaciones.

Los robots son máquinas automáticas que se pueden mover y manipular ciertos objetos sin la ayuda del hombre. Pueden ser programados para ejecutar una variedad de tareas y en algunos casos, pueden interactuar con su medio ambiente a través de sistemas de percepción sensorial, lo que les permite realizar ajustes en la ejecución de su tarea. Sus capacidades le permiten ejecutar una variedad de tareas normalmente asociadas con el trabajo manual. Al mismo tiempo poseen características de la automatización rígida, por lo que su campo de aplicación es muy amplio. Los robots se pueden aplicar en operaciones de maquinado al igual que en operaciones de manejo de partes. Las operaciones de maquinado incluyen aquellas en las cuales una parte o sub-ensamble son alterados por el robot mediante la utilización de una herramienta, tales como desbarbado o conformado. Los movimientos que se requieren para la ejecución de estas aplicaciones tienden a ser muy complejos, por lo que se requiere de la utilización de un robot tipo servo-controlado de trayectorias continuas o punto-a-punto, los cuales poseen una capacidad de memoria suficiente para ejecutar dichas operaciones.

Las operaciones de manejo de partes son aquellas en las cuales las partes o ensamblados son transportados de un lugar a otro mediante desplazamientos que generalmente se realizan en línea recta, tal como la transferencia de una parte localizada en una banda transportadora hacia otro punto, requiriendo solamente de movimientos en 2 o 3 dimensiones. Estas operaciones son frecuentemente realizadas por robots tipo no-servo tales como el Prab, Seiko o Auto-Place. Algunas operaciones de manejo de partes llegan a ser más complejas, requiriendo de una capacidad de manipulación más elevada; como las operaciones de carga-descarga de máquinas-herramientas, pallería, fundición a presión y operaciones simples de ensamblado. Estas operaciones son realizadas por robots servo-controlados punto-a-punto, tales como los Unimate, Cincinnati Milacron, ASEA y otros.

De una manera general, se pueden considerar 3 categorías básicas de aplicaciones para las cuales los robots son factibles de utilizarse, tomando en consideración la forma de controlar y programar la ejecución de sus trayectorias de trabajo: trayectorias punto-a-punto, trayectorias continuas y control perceptual

La figura 1 muestra las aplicaciones que pertenecen a cada una de las categorías mencionadas anteriormente.

TRAYECTORIAS PUNTO-A-PUNTO. -

Los robots de trayectorias punto-apunto están siendo utilizados en una amplia variedad de aplicaciones industriales como manejo de materiales, carga-descarga de máquinas-herramientas y operaciones simples de ensamblado. La programación inicial de este tipo de robots que utilizan el método "grabar-reproducir" para el aprendizaje y operación, es relativamente fácil y rápido; sin embargo, no se pueden realizar modificaciones en las posiciones programadas durante la ejecución del programa. La gráfica a través de la cual, los diferentes elementos del manipulador se deberán de mover al pasar de un punto a otro, no es programada o controlada directamente, y en algunos casos puede ser diferente de la gráfica obtenida durante el aprendizaje.

Ya que utilizan controles de secuenciador/potenciómetro tienden a ser más tediosos para su programación; sin embargo, se pueden modificar las posiciones programadas, ajustando simplemente los potenciómetros. Este tipo de robots poseen sistemas de control de alta capacidad con acceso aleatorio a programas múltiples, subrutinas, alternativas de acción, que proporcionan al usuario una mayor flexibilidad, lo que los coloca en el primer lugar de aplicación, en cuanto a las capacidades de carga y rangos de trabajo.

Entre los tipos básicos de aplicaciones que se consideran dentro de esta categoría básica, se pueden mencionar las siguientes:

Manejo de Materiales.-

Los robots "(pick and place)" son generalmente utilizados para operaciones de manufactura que requieren del movimiento de objetos de una posición a otra. Estas operaciones incluyen aplicaciones tales como transferencia de partes de una banda transportadora a otra, transferencia de placas de vidrio (utilizando una herramienta de succión) de una línea de producción a una banda transportadora, transferencia de arenas de fundición de una línea de fundición hacia una banda transportadora, pailería, manejo de partes metálicas para tratamientos térmicos y muchas otras más. Esta fue una de las primeras aplicaciones de los robots industriales y es en esta área en donde la definición de robot se llega a hacer confusa con la definición de un sistema manejo de materiales.

Como se puede ver en la figura 1, esta operación hace uso de las capacidades de manipulación y de las capacidades básicas de transporte, en mayor grado. El movimiento puede realizarse en 2

FIG. 1.- CATEGORIAS BASICAS DE APLICACIONES INDUSTRIALES

| APLICACION | EJEMPLO | CAPACIDADES DEL ROBOT | | | | BENEFICIOS OBTENIDOS | | |
|----------------------|--|-----------------------|--------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|--|
| | | TRANSPORTE | MANIPULACION | PERCEPCION SENSORIAL | CALIDAD PRODUCTIVIDAD | REDUCCION DE COSTOS | ELIMINACION DE TRABAJOS PELIGROSOS | |
| MANEJO DE MATERIALES | MANEJO DE PARTES | * | | | | * | * | |
| | PAILERIA TRANSPORTE TRATAMIENTOS TERMICOS CARGA-DESCARGA DE MAQUINAS PRENSAS AUTOMATICAS, TORNOS | * | * | | * | * | | |
| ASPERSION | PINTURA APLICACION DE RESINAS | | * | | * | * | * | |
| SOLDADO | POR PUNTOS ELECTRICOS | | * | | * | * | * | |
| MAQUINADO | TALADRADO | | * | * | * | * | | |
| | DESBARBADO | | | | | | | |
| | CORTE | | | | | | | |
| | CONFORMADO ESMERILLADO CONTORNEADO | | | | | | | |
| ENSAMBLADO | ACOPLAMIENTO SUJECION | | * | * | * | * | | |
| INSPECCION | CONTROL DE POSICION | | | * | * | | | |
| ACABADOS | PULIDO | | | * | * | | | |

o 3 dimensiones con un robot fijo en el piso o integrado a sistemas de locomoción (vías o rieles) para desplazarse de una estación de trabajo a otra.

