

Capítulo 2 Marco Teórico

En este capítulo se revisarán tres conceptos fundamentales para entender cómo y bajo que contexto se realizó ésta tesis. Estos conceptos son: la Robótica, el robot industrial y la programación de robots. La Robótica es la disciplina sobre la que este trabajo se desarrollo. La tesis está enfocada a la implementación de robots industriales y los problemas que involucran su control y programación

2.1 Robótica.

El objetivo de la Robótica es liberar al hombre de tareas peligrosas, tediosas o pesadas y realizarlas de manera automatizada. Así Robótica puede ser definida como la teoría y la práctica de tareas automatizadas, que por su naturaleza estaban reservadas al hombre [Coiffet 83].

Como dice John Craig [86], la Robótica es el deseo de sintetizar algunos aspectos de las funciones que realiza el hombre a través del uso de mecanismos, sensores y computadoras. Su estudio involucra muchas áreas del conocimiento que a grandes rasgos las podemos dividir en: manipulación mecánica, locomoción, visión por computadora e inteligencia artificial.

2.1.1 Robot

La palabra **robot** fue usada por primera vez en el año 1921, cuando el escritor checo Karel Capek (1890-1938) estrena en el teatro nacional de Praga su obra *Rossum's Universal Robot* (R.U.R.). Su origen es la palabra eslava *robota*, que se refiere al trabajo realizado de manera forzada. Actualmente el termino robot encierra una gran cantidad de mecanismos y máquinas en todas las áreas de nuestra vida. Su principal uso se encuentra en la industria en aplicaciones tales como el ensamblado, la soldadura o la pintura. En el espacio se han utilizado desde brazos teleoperados para construcción o mantenimiento hasta los famosos exploradores marcianos Pathfinder. Robots para aplicaciones submarinas y subterráneas se incluyen en exploraciones, instalación y mantenimiento de estructuras. Los robots militares o policias pueden hasta desactivar bombas y patrullar áreas enemigas.

Lo más novedoso en Robótica son los robots aplicados en la Medicina como prótesis y en la Agricultura como recolectores. No está excluida por supuesto el área del entretenimiento, los parques temáticos, las películas y hasta los juguetes nos sorprenden cada nueva temporada.

2.2 Robot Industrial

La principal diferencia entre un robot y una máquina convencional es que el primero es capaz de modificar su tarea a realizar. Esto convierte a los robots en la solución ideal para el cambiante y exigente mundo de la industria.

El término robot puede adquirir muchos significados diferentes dependiendo del contexto. En este trabajo, un robot será considerado como un robot industrial, también llamado manipulador o brazo robot. Este tipo de robot consiste en un brazo mecánico articulado (inspirado en el brazo humano).

La *Federación Internacional de Robótica* (IFR) en su informe técnico ISO/TR distingue entre robot industrial y otros robots con la siguiente definición [Barrientos *et al.* 97]:

“...por robot industrial de manipulación se entiende a una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento...”

Un típico robot industrial no tiene la capacidad de iniciar ninguna acción por su cuenta. Todas sus secuencias necesarias son determinadas de antemano, a través de un programa dentro de la computadora. De aquí la importancia de una representación exacta del medio ambiente dentro de la computadora del robot.

2.2.1 Componentes

Los componentes de un robot industrial son los siguientes [Goetsch 90]: el manipulador o brazo mecánico, la unidad de control, la herramienta y la fuente de poder.

El brazo mecánico es la parte del robot con la que estamos más familiarizados. Este se encarga de realizar los movimientos necesarios para llevar a cabo la tarea. El brazo está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones. Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina grado de libertad (GDL). El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen

La unidad de control, generalmente una computadora es la encargada de controlar los distintos componentes del robot. Ésta puede almacenar las trayectorias a seguir por parte del robot. También se encarga de controlar la comunicación tanto interna como externa.

El brazo mecánico por sí solo poco puede hacer. Necesita de una herramienta para poder realizar una tarea. Las herramientas varían de acuerdo al tipo de tarea, un ejemplo de estas son las pinzas, las pistolas de pintura o de soldadura.

La fuente de poder no es necesariamente única ya que puede ser: eléctrica, neumática o hidráulica. La unidad de control funciona con energía eléctrica, pero el brazo mecánico y la herramienta pueden utilizar energía neumática (gas comprimido) o hidráulica (fluidos). La Figura 2.1 muestra los componentes de un típico robot industrial