Entre las ventajas que se pueden obtener al utilizar robots en este tipo de aplicaciones es la reducción de los costos de mano de obra directa y eliminar la necesidad de utilizarla en trabajos tediosos, exhaustivos o peligrosos. Por ejemplo, es indeseable utilizarla cuando el objeto a transferir es pesado, caliente, frágil o de composición química peligrosa. Sin embargo, en ciertos sistemas de fabricación, algunas veces es más recomendable utilizar sistemas de automatización rígida con respecto a los robots.

Dentro de este tipo básico de aplicaciones, se puede mencionar la operación carga-descarga de máquinas-herramientas, en la cual, el robot es capaz de sujetar una pieza de trabajo localizada en una banda transportadora, alimentarla a una máquina, para posteriormente descargarla y transferirla a otra línea de producción. Un "layout" típico de una estación de trabajo completamente automática, se presenta en la figura 2. La gran eficiencia de esta operación elimina la necesidad de utilizar mano de obra directa. Otro de los mayores beneficios que se obtienen en este tipo de operaciones, es el incremento de productividad debido principalmente al aumento en el tiempo efectivo de trabajo que desarrolla el robot en una jornada de trabajo.

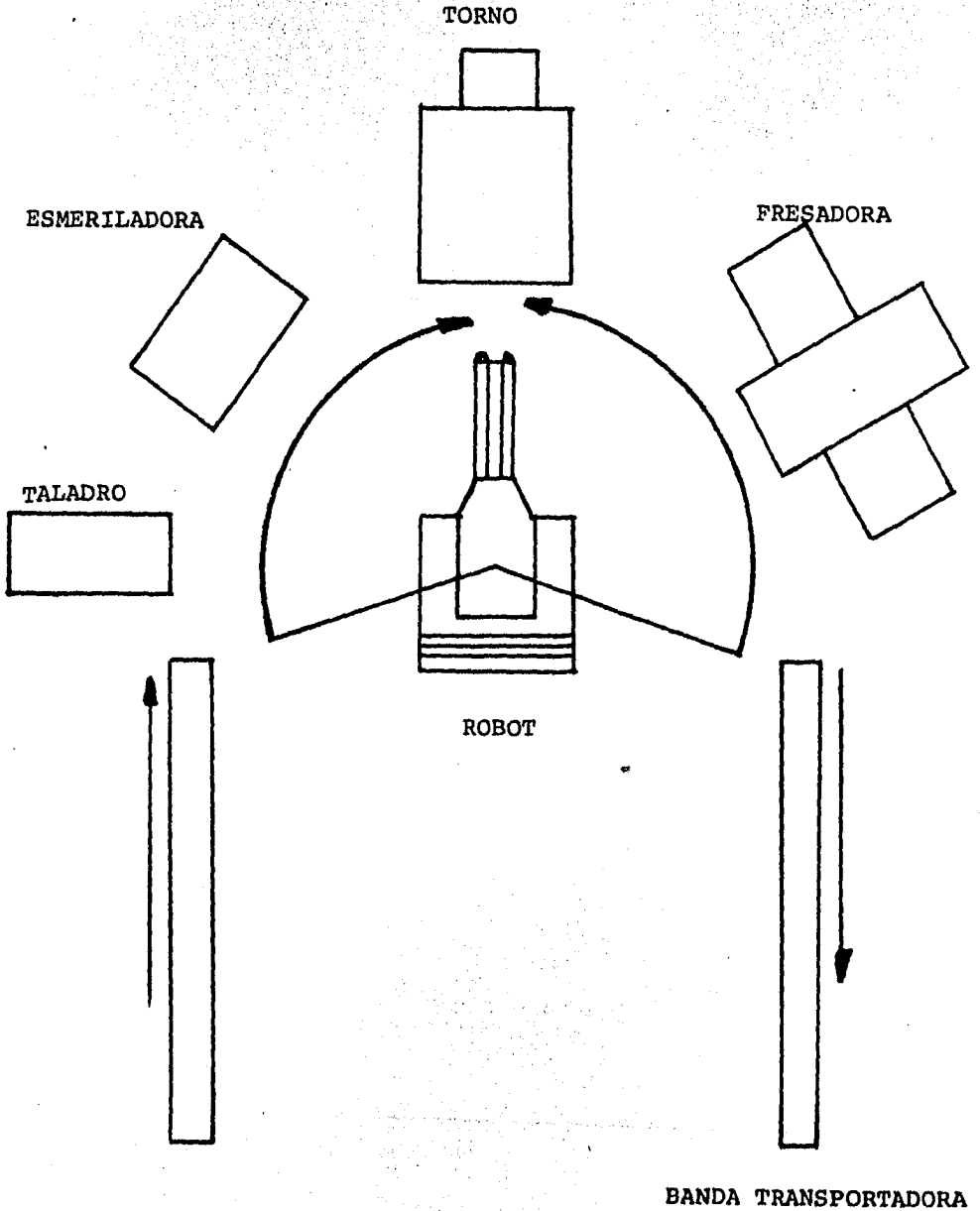
En este tipo de operaciones, tanto la capacidad de manipulación como la de transporte, aumentan la factibilidad de utilizar a los robots con respecto a los otros sistemas de producción existentes. Un ejemplo de este tipo de robots sería el modelo Prab 4200-E.

TRAYECTORIAS CONTINUAS.-

El método de programación utilizado en los robots de trayectorias continuas, involucra el movimiento físico del OT a través de la trayectoria deseada, mediante el muestreo y grabación automática de la información referente a cada una de las posiciones de los puntos que integran dicha trayectoria. La velocidad del manipulador durante la realización del programa puede ser diferente de la velocidad a la cual se llevara a cabo la ejecución de la trayectoria de trabajo.