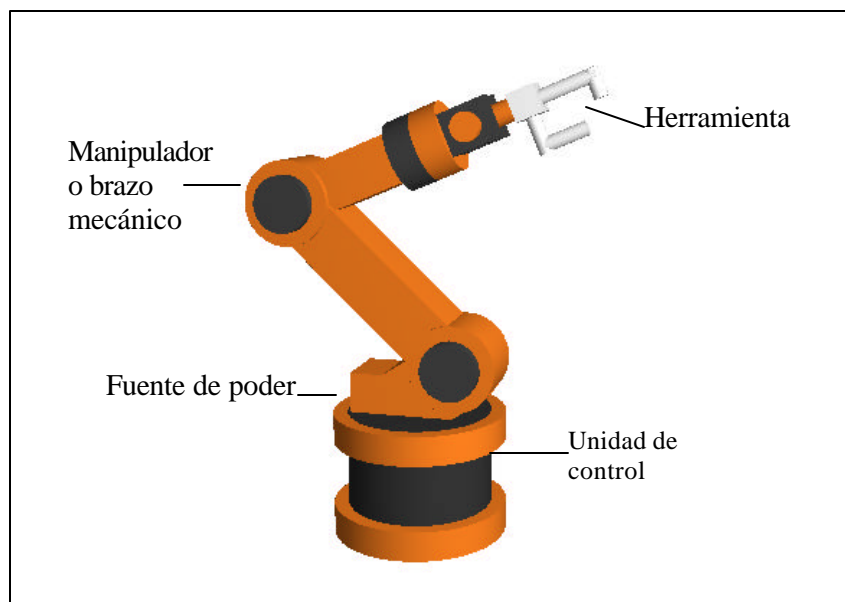


Figura 2. **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** Componentes de un robot industrial

La Tabla 2.1 lista las diferentes características que encontramos en los robots industriales [Barrientos, *et al.* 97]:

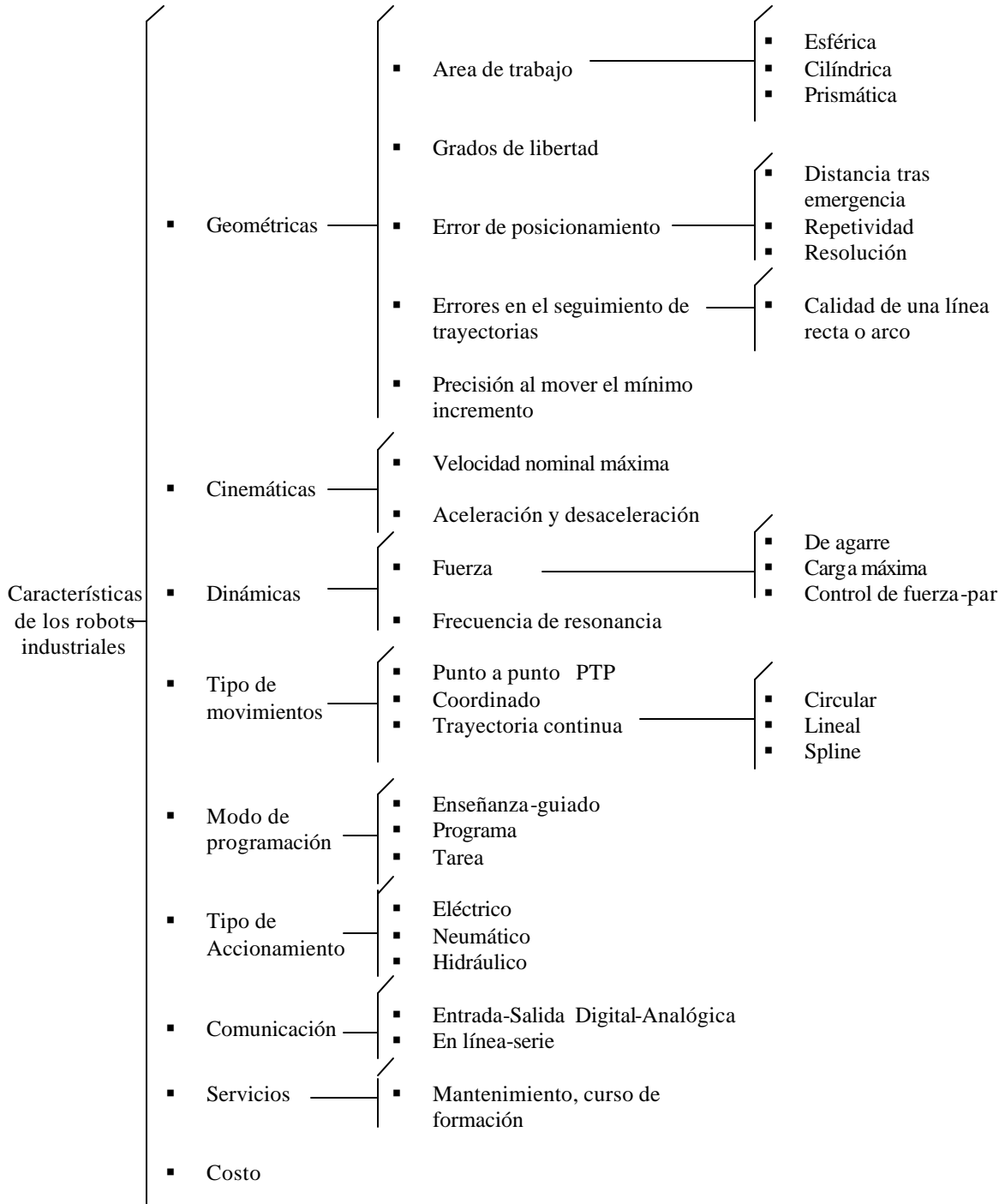


Tabla 2. **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** Características de un robot industrial