Para crear una trayectoria continua que, en el momento de la ejecución acople a todas las posiciones que la componen, será necesario añadir varios puntos intermedios; en el momento de la ejecución, el operador se encargará de elaborar una trayectoria que pase por los puntos programados, obteniéndose además, los tiempos de desplazamiento mínimos. En algunas ocasiones, las trayectorias no son las más adecuadas, ya que existen algunos obstáculos que impiden la ejecución de la tarea, siendo necesario deformar la trayectoria e intercalar puntos de paso, cuya finalidad es justamente, crear una zona de paso.

FIG. 2.- CENTRO AUTOMATICO DE MAQUINADO



En el registro de las trayectorias continuas, el operador desplaza al manipulador, mientras que el programador registra periódicamente cada una de las posiciones que integraran la trayectoria. Esto conduce a almacenar una gran cantidad de información, por lo que será necesario utilizar las técnicas de compactación de información para no utilizar una gran cantidad de memoria en el momento de la programación.

Entre los tipos básicos de aplicaciones que se pueden considerar dentro de esta categoría básica se encuentran las siguientes:

Aspersión.-

En las aplicaciones relacionadas a procesos de manufactura, el robot es capaz de tomar una herramienta y realizar una cierta operación sobre una pieza de trabajo, con el fin de realizar ciertas modificaciones en su constitución o forma. Estas aplicaciones se caracterizan por la necesidad de un adecuado sistema de control de movimiento. Por esta razón, los robots servo-controlados de trayectorias continuas, son los más utilizados en este tipo de operaciones. Una aplicación típica, es la aspersión de ciertos materiales como pintura, colorantes, capas de asfalto, polvos plásticos, y en general para cualquier material líquido o en polvo. Los robots aplican estos materiales utilizando equipos de aspersión electrostáticos o por aire, a una amplia variedad de partes, tales como carrocerías de automóviles, muebles o herramientas. Generalmente, las partes de trabajo entran a la área de aspersión por medio de bandas transportadora o líneas para el transporte de piezas, de tal manera que se coordinan sus movimientos con la secuencia de movimientos que integran la trayectoria de trabajo.

En este tipo de aplicaciones, la capacidad de manipulación es sumamente importante. Uno de los mayores beneficios que se obtienen al utilizar robots en este tipo de operaciones, es elevar la calidad del producto, gracias a una aplicación más uniforme del material sobre la pieza de trabajo. Otras ventajas consisten en reducir los costos de mano de obra, elevación del tiempo efectivo de trabajo y la reducción de los desperdicios de material. Sin embargo, una de las mayores ventajas, es la de eliminar los puestos de trabajo que se encuentran en contacto con materiales tóxicos; es por esta ventaja que fue una de las primeras aplicaciones de los robots, ya que proporcionaba condiciones de trabajo más saludables.

Una de las aplicaciones más recientes de los robots en este tipo de operaciones, es la aplicación de resinas plásticas y fibra de vidrio a los moldes que se utilizan durante los procesos de fabricación de vidrio y productos de plástico reforzado.

Soldado.-

Una de las mayores aplicaciones de los robots dentro de los procesos de manufactura es la soldadura; dentro de la cual, la soldadura por puntos en las carrocerías de automóviles, es una de las que ocupa un mayor campo de aplicación. Este tipo de aplica

ción es realizada generalmente por un robot servo-controlado mediante un soplete para soldadura. Al igual que en las operaciones de aspersión, los robots pueden reducir los costos de mano de obra. La reducción de costos también se obtiene gracias a -- que el robot es capaz de aplicar la soldadura donde y cuando se requiere, reduciendo posibles desperdicios.

Más aún, los robots pueden ser colocados en diferentes posiciones para dirigir su OT hacia lugares de difícil acceso para el hombre, trabajando en posiciones incómodas sin fatigarse.

Por otra parte, aunque la soldadura eléctrica también puede ser realizada por los robots, su aplicación se ve reducida por los sopletes para soldadura por costura o en línea recta. Sin embargo, dadas las características de esta operación (firmeza en movimientos, altas temperaturas, etc.), los robots pueden ejecutar una soldadura de manera uniforme, elevando la calidad y productividad de la operación. Más aún, ya que dicha operación es demasiado peligrosa, se encuentra sujeta a requerimientos severos de seguridad por la OSHA (occupational Safety and Health Act) para prevenir posibles accidentes de trabajo.

Maquinado.-

La aplicación de los robots a las operaciones de maquinado, se encuentra limitada primero, por la incapacidad del robot de proporcionar los requerimientos de exactitud y segundo, por los requerimientos de complejidad para el diseño de la herramienta de trabajo. En una aplicación típica de maquinado, el robot deberá de tomar un husillo poderoso y ejecutar una operación de taladrado, corte, esmerilado o cualquier otra operación sobre la pieza de trabajo, la cual deberá ser colocada en una posición fija por un trabajador, por un robot o por un segundo brazo del mismo robot que ejecuta la operación de maquinado. La posibilidad de utilizar un segundo brazo se ha incrementado gracias al desarrollo de nuevas tecnologías, como el desarrollo del microprocesador.

Otras de las posibles aplicaciones de maquinado que pueden ser realizadas por los robots, se encuentran las operaciones de conformado, acabado superficial, desbarbado, contorneado, etc. Por ejemplo, la industria aeroespacial está utilizando robots para taladrar y conformar hojas de aluminio para los paneles de aviones. El taladrado representa un ejemplo de la dificultad de utilizar robots en operaciones de maquinado, ya que el robot no puede realizar una serie de agujeros, con la exactitud que se requiere en ciertas aplicaciones; siendo necesario diseñar ciertas plantillas que sirvan de guías para realizar la tarea con mayor exactitud. Más aún, ya que la exactitud de posición de los manipuladores que existen actualmente en el mercado no es suficiente para insertar una broca sin trabarse, es necesario diseñar unos sujetadores flexibles para herramientas, que permitan obtener una cierta holgura en la ejecución de la tarea.

Una complicación adicional se presenta si se requiere de sensores para indicar cuando se ha terminado de ejecutar la operación. La utilización de sensores también puede servir para de-

terminar cuando una barrera de la broca se ha roto o desgastado y poder realizar los cambios y ajustes necesarios.