La Tabla 2.2 muestra los datos técnicos del modelo KR 125 de la compañía KUKA, no debe ser difícil ahora entender a que se refieren:

KR 125	Kuka
Características	Unidades
Número de ejes (GDL)	6
Capacidad de carga	125 kg
Carga adicional	120 kg
Carga total distribuida	245 kg
Longitud de brazo	1000 mm
Instalación	Piso/Techo
Repetición	+ - 0,2 mm
Peso	975 kg
Volumen de trabajo	39 m ³
Movimientos	PTP, LIN, CIR
Accionamiento	Electromecánico con servomotores
Sensores	Sistema digital de posición
Controlador	KR C1

Tabla 2. **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** Unidades del robot industrial KR 125

A continuación se detarán tres de las características más importantes de los robots: la de fuente de poder, las características geométricas y las del tipo de movimiento.

Fuente de poder. Una de las clasificaciones básicas de robots se basa en la fuente de poder usada para manejar las articulaciones del robot. Las dos tecnologías más utilizadas son la eléctrica y la hidráulica. La mayoría de los manipuladores hoy en día utilizan los controladores eléctricos con servomotores DC (corriente directa) o motores de paso DC. Sin embargo cuando se requiere de manejar cargas pesadas a gran velocidad, como en el ensamblaje de autos, los robots con controladores hidráulicos son más efectivos. La principal desventaja de los motores hidráulicos es su imprecisión, un requisito muy importante en otras aplicaciones. Por lo general las herramientas neumáticas se utilizan

como elementos terminales o de manipulación. Como cuando se requiere de tomar objetos con una simple operación de abrir y cerrar, estas herramientas neumáticas (activadas por aire) ofrecen la ventaja de que se puede controlar la presión ejercida por estas, de esta manera no se dañan las piezas manipuladas.

Características Geométricas. Las características geométricas componen lo que se denomina la geometría de trabajo. La geometría de trabajo se define como los puntos en el espacio que puede alcanzar el robot con el elemento terminal. Para este caso uno se refiere a los primeros tres ejes como *principales*. Estos ejes *principales* sirven para colocar la herramienta en la posición correcta. Los ejes restantes, ejes *menores*, se usan para orientar la herramienta. Por lo tanto la geometría de trabajo esta determinada como la secuencia de articulaciones usada para los primeros tres ejes (los principales). Para el caso de robots industriales existen dos tipos básicos de articulaciones comunes, de revolución y prismática. La Tabla 2.3 muestra sus características:

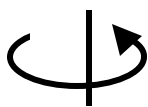

Tipo	Notación	Símbolo	Descripción
Revolución	R		Movimientos de rotación respecto a un eje
Prismática	P		Movimiento lineal a lo largo de un eje

Tabla 2. **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** Tipos de Articulaciones

De esta manera podemos clasificar los tipos de robots industriales más comunes. Por ejemplo un robot Cartesiano o Rectangular sería un PPP. Con sus tres ejes *principales* lineales. Este tipo de robot se denomina cartesiano por que su espacio de trabajo esta formado por un espacio cartesiano. La Figura 2.2 (a) muestra este tipo de robot.

Un brazo articulado sería un RRR, que es un robot muy similar al brazo humano, este robot puede rotar sus articulaciones sobre su eje, dándole así un gran campo de trabajo. Este robot se muestra en la Figura 2.2 (d).

De esta clasificación podemos empezar a construir toda una gama de robots. Cada uno con distintas características que les permitirán ser más aptos para diferentes tareas. En la Figura 2.2 encontramos más ejemplos de robots industriales.