Existen ciertas operaciones de maquinado que pueden considerarse dentro de las aplicaciones de manejo de partes. Una de estas operaciones consiste en que el robot desplaza la pieza de trabajo hacia una herramienta estacionaria, tal como una rueda de pulido o inclusive una broca, para ejecutar la operación de maquinado, para posteriormente desplazarla hacia otra área de trabajo. Los problemas que se presentan en este tipo de aplicaciones son las limitaciones que se presentan con respecto a la exactitud de posicionamiento, además del peligro potencial que representa el trabajar con herramientas expuestas.

Se puede pensar que las aplicaciones del robot en operaciones de maquinado se verán limitadas hasta lograr un mejoramiento en las capacidades sensoriales del robot, además de elevar la exactitud de posicionamiento.

CONTROL PERCEPTUAL.-

En este tipo de aplicaciones, el robot es capaz de crear su trayectoria de trabajo, en base a la información que recibe del medio ambiente a través de los sistemas de percepción sensorial con que cuenta. El medio ambiente de trabajo ya no deberá de estar perfectamente determinado y controlado, ya que el robot podrá determinar la posición y orientación de las piezas de trabajo, siendo capaz de tomar decisiones en cuanto a la ejecución de la tarea, comparando las señales recibidas con las indicaciones contenidas en el programa de ejecución.

A partir del programa de instrucciones grabado en la memoria de la computadora, el robot podrá realizar ciertas modificaciones durante la ejecución de la tarea, dependiendo de la información que obtenga de sus sensores, para llevar a cabo la buena ejecución de la tarea.

Entre las aplicaciones que se pueden considerar dentro de esta categoría, se encuentran las siguientes:

Ensamblado.-

Una de las áreas de aplicación que representa mayor interés en la actualidad, es el área de ensamblado, la cual requiere de la utilización de robots sofisticados y efectivos que permitan llevar a cabo una serie de ensamblados complejos. Los robots que existen actualmente en el mercado, sólo son utilizados en una área restringida de operaciones de ensamblado simples, tales como uniones macho-hembra. Por otra parte, las operaciones de ensamblado requieren de exactitudes de posicionamiento muy altas, así como de sistemas de percepción que le permitan al robot ejecutar operaciones de ensamblado complejas.

Los sistemas de percepción sensorial no solo se utilizan para detectar el buen posicionamiento antes y después del ensamblado sino también para inspeccionar los defectos que se puedan presentar en las piezas a ensamblar.

Entre las aplicaciones de ensamblado más simples que se pueden realizar por un robot, está la de unir dos piezas que requieren de una simple presión para lograr su acoplamiento, como en el caso de la industria automotriz en donde el robot se encarga de insertar los circuitos integrados que conformaran el tablero del automóvil. La líneas de ensamblado de la industria automotriz utilizan grupos de robots para ejecutar ensamblado simples y operaciones de ajustes en las carrocerías durante su desplazamiento de una estación de trabajo a otra.

Sin embargo, para el caso de una tarea un poco más compleja como la inserción de una tapa, la cual deberá ser atornillada a otra parte, no puede ser ejecutada de una manera satisfactoria por los robots que existen actualmente. Si se utilizaran sistemas de visión artificial, se podría localizar la posición de la tapa y mediante sensores de fuerza se podría evitar la aplicación de esfuerzos excesivos sobre la tapa; sin embargo, la utilización de estos adelantos tecnológicos puede resultar demasiado costoso, además de requerir sistemas de programación demasiado complejos.

Inspección.-

Otra de las áreas de aplicación de los robots industriales consiste en realizar mediciones precisas con respecto a la posición de una pieza de trabajo, con el fin de checar su localización, orientación o dimensiones. Al igual que en las operaciones de ensamblado y ajuste, las operaciones de inspección requieren de un cierto grado de control de movimientos para lograr una buena ejecución.

Los sistemas de percepción que se utilizan para las operaciones de inspección, incluyen cámaras de televisión, rayo laser, módulos de control fotoeléctricos, fibras ópticas y arreglos de diodos lineales. El primer sistema de inspección instalado en una línea de producción fue en la compañía General Motors en la planta Chevrolet en Flint, Michigan en 1979. El sistema fue desarrollado por la compañía Auto-Place y era utilizado para inspeccionar el ensamblado de válvulas para motores automotrices, con el fin de determinar si había grietas a partes incompletas. Por medio de un control programable, el sistema inspecciona las tapas de las válvulas y envía una señal al controlador para indicar si se acepta o se rechaza la parte inspeccionada.

Otro sistema de visión desarrollado por la General Motors era el sistema Consight, el cual podía ser utilizado para determinar la posición y orientación de una amplia variedad de partes. Otro sistema de inspección que ha sido probado es un sistema sensorial de realimentación que utiliza un sistema de microcomputadora para medir el diámetro y la posición de los agujeros taladrados.

Se puede decir que el incremento en la utilización de los robots en operaciones de inspección, será directamente proporcional al desarrollo futuro en los sistemas de percepción sensorial y visión artificial.