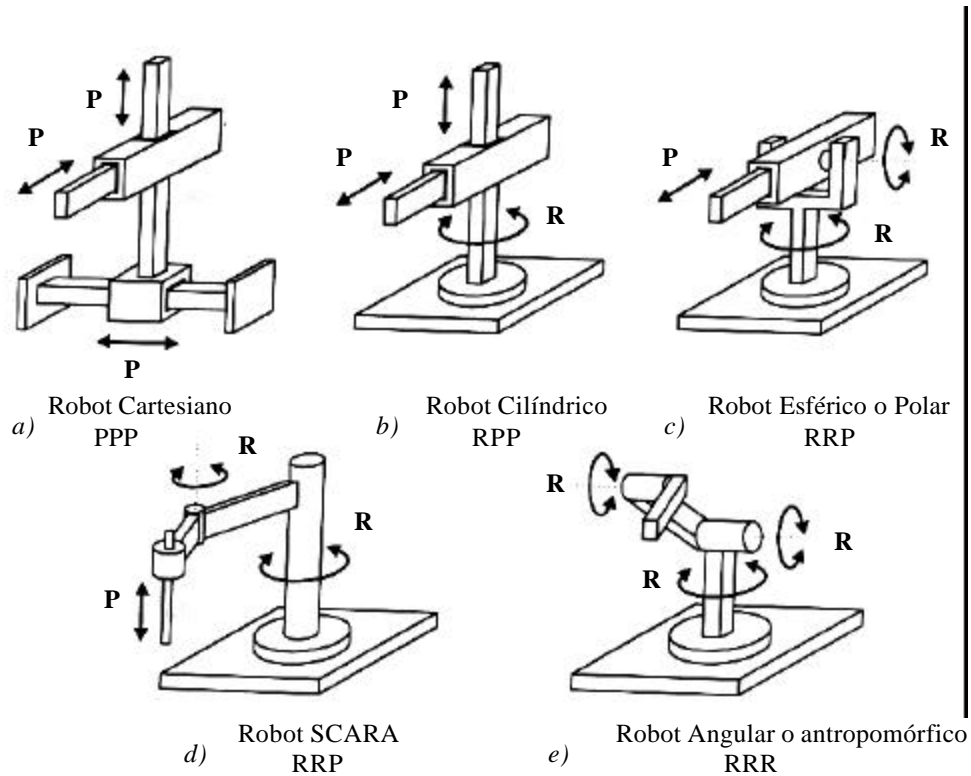


Figura 2. **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** Configuraciones frecuentes en robots industriales

Tipo de movimiento. Otro aspecto fundamental de clasificación es el método usado para controlar el movimiento del elemento terminal o herramienta. Dos son los tipos básicos de movimiento. El primero es el movimiento de *punto a punto* (PTP), donde la herramienta se mueve en una secuencia discreta de puntos por el espacio de trabajo. El objetivo de un movimiento PTP es realizar el desplazamiento entre dos puntos. Para ello cada eje o grado de libertad se desplaza hasta conseguir la posición del eje correspondiente al punto de destino o bien pueden todos los ejes alcanzar sincrónicamente su posición de destino (PTP síncrono). Con ambos tipos de control PTP se puede posicionar al robot muy rápidamente desde un punto a otro (ver Figura 2.3). El recorrido y la velocidad de desplazamiento sin embargo, no están claramente definidos. Las trayectorias de

movimiento entre dos puntos se alejan mucho de una recta y no suelen ser previsibles. En la programación de movimientos PTP se debe observar por lo tanto, que los puntos a alcanzar estén suficientemente alejados de los elementos cercanos al robot para evitar colisiones con estos. Este tipo de movimientos se utiliza en el caso de carga y soldadura.

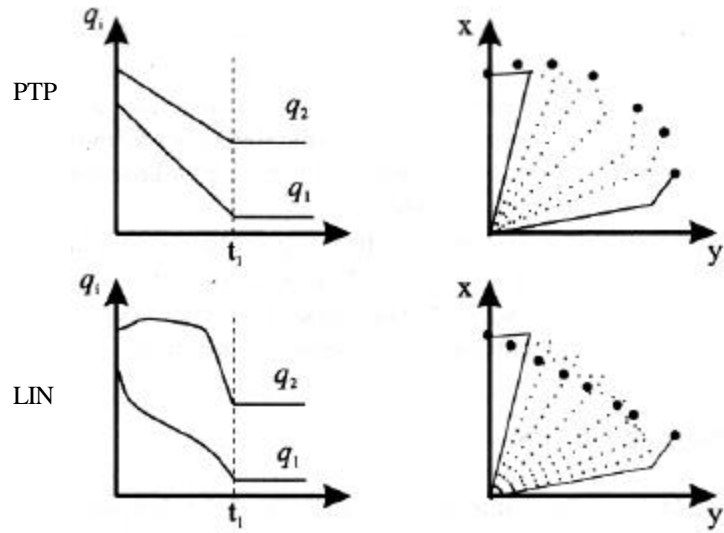


Figura 2. **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** Trayectoria PTP y continua rectilínea LIN.

El otro tipo de movimiento es el llamado *camino continuo* o *camino controlado*. En este caso la herramienta sigue un camino preestablecido en tres dimensiones con variaciones de velocidad (ver Figura 2.3). La trayectoria a realizar puede ser una recta, un arco de circunferencia o una sección hiperbólica de acuerdo a la capacidad de cálculo que se posea. En este caso el controlador deberá calcular muchos puntos intermedios entre el punto inicial y final, de acuerdo con la trayectoria de movimiento deseada. Este proceso se denomina interpolación. Aplicaciones para este tipo de movimiento se encuentran en la pintura, sellado o pegado.