FIG. 4:- TENDENCIA EN LA UTILIZACION DE ROBOTS EN ESTADOS UNIDOS

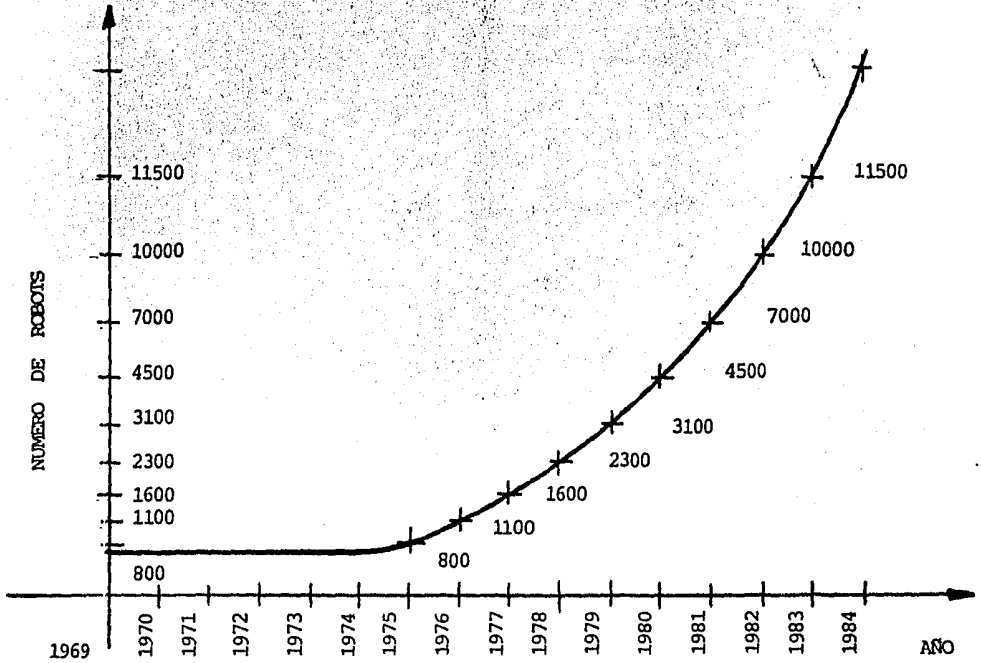


FIG. 3 APLICACIONES DE ROBOTS EN COMPAÑIAS DE ESTADOS UNIDOS (MUESTRA DE 300-400 PLANTAS MANUFACTURERAS)

| <u>APLICACION</u> | <u>% DE ROBOTS UTILIZADOS</u> |
|-----------------------|-------------------------------|
| SOLDADURA | 40 |
| MANEJO DE MATERIALES | 25 |
| CARGA-DESCARGA DE | |
| MAQUINAS-HERRAMIENTAS | 20 |
| PINTURA POR ASPERSION | 5 |
| ENSAMBLADO | 3 |
| MAQUINADO | 2 |
| OTRAS | 5 |
| | <hr/> 100 |

Analizando todas las operaciones que estan siendo realizadas por los robots industriales, se puede determinar qué tipos de robots son los más adecuados para una determinada aplicación y cuál es el porcentaje que representa cada operación dentro del número total de robots que estan siendo utilizados en la industria.

A partir de esto, la soldadura por puntos aplicada a las carrocerías de los automóviles, representaba a finales de 1981 una de las aplicaciones más importantes, contando con la tercera parte de los robots utilizados en la industria automotriz de E. a. La industria metal-mecánica representa una de las áreas de mayor utilización, al mismo tiempo que la industria de los plásticos está incrementando su campo de aplicación en los últimos años.

Considerando que un robot desplaza a un trabajador por turno en los Estados Unidos, 1 significa que los robots solo han desplazado 1500 de los 7 millones de trabajadores de la industria manufacturera que realizan operaciones que pueden ser realizadas por los robots.

Los robots disponibles en el mercado son capaces de ejecutar quizá del 15-20% de las aplicaciones potenciales de los robots. Con el desarrollo de los sistemas de percepción sensorial, se podría elevar este porcentaje hasta un 40%. Como se puede ver en la figura 3, las aplicaciones de soldadura, manejo de materiales y carga-descarga de máquinas-herramientas representan el 85% de las posibles aplicaciones de los robots en los Estados Unidos. 1

Los robots han tenido una mayor aplicación en operaciones peligrosas o desagradables, en donde representan del 8-9% de todas las operaciones de soldadura y pintura por aspersión. Esto significa que las compañías que iniciaron la utilización de robots querían eliminar la necesidad de utilizar mano de obra en medios ambientes peligrosos.

Más del 80% de las compañías que estan utilizando robots en los Estados Unidos iniciaron su utilización a principios de 1977, lo que demuestra que la industria de los robots ha mostrado un crecimiento muy significativo en los últimos 7 años. La figura 4 muestra tendencia en la utilización de robots en Estados Unidos a partir de 1969.

A partir de estas experiencias en las aplicaciones de los robots, se han formado ciertas compañías como Roboflex en Francia las cuales se encargan de proporcionar asesoría durante el proceso de selección de los robots adecuados para una tarea específica. Estas compañías han elaborado una serie de estudios para determinar que modelos de robots son los más adecuados para una aplicación específica, teniendo en consideración los requerimientos de dicha operación, así como las capacidades y limitaciones de funcionamiento de los robots.

FIG. 5.- PRINCIPALES MODELOS DE ROBOTS UTILIZADOS EN CADA TIPO DE APLICACION

| <u>APLICACION</u> | <u>MODELO</u> |
|-----------------------|-------------------------------|
| SOLDADURA | UNIMATE 4000, 2000 |
| | CINCINNATI MILACRON T3 |
| | ASEA Lrb-6 |
| | VOLKAWAGEN AG L-15, R-30 |
| | ACMA-CRIBIER PORTIQUE 80, TH8 |
| | HITACHI M-AROS SP, JP |
| MANEJO DE MATERIALES | UNIMATE 2000 |
| | PRAB VERSATRAN E |
| | AUTO-PLACE 10 |
| | OLIVETTI SIGMA/MTG |
| | SIEMENS FUJITSU-FANUC |
| | ELECTROLUX |
| PINTURA POR ASPERSION | DEVILBISS/TRALLFA TR 3000 s |
| | BINKS ROBOMATIK |
| | NORDSON FRANCE |
| | TOKICO TYPE 10-15 |
| | CINCINNATI MILACRON T3 |
| ENSAMBLADO | UNIMATE PUMA 250-500-600 |
| | ASEA Lrb-6-60 |
| | OLIVETTI SIGMA/MTG |
| | UNITED STATES ROBOT |
| | ASEA Lrb 6-60 |
| MAQUINADO | CINCINNATI MILACRON T3 |
| | OLIVETTI SIGMA/FO/H |
| | VOLKAWAGEN AG R-30 |
| | |

FIG. 6 .- JUSTIFICACIONES PARA LA UTILIZACION DE ROBOTS EN
LAS DIFERENTES APLICACIONES

(RANGO DE ORDEN DE IMPORTANCIA: 1 = MUY IMPORTANTE
4 = MENOS IMPORTANTE)

| APLICACION | REDUCCION EN COSTOS DE MANO DE OBRA | INCREMENTOS EN PRODUCTIVIDAD | CALIDAD DEL PRODUCTO | TRABAJOS PELIGROSOS |
|---|-------------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|
| SOLDADURA | 1 | 2 | 3 | 4 |
| MANEJO DE MATERIALES | 1 | 3 | 4 | 2 |
| CARGA-DESCARGA DE MAQUINAS-HERRAMIENTAS | 2 | 1 | 4 | 3 |
| PINTURA POR ASPERSION | 3 | 4 | 2 | 1 |
| ENSAMBLADO | 2 | 1 | 3 | 4 |
| MAQUINADO | 1 | 2 | 3 | 4 |
| INSPECCION | 3 | 2 | 1 | 4 |
| OTRAS OPERACIONES | 1 | 2 | 4 | 3 |

CONCLUSIONES
=====

CONCLUSIONES

Es indiscutible que en los últimos años, la utilización de los robots industriales ha representado, para un gran número de empresas, la obtención de un nivel de competitividad más alto así como la elevación de sus índices de productividad, lo que les ha permitido la disminución de sus costos de producción y la fabricación de una serie de productos con características diferentes utilizando el mismo equipo, gracias a la flexibilidad de utilización de los robots industriales.

Ante el avance de esta nueva tecnología, México se enfrenta al peligro de quedar rezagado en la transformación científica-tecnológica mundial, con serias consecuencias políticas, económicas y sociales. Una de las características del modelo económico de México, seguido durante más de 10 años, es la falta de competitividad de la planta productiva nacional, debido al alto grado de obsolescencia, ya que alrededor del 50 % de la industria nacional, no trasnacional, trabaja con maquinaria en desuso. Problema que se debe resolver lo más pronto posible antes de que los países industrializados se encarguen de proporcionar las innovaciones tecnológicas que no siempre son adecuadas a las necesidades del país.

En lo que respecta a los trabajos de investigación que se están realizando en el área de Robótica Industrial, se observa que México se encuentra muy atrasado, debido principalmente a la carencia de investigadores de alto nivel (el caso de la UNAM), la falta de objetivos específicos (en el caso del IPN) y, en cierta medida, la falta de presupuestos adecuados y la falta de interés por parte del gobierno y sector industrial para la creación de la infraestructura tecnológica que requiere el país.

Esta falta de tecnología ha representado para el país un alto costo social y económico que se ha reflejado en un incremento acelerado en la dependencia tecnológica extranjera, en endeudamiento externo y en estrechamiento del mercado interno.

Actualmente México se enfrenta a problemas de bajos índices de productividad, altos costos de producción y baja calidad de sus productos que no le permiten competir en el mercado internacional. Si se tiene en consideración los objetivos para los cuales fueron diseñados los robots (disminución de costos, calidad de los productos, elevación de los costos de la mano de obra, falta de disponibilidad del trabajador para realizar ciertas tareas peligrosas), se puede decir que existen plantas mexicanas que están en condiciones de utilizar robots, aunque la mayoría de ellas no puede, debido principalmente a la falta de capital para la inversión y del personal técnico necesario. De esta manera, si México no cuenta con el capital, tecnología y organización adecuadas para construir plantas con robots, los productos de sus plantas tradicionales no podrán competir en el mercado internacional, llevando a la descapitalización inexorable del país; a una espiral descendente de descapitalización (incapacidad creciente para capitalizarse y educarse me

por).

En lo que respecta a la ejecución de tareas peligrosas, el robot ha permitido sustituir al personal humano en tareas como forja, fundición, soldadura, manipulación de materiales radioactivos; tareas en las cuales ha permitido un avance dentro del desarrollo tecnológico que no se puede considerar como negativo para el hombre. En este tipo de operaciones, México ya debería estar utilizando robots en sus líneas de producción.

Es lógico pensar que los robots desplazarán mano de obra, ya que la automatización de los procesos de fabricación ha significado, hoy como ayer, el reemplazamiento, desplazamiento y la formación de mano de obra; problemas a los que se tiene que enfrentar cualquier sociedad industrial y cuya solución dependerá de las estructuras sociales existentes. Es decir, la automatización permite discernir las condiciones técnicas, aunque no las condiciones sociales, ya que éstas son determinadas por el hombre y no por las máquinas.

Cuando se automatiza una línea de producción, el nivel de empleo no aumenta, pero gracias al incremento de productividad, la empresa puede crecer y, en consecuencia, generar más empleo. Más aún, para muchas empresas la automatización ha representado un medio para evitar un despido masivo de trabajadores, ante la posibilidad del cierre de la planta ante la baja competitividad que presentan con respecto a las empresas que ya han utilizado robots industriales.

Los problemas a los que se enfrenta la mano de obra mexicana no solo son cuantitativos (alto índice de desempleo), sino también cualitativos, ya que la mayoría de los trabajadores son generalmente poco calificados, conformándose con salarios bajos. Mientras que en Estados Unidos un operario gana \$ 12 la hora, en México el costo es de 67 centavos, lo que ha representado un obstáculo para la introducción de los robots en el país.

El proceso de robotización siempre conllevará al elemento humano; así como se piensa en el desempleo, el robot también ocasionará que el hombre sea desplazado hacia trabajos más creativos y que la desaparición de un puesto de trabajo implica estadísticamente la creación de otros puestos en los que se requerirá la presencia humana (en relación de 3:1/2 en Estados Unidos). Es indiscutible que las futuras generaciones de profesionistas deberán estar a la altura de las nuevas tecnologías, llegando a dominar perfectamente lo relacionado con las computadoras, sus lenguajes y los robots.

Tarde o temprano, México se tendrá que incorporar a esta nueva tecnología, ha medida que sus manufacturas adquieran mayor volumen e importancia, ya que entonces le será conveniente una mayor demanda de trabajadores en condiciones sociales más dignas, es decir, con una elevación natural de los salarios, que se manifestará en un poder de adquisición más alto y en un mejor nivel de vida.