La Figura 2.3 muestra como los movimientos punto a punto forman una recta en el espacio de configuraciones del robot y en cambio el camino continuo es una curva en el espacio de configuración del elemento terminal del robot.

2.2.2 Aplicaciones

La *Federación Internacional de la Robótica* (IFR) estableció una clasificación de las aplicaciones de la robótica en la industria [Barrientos, *et al* 97] Esta clasificación se muestra en la Tabla 2.4.

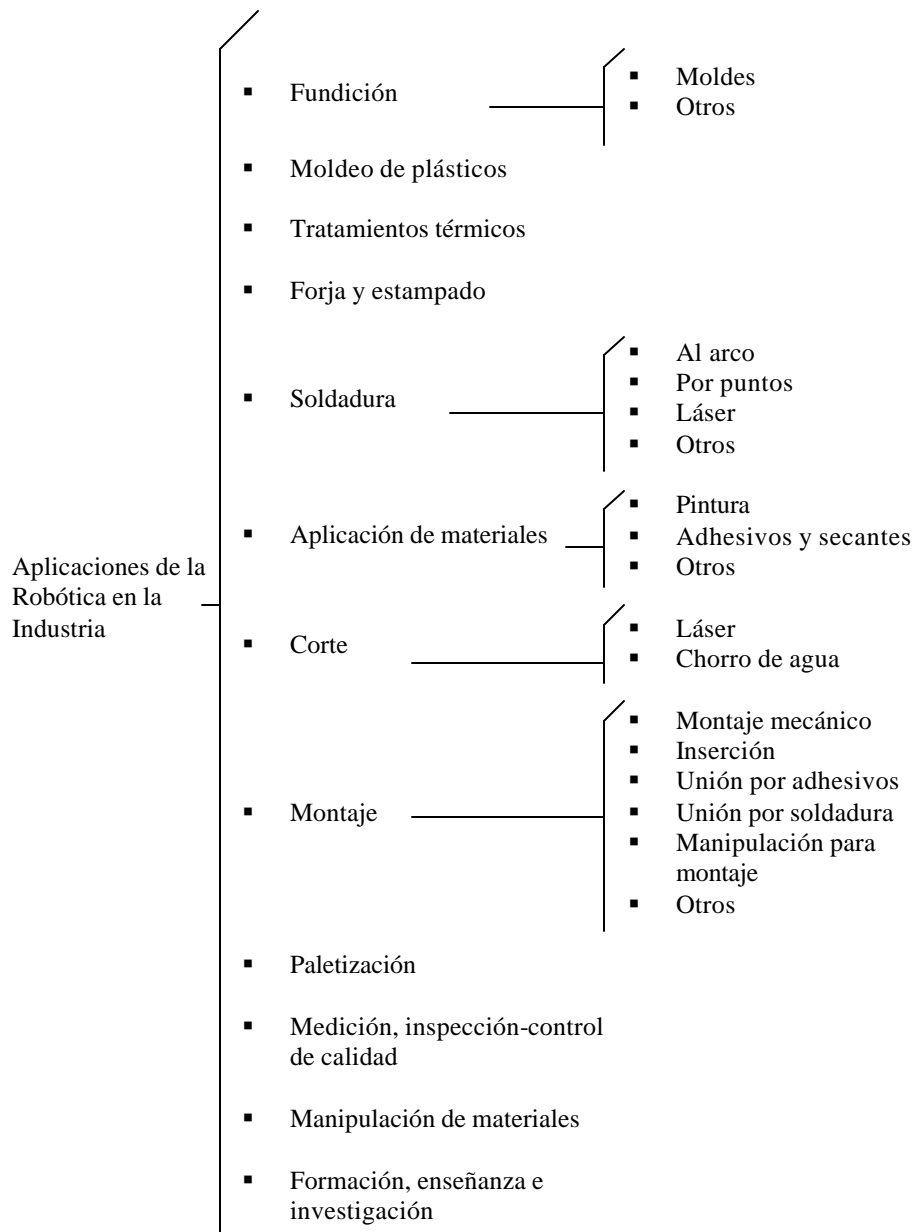


Tabla 2. **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** Aplicaciones de robots industriales

2.2.3 Sistema Robotizado

Un sistema robotizado o célula robótica es el componente de una línea de producción que incluye uno o más robots para realizar una tarea específica [Coiffet 83]. Los componentes de un sistema robotizado son:

1. *Las máquinas* (robot manipulador, brazo mecánico, etc..) . Lo que entendemos por robots industriales.
2. *El medio ambiente*. Para el caso de robots fijos el ambiente se reduce a su espacio de acción.
3. *La tarea*, esta se define como la diferencia entre dos estados del medio ambiente. Esta tarea debe ser descrita a la computadora en un lenguaje apropiado.
4. *La computadora* o cerebro del robot. Esta es la parte del robot que genera las señales de control de acuerdo a la información que se recibe. Las señales generadas actúan directamente sobre el robot y provienen de un programa o secuencia de instrucciones.

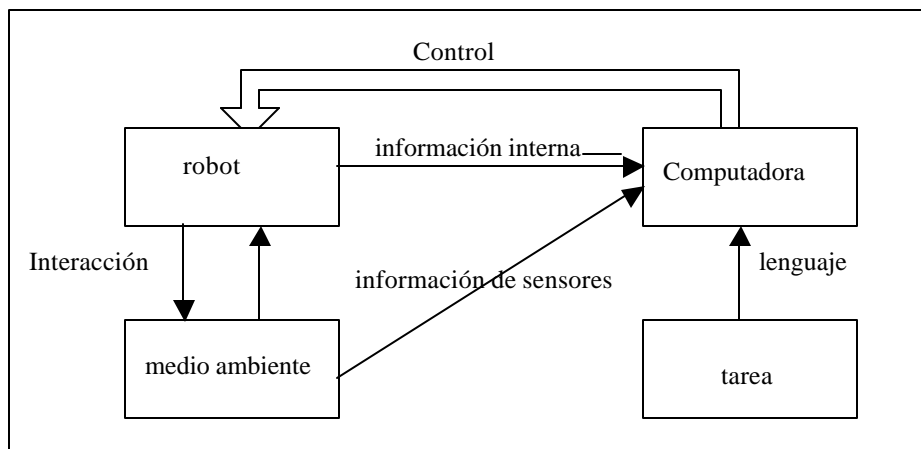


Figura 2. **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** Elementos de una célula robótica

La figura 2.4 muestra un diagrama con los componentes de la célula de trabajo. De las relaciones más importantes podemos mencionar la que ocurre con la computadora, esta es la encargada de controlar toda la actividad a través de un programa y de la información que recibe. Por esta razón es importante que la representación del mundo en la computadora sea lo mas precisa posible.

Una vez establecidos los elementos operativos de la célula de trabajo y su disposición en la planta, el segundo factor en la definición de la célula robotizada es la especificación de su sistema de control.

Una célula robotizada debe ser flexible y automatizada para justificar su empleo. Por lo que su sistema de control debe realizar las siguientes funciones [Barrientos, *et al* 97] :

- *Control Individual* de cada una de las máquinas, transportes y demás dispositivos, incluidos los robots que compongan la célula.
- *Sincronización* del funcionamiento de los diferentes dispositivos entre sí.
- *Detección, tratamiento y recuperación* si es posible de las situaciones anómalas de funcionamiento que puedan presentarse.
- *Optimización del funcionamiento* conjunto de los dispositivos de la célula, distribuyendo si es posible las funciones de manera dinámica, para así evitar paradas por espera o acciones innecesarias.
- *Comunicación con el usuario*, mostrando la información adecuada para que en todo momento se conozca con el detalle necesario el estado del sistema, al mismo tiempo que se permita operar el sistema.
- *Comunicación con otras células* para permitir la sincronización entre ellas, optimizando el funcionamiento de un sistema de fabricación flexible compuesto por varias células.
- *Comunicación con un sistema de control superior* que realiza básicamente funciones de supervisión y actualización de programas cuando se da un cambio en la producción

Estas funciones son las ideales, y el implementarlas en un momento dado depende del hardware disponible. En algunos casos los elementos de la célula robotizada son pocos y puede el mismo controlador del robot encargarse de la tarea de coordinar el funcionamiento por medio de entradas y salidas, ya sean digitales o analógicas.

2.3 Programación de Robots

La automatización en las fábricas se está convirtiendo en un requisito para sobrevivir a un mercado cambiante y exigente. Las estaciones de trabajo robotizadas son los componentes críticos de estas fábricas. Sin embargo todavía es necesario programar cada tarea y reprogramar cada cambio. Tradicionalmente el programar un robot significa deshabilitar la unidad del proceso de producción. La programación manual del robot es un trabajo de prueba y error. Las pérdidas en la producción debido a este tipo de programación pueden llegar a ser excesivas.

Con respecto a su programación los robots se clasifican en dos clases [Coiffet 83]:

1. Pre-programados. En este caso los robots no son capaces de examinar la naturaleza de la tarea que desempeñan. Están controlados por programas que no se pueden modificar en su modo de operar. La mayoría de los robots industriales son de este tipo.
2. Inteligentes. Este tipo de robots son capaces de adaptar, al menos en parte, su comportamiento en respuesta a la información que obtienen del ambiente. Este tipo de robots están en experimentación.

Hoy en día la programación de robots, significa generar un programa ejecutable con la secuencia de instrucciones que satisfaga la tarea de producción. Las instrucciones del programa están relacionadas con el movimiento del robot, la comunicación con los periféricos y con el flujo del programa. Para la generación de este tipo de programa existen dos técnicas: en línea y fuera de línea.