BIBLIOGRAFIA
=====

B I B L I O G R A F I A

PRIMERA PARTE .- ASPECTOS TECNOLOGICOS

1.- INTRODUCCION

- {1} Tanner W. R. "Industrial Robots", Volumen 1/Fundamentos, Segunda Edición, 1981
- {2} Ferreti M. "La Robotique", 01 Informatique Mensuel, No. 154, Octubre 1981
- {3} CONACyT "La invasión de los Robots", Vol. 3, No. 38, Febrero 1981
- {4} Roth B. "Robots", Universidad de Stanford, Applied Mechanics Reviews, Vol. 31, No. 11, Noviembre 1978

2.1.- MODELO GEOMETRICO

- {1} Realeaux F. "Kinematics of Machinery", traducción del francés al inglés por A.B.W. Kennedy Mac. Millan and Company LTD, Lomdres 1976
- {2} Denavit J. y Hartenberg R. "A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices", J. Appl. Mech., Junio 1955
- {3} C.S. George Lee, "Robot Arm Kinematics, Dynamics and Control", IEEE Computer, Diciembre 1982
- {4} Paul R. P. "Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control", MIT Series en Inteligencia Artificial, 1981
- {5} Angeles J. "Aspectos Teóricos de la Robótica", División de Estudios de Posgrado UNAM, Informe Interno 1981

2.2.-MODELO CINEMATICO

- {1} Paul R. P. "Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control", MIT Series en Inteligencia Artificial, 1981
- {2} Shimano B., Paul R. "Kinematic Control Equations for Manipulators" IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, No. 6, Junio 1981
- {3} Angeles J. "Aspectos Teóricos de la Robótica", División de Estudios de Posgrado UNAM, Informe Interno 1981
- {4} C.S. George Lee "Robot Arm, Kinematics, Dynamics and Control", IEEE Computer, Diciembre 1982

2.3.- MODELO DINAMICO

- {1} Hollerbach J.M. "A Recursive Formulation of Lagrangian Manipulator Dynamics", IEEE Trans. Syst. Man Cyber., Vol. SMC-10 No. 11, Noviembre 1980
- {2} Uicker J.J. "On the Dynamic Analysis of Spatial Linkages using 4 x 4 Matrices", Ph.D. tesis Northwestern University, Agosto 1965
- {3} Kahn M.E. "The Near-Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains", Stanford Artificial Intelligence Project Memo, AIM-106, Diciembre 1969

- {4} Waters R.C. "Mechanical Arm Control", MIT Laboratorio de Inteligencia Artificial, Memo 549, Octubre 1979
- {5} Luh J.Y.S., Walker M.W. y Paul R. "On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulator", Trans. ASME, J. of Dyn. Syst., Meas. and Control, Vol. 102 Junio 1980
- {6} Paul R.P. "Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control" MIT series en Inteligencia Artificial, 1981
- {7} C.S. George Lee "Robot Arm, Kinematics, Dynamics and Control", IEEE Computer, Diciembre 1982

2.4.- ESQUEMAS DE CONTROL

- {1} Bejczy A.K. "Robot Arm Dynamics and Control" Jet Propulsion Laboratory, NASA Technical Memorandum 33-669 Febrero 1984
- {2} Paul R.P. "Modelling, Trayectory, Calculation and Servoing of a Computer Controller Arm", Laboratorio de Inteligencia Artificial de la Universidad de Standford, Memo AM-177, Noviembre 1972
- {3} C.S. George Lee "On de Control of Mechanical Manipulators", Proc. Sixth IFAC Conf. Estimation and Parameter Identification, Junio 1982
- {4} Whitney D.E. "Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prosthesis", IEEE Trans. Man Machine Syst. Vol. MMS-10, Junio 1969
- {5} C.S.G. Lee y Chung M. "An Adaptative Control Strategy for Computer Based Manipulators", IEEE Conf. Decision and Control, Diciembre 1982
- {6} Albus J.S. "A new Approach to Manipulator Control: the Cerebeller Model Articulation Control (CMAC)", Trans. ASME J. Dynamics Systems Measurement and Control, Vol. 97, Septiembre 1975
- {7} Kahn M.E. y Roth B. "The Near-minimim-time control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains", Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. and Control, Vol. 193, No. 3, Septiembre 1971
- {8} Dubowsky S. y DesForges D. "The Application of Model Reference Adaptative Control to Robotic Manipulators", ASME Trans. J. of Dyn. Syst. Meas. and Control Vol. 101, Septiembre 1979
- {9} Horowitz R. y Tomizuku M. "An Adaptative Control Scheme for Mechanical Manipulators Compensation of Non-Linearity and Decoupling Control", ASME, Encuentro Anual de Invierno, Noviembre 1980
- {10} Khalil W., Liegois A. y Fournier A. "Comande Dynamique des Systems Mecaniques Articules", Rairo/Automatique, Vol. 13, No. 2, 1979
- {11} Raibert R.H. y Horn B. "Manipulator Control Using the Configuration Space Method", The Industrial Robot, Vol.

- {12} Khalil W. "Modelisation et commande par ordinateur du Manipulateur", Tesis para doctorado en Ingenieria Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, Septiembre 1976
- {13} Zbala-Iturralde J. "Commande des Robots Manipulateurs a partir de la Modelisation de leur Dynamique", Université Paul Sabatier, Toulouse, Julio 1978
- {14} Markiewicz B.R. "Analysis of the Torque Drive Method and Comparison with Conventional Position Servo for a Computer Controlled Manipulator", JPL Technical Memo 33-601, Marzo 1973
- {15} Luenberger D.G. "Canonical Forms for Linear Multivariable Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-9, 1976
- {16} Landau I.D. "Sur une methode de Synthèse des Systemes Adaptatifs avec Modele Utilises pour la Commande et l'identification d'une Classe de Procédés Physiques", Tesis para doctorado en Ciencias Físicas, Universidad Científica y Médica de Grenoble, Junio 1973