2.3.1 Programación en línea

Este tipo de programación fue el primero y más difundido método para programar. El robot es llevado manualmente por todos los puntos de la secuencia mientras estos se graban. Esta secuencia de pasos es repetida después hasta que no haya ningún error. La secuencia se puede almacenar ya sea con los puntos fijos más importantes, o como la secuencia completa de puntos.

La principal desventaja de la programación manual es la incapacidad de manejar variaciones de la misma tarea, por ejemplo recoger una pieza de una plataforma cuando la posición de la pieza esta determinada por un sistema de visión .Otra limitación es la dificultad de modificar un programa existente para una variación en la tarea a realizar, como cuando se cambia el modelo de las piezas[Lozano-Pérez *et al.* 92].

Tal vez el mayor inconveniente de esta técnica es que resulta muy caro para el caso de muchos robots y el margen de error es muy grande. En las grandes industrias de hoy en día esta técnica esta siendo desplazada por la programación fuera de línea que tiene entre su principal ventaja que no detiene la línea de producción.

2.3.2 Programación fuera de línea

En este caso podemos definir dos técnicas que predominan en la industria en este momento:

- Textual- La tarea es especificada escribiendo un programa que contenga los comandos de secuencia de posiciones para el sistema controlador del robot.
- Fuera de línea- gráfica. Este es una combinación de programación textual con manual que se lleva a cabo en un robot simulado a través de una interfaz gráfica interactiva.

En este tipo de programación es muy común combinar la programación textual y gráfica, ya que en una interfaz gráfica se puede revisar un programa textual. En el caso de la programación textual, las instrucciones se escriben en un lenguaje en particular y estas son traducidas por un compilador o intérprete. Los programas escritos en programas de alto nivel pueden ser traducidos con ambas herramientas. Con esta técnica las coordenadas de las trayectorias se obtienen ya sea midiendo los puntos o se toman de una base de datos. Estos valores se definen como variables numéricas o constantes en el programa. Existen muchos lenguajes actualmente. Algunos son exclusivos de las marcas de robots por ejemplo el KR1 de Kuka, otros son más generales, como el V++ o el RAPID.

En el método gráfico, contexto en donde se sitúa esta tesis, la programación y la ejecución del proceso se muestran con modelos de los objetos y del robot en un ambiente simulado por computadora. La calidad de la visualización es variada, pero actualmente existen sistemas que incorporan no sólo ocultamiento de fases sino también sólidos con texturas.

Hay dos maneras de usar el ambiente gráfico para programar. Una de ellas requiere mover el robot en el ambiente virtual basándose únicamente en la relación espacial de este con su ambiente. Este método es el que se utilizará en la tesis, junto con la programación textual. La segunda manera involucra el uso de herramientas de software que ayuden al operador, por ejemplo para elegir la trayectoria más óptima. Estas funciones podrían incorporarse al sistema más adelante.

Podemos encontrar muchas ventajas de programar fuera de línea [Young y Bennaton 88]. La primera de estas es la seguridad. De todos los accidentes en instalaciones robotizadas, más de un tercio ocurren durante la etapa de programación. Estos accidentes son causados principalmente por el movimiento inesperado del robot mientras el operador se encuentra a su alcance. Al utilizar un sistema de simulación, este tipo de movimientos (inesperados) no causan daño y son detectados fácilmente.

El beneficio económico de utilizar sistemas de simulación consiste en la reducción de errores caros en la etapa de planeación, ya que se verifica el desempeño de una célula robótica mucho antes de realizar cualquier gasto o de detener la línea de producción. Además la simulación puede ser usada para demostrar la eficiencia de una línea de trabajo a los coordinadores o directores. Este tipo de presentación visual muchas veces puede ser útil para obtener la aprobación para la puesta en marcha de un proyecto o para la compra de robots y equipo.

Como beneficio logístico podemos decir que el utilizar un sistema de simulación para programación implica que diferentes robots pueden ser programados con el mismo lenguaje de control. Esto permite que el programador no requiera de un profundo conocimiento de los distintos lenguajes en caso de existir diferentes robots. Además de la ventaja en muchos casos de la ayuda de herramientas de software y comandos de alto nivel.

Todo esto reduce el tiempo gastado en la programación del robot y no solo significa que el programador puede dedicarse a otra tarea, si no que la célula robótica entrará en funcionamiento más rápido.

Una vez que la célula está en operación puede requerirse modificar el programa realizado de alguna manera. Estos cambios pueden llevarse a cabo y ser verificados fácilmente en el sistema de simulación mientras la célula está todavía en operación. Este nuevo programa puede ser entonces cargado al controlador del robot durante una parada de mantenimiento programada. Así no se pierde tiempo de producción en ningún momento.