3.1.- ADQUISICION DE TRAYECTORIAS

- {1} Paul R.P. "Manipulator Cartesian Path Control", IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics SMC-9, No. 11, Noviembre 1979
- {2} Tanner W.R. "Industrial Robots", Volumen 1/Fundamentos Segunda Edición, 1981
- {3} Paul R.P. "Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control", MIT series en Inteligencia Artificial, 1981
- {4} Ferreté M. "Les Robots d'Aujourd'hui et de Demain", 01 Informatique Mensuel, No. 156, Enero 1982
- {5} Nagel R.N. "Robots : not yet smart enough", IEEE Spectrum, Mayo 1983

3.2.-EVOLUCION DE LA PROGRAMACION

- {1} Paul R.P. "Wave : A model-based language for Manipulator Control", Industrial Robot, No. 4, 1977
- {2} Finkel R. "An overview of AL, a programming language for Automation", Cuarta Conferencia Internacional sobre Inteligencia Artificial, 1975
- {3} Paul R.P. "Advanced Industrial Robot Control Systems", Universidad de Purdue, Lafayette IN.Rep. TR-EE 78-25 1978
- {4} Grossman D. y Taylor R. "Interactive Generation of Object Models with a Manipulator", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-8, Septiembre 1978
- {5} Paul R.P. "Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control", MIT series en Inteligencia Artificial, 1981

- {6} Takase K., Paul R.P. y Berg E. "A Structured Approach to Robot Programming and Teaching", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-11, No. 4, Abril 1981

4.- PERCEPCION SENSORIAL

- {1} Ferreti M. "Le Dossier de la Robotique Industrielle: Vers la Generation 3", Le Nouvel Automatisme No. 2 Noviembre 1978
- {2} Gomez de Silva J. "Percepción Sensorial en Manipulación Industrial Automática", Instituto de Ingeniería UNAM, Proyecto 3110, Julio 1983
- {3} Bollinger J.G. "Sensors and Actuators", IEEE Spectrum, Mayo 1983
- {4} Ferreti M. "Les Robots D'Aujourd'hui et de Demain", 01 Informatique Mensuel, No. 156, Enero 1982

5.- INTELIGENCIA ARTIFICIAL

- {1} Latombe J.C. y Lux A. "Intelligence Artificielle et Robotique Industrielle", Le Nouvel Automatisme, No. 6 Mayo 1979
- {2} Ferreti M. "Les Robots D'Aujourd'hui et de Demain", 01 Informatique Mensuel, No. 156, Enero 1982
- {3} Peterson U. "An Integrated Robot Vision System", Robotics World, Enero-Febrero 1984

II.- AREAS DE INVESTIGACION Y PERSPECTIVAS DE DESARROLLO INDUSTRIAL

- {1} Marquez M.T. "10 años del CONACyT", CONACyT 1982
- {2} Flores E. "La ciencia y la Tecnología en México", CONACyT 1982

SEGUNDA PARTE .- ASPECTOS SOCIO-ECONOMICOS

1.- INTRODUCCION

- {1} Sanderson R.J. "Industrial Robots : a summary and Forecast for Manufacturing Managers", Naperville Illinois, Teach. Tran. Corporation, 1982
- {2} Ferreti M. "Les Robots D'Aujourd'hui et de Demain", 01 Informatique Mensuel, No. 156, Enero 1982
- {3} Friedrich O. "The Robot Revolution", TIME Vol.116, No. 23, Diciembre 1980
- {4} Lurgeau C. "Un Défi Industriel : Histoire et Géographie des Robots et de leurs Applications", Le Nouvel Automatisme, No. 18, Diciembre 1980
- {5} Nagel R.N. "Robots : not yet Smart Enough", IEEE Spectrum, Mayo 1983

2.- EL ROBOT DENTRO DEL DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACION INDUSTRIAL

- {1} Passet R. "Problemes Economiques de L'Automation", Ediciones Montchrestien, Paris, Julio 1957

- {2} Maquet J. "L'Automation", Paris Match, No. 450, Noviembre 1957
- {3} Naville P. "Vers L'Automatisme Sociel ? ", Ediciones Gallimard, Paris Octubre 1963

3.- METODOLOGIA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA SELECCION E IMPLEMENTACION DE ROBOTS INDUSTRIALES

- {1} Boothroyd G. y Ho C. "Performance and Economics of Programmable Assembly Systems", SME Paper AD-77-720, 1977
- {2} Rogers M.F. "A time and Motion Method for Industrial Robots", The Industrial Robots, Diciembre 1978
- {3} Lechtman H.F. "Robot Performance Models Based on the RTM Method", Tesis de la Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad de Purdue, West Lafayette, IN, Mayo 1981
- {4} Nof S.Y. y Letchman H. "Analysis of Industrial Robot Work by the RTM Method", IE Journal, Abril 1982
- {5} Paul R.P. y Nof S.Y. "Human and Robot Task Performance", Simposium Internacional de la General Motors en Visión por Computadora y Percepción Sensorial, Michigan, Septiembre 1978
- {6} Paul R.P. y Nof S.Y. "Work Methods Measurement- A Comparison Between Robot and Human Task Performance", International Journal of Production Research, Vol. 17, No. 3, 1979
- {7} Sanderson R.J. "Industrial Robots ; a Summary and Forecast for Manufacturing Managers", Naperville Illinois, Teach. Tran. Coporation, 1982
- {8} Nof S.Y. "Decision Aids for Planning Industrial Robot Operations", IIE Proceedings, Universidad de Purdue, 1982
- {9} Ferreti M. "Les Robots D'Aujourd'hui et de Demain", 01 Informatique Mensuel, No. 156, Enero 1982

4.- APLICACIONES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES

- {1} Sanderson R.J. "Industrial Robots ; a Summary and Forecast for Manufacturing Managers", Naperville Illinois, Teach. Tran. Corporation, 1982
- {2} Tanner W.R. "Industrial Robots", Volumen 1/Fundamentos, Segunda Edicion, 1981
- {3} Ferreti M. "Les Robots D'Aujourd'hui et de Demain", 01 Informatique Mensuel, No. 156, Enero 1982