2.3.3 Programación a nivel tarea.

En este caso la tarea a realizar es definida en lugar de especificar cada movimiento del robot. En base a esto se genera "automáticamente" el programa. La tarea se define en términos de un lenguaje de alto nivel. Este esquema requiere que el sistema tenga la habilidad de realizar muchos y distintos tipos de tareas. Su principal dificultad radica en la definición del lenguaje de alto nivel. Sin embargo se ha avanzado bastante en esta área gracias a la inteligencia artificial. Aquí podemos reconocer tres áreas importantes según Lozano-Pérez [92]:

- Modelado del mundo
- Especificación de la tarea
- Síntesis de programación.

El modelo del mundo debe incluir por lo menos lo siguiente: descripción geométrica de todos los objetos, incluido el robot y el ambiente de trabajo [Lozano-Pérez, *et al.* 92]. Descripción física de los objetos (por ejemplo masa, inercia). Descripción cinemática de los enlaces. Así como la descripción de las características del robot, por ejemplo límites de articulación, márgenes de aceleración y la capacidad de los sensores. Además es necesario agregar la posición de todos los objetos y enlaces entre estos que formen parte del modelo. Como se puede ver el componente principal de este modelo del mundo es la descripción geométrica de los objetos . Este componente es principalmente proporcionado por sistemas de CAD. Durante la ejecución de la tarea, la información del mundo no cambia, en

comparación con los enlaces cinemáticos que cambian. Es decir en este tipo de programación se representan todos los aspectos físicos de la tarea a realizar para que se demuestre su eficiencia.

Cuando se especifica una tarea, es importante al igual que en el caso anterior tener a la mano la información tanto del robot como del medio en el que se va a desempeñar así como de los objetos a manipular. En este caso para generar una secuencia, es necesario definir los diferentes estados del robot, medio ambiente y objetos en intervalos de tiempo. El programa entonces generará automáticamente los pasos intermedios para alcanzar estos estados. El problema aquí es que puede haber problemas con la información del sistema, ya sea por un error de cálculo o un error de posición. Es decir que el objeto no se encuentre exactamente donde se supone que debe estar, así que es necesario considerar estos casos al diseñar una solución. En otras ocasiones el encargado de utilizar este sistema se basa en su experiencia para decidir que es lo más conveniente para especificar en un modelo o no. Este tipo de programación no puede manejar la incertidumbre en el ambiente de trabajo, además de que es difícil de escribir sus instrucciones.

La síntesis de programación consiste en tres pasos principales: ensamblar la planeación de secuencia con la planeación de movimiento y revisar el planteamiento. Lo que se genera en este caso es un programa a nivel del robot que es muy versátil y útil por lo que no necesita reprogramación. Este programa incluye comandos para tomar los objetos, diferentes tipos de movimientos, comandos para los sensores y prueba de errores. La principal aplicación de este tipo de programas es la manipulación de objetos. Una vez tomado el objeto, el programa debe sintetizar los movimientos que lleven la operación su finalización. Además es tan capaz el programa que inclusive planea como tomar el objeto de manera que no tenga colisión con otros objetos cuando este se mueva. La complejidad de este tipo de programación radica en su capacidad manejar la incertidumbre y poder llevar a cabo la tarea. Sin embargo a pesar de las ventajas que ofrece este sistema, su ejecución debe estar vigilada por sensores (de proximidad o de fuerza). Esto último es muy importante ya que las alternativas toma el programa, como no están predefinidas pueden provocar un accidente y dañar objetos alrededor.

Capítulo 2	Marco Teórico	4
2.1	Robótica.	4
2.1.1	Robot	4
2.2	Robot Industrial	5
2.2.1	Componentes	5
2.2.2	Aplicaciones	12
2.2.3	Sistema Robotizado.....	13
2.3	Programación de Robots	15
2.3.1	Programación en línea	15
2.3.2	Programación fuera de línea.....	16
2.3.3	Programación a nivel tarea.	18
Tabla 2. 1	Características de un robot industrial.....	7
Tabla 2. 2	Unidades del robot industrial KR 125	8
Tabla 2. 3	Tipos de Articulaciones.....	9
Tabla 2. 4	Aplicaciones de robots industriales.....	12
Figura 2. 1	Componentes de un robot industrial.....	6
Figura 2. 2	Configuraciones frecuentes en robots industriales	10
Figura 2. 3	Trayectoria PTP y continua rectilínea LIN.	11
Figura 2. 4	Elementos de una célula robótica	13

Barrientos Antonio, Peñín Luis.F, Balaguer Carlos, Aracil Rafael.. Fundamentos de Robótica. Mc Graw Hill. Madrid 1997.

Coiffet, Philippe. Robot Technology. Volume1 : Modelling an Control. Prentice Hall 1983.

Craig John J. Introduction to Robotics. Addison-Wesley 1986

Goetsch Davis L. Advanced manufacturing technology. Delmar Publishers. New York 1990.

Lozano-Perez T . Handey: a robot task planner. MIT Press. London. 1992.

Young K., Benanton J. Off-line Programming of Robots Using a 3D Graphical Simulation System. Springer-Verlag 1998.