



10

01173

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE
LA PLANEACIÓN TÁCTICA Y OPERACIONAL**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA (MECÁNICA)

PRESENTA

JUAN LEONARDO ROJAS ARRIAGA.

28/12/09

DIRECTOR DE TESIS : M. en I. EUSEBIO JIMÉNEZ LÓPEZ.

COASESOR: Dr. LUIS REYES ÁVILA.

JULIO DEL 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



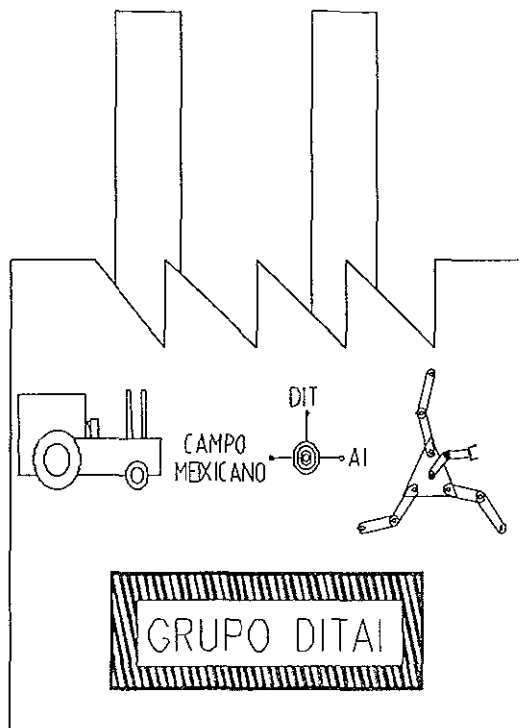
UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

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.

EL GRUPO DITAI



A DIOS

Por darme la oportunidad y capacidad de emprender y ver culminada esta meta.

A MIS PADRES.

Por los principios de responsabilidad y honestidad que me inculcaron.

AL Dr. JUVENTINO SANTIAGO RUIZ.

Por su amistad, motivación y apoyo desde el inicio y hasta el final de esta etapa.

AL M. en Ing. EUSEBIO JIMÉNEZ LÓPEZ.

Porque además de profesor y asesor, supo ser amigo y me entregó su amistad.

A LA LIC. MARTA PATRICIA FAUSTINOS PÉREZ.

Por que su presencia es la luz de mi vida.

A MI HERMANA LIC. MARISELA ROJAS ARRIAGA.

Por su apoyo durante este periodo de preparación.

AL M. en Ing. ALEJANDRO GUTIÉRREZ VELÁSQUEZ.

Por ser el compañero, amigo y hermano

A MIS MAESTROS.

Gracias a todos mis profesores que compartieron sus conocimientos y experiencias.

A todas las personas que directamente ó indirectamente contribuyeron con este trabajo.

Gracias por todo.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	III
Resumen.....	IX
Introducción.....	1
CAPÍTULO I EL MARCO METODOLÓGICO.....	4
1.1. Características y restricciones del problema.....	5
1.2. Primera transformación de materias primas.....	6
1.3. Secuencias de distribución de maquinaria.....	9
1.4. Caracterización y selección de la maquinaria principal y tiempos principales de proceso.....	10
1.5. Selección de maquinaria secundaria.....	12
1.6. Caracterización de trayectorias y distribución final de maquinaria.....	13
CAPÍTULO II DISEÑO DE PLANTA DEL MODULO DE PRODUCCIÓN.....	16
2.1. Características del caso de estudio.....	16
2.1.1. Definición del problema.....	17

2.2.	Análisis de los planos de fabricación.....	20
2.2.1.	Las dimensiones críticas.....	20
2.2.2.	Los puntos de sujeción y localización de la pieza de trabajo.....	21
2.2.3.	Las tolerancias nominales.....	23
2.2.4.	procesos específicos.....	23
2.2.5.	Ensamblajes y subensamblajes.....	24
2.3.	Algunas consideraciones sobre "la ecuación de forma" asociadas con la manufactura de la pieza de trabajo.....	24
2.3.1.	Información mínima asociada con las ecuaciones de forma.....	25
2.3.2.	Los operadores boléanos asociados con las operaciones principales..	28
2.3.3.	Algunas consideraciones sobre la construcción de la ecuación de forma.....	29
2.3.4.	Construcción de la ecuación de forma.....	30
2.3.5.	Secuencias admisibles.....	34
2.3.6.	Primera caracterización y distribución de maquinaria.....	38
2.4.	Los tiempos de proceso.....	42
2.4.1.	Análisis y corrección de los tiempos fijos.....	45
2.4.2.	Caracterización del intervalo de tiempo secundario.....	48
2.5.	Caracterización de la maquinaria de trabajo asociada con las operaciones primarias.....	48
2.5.1.	Selección de las maquinas de soldadura.....	49
2.5.2.	Selección de la maquinaria de troquelado.....	51
2.5.3.	Selección de la máquina de enfriamiento.....	53
2.5.4.	Ubicación preliminar de maquinaria principal según la secuencia de posiciones $SM^{F_2M_{13}}$	53
2.6.	Caracterización de la maquinaria secundaria.....	55
2.6.1.	Algunas consideraciones sobre la caracterización de la maquinaria secundaria.....	56
2.6.2.	Selección de la maquinaria de transporte principal.....	57
2.6.3.	Selección de la maquinaria de transporte auxiliar.....	60

CAPÍTULO III	LAS TRAYECTORIAS DE OPERACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE TRABAJO.....	65
3.1.	Restricciones sobre las trayectorias de trabajo.....	65
3.2.	Caracterización de las trayectorias reales de trabajo y algunas consideraciones importantes.....	66
3.2.1.	Primera consideración sobre las trayectorias de trabajo del sistema de manufactura.....	72
3.2.2.	Segunda consideración sobre las trayectorias de trabajo.....	73
3.2.3.	Tercera consideración de las trayectorias de trabajo.....	74
3.3.	Diseño de las trayectorias de la mesa de trabajo de operación M_{02}	75
3.3.1.	Análisis de las trayectorias de los robots R_3 y R_4	76
3.3.2.	Análisis de la trayectoria del actuador A_{C2}	78
3.4.	Trayectorias de trabajo en la mesa de operación M_{01}	80
3.5.	Trayectoria de trabajo de los robots R_1 , R_2 y R_5	81
3.6.	Análisis de la distribución final de maquinaria.....	83
3.7.	El "tiempo preliminar" de recorrido de "ida" de la pieza de trabajo.....	89
3.7.1.	Crónica preliminar del proceso de ida.....	90
CAPÍTULO IV	ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA PLANEACIÓN OPERACIONAL.....	91
4.1.	Algunas consideraciones sobre el "sistema de control".....	91
4.2.	Algunas Consideraciones sobre la caracterización y distribución de sensores sobre el sistema de producción	97
4.3.	Clasificación de los sensores según su jerarquía.....	98
4.4.	Modularización.....	100
4.4.1.	Jeraquizacion de Módulos.....	102
4.4.2.	Subciclos de arranque.....	102
4.5.	Tiempo de proceso.....	105
4.6.	Crónica de proceso global "ida".....	107
4.7.	El código binario del proceso y las ecuaciones de estado	108

.....

4.8.	Algunas consideraciones sobre programación y simulación de resultados..	114
4.8.1.	Programación y simulación computacional del Módulo de Marcaje	
	Marcaje.....	120
4.8.2.	Salida grafica del módulo de marcaje.....	125
4.8.3.	Salidas graficas del Módulo de Soldadura-Enfriamiento.....	129
5.	CONCLUSIONES.....	134
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	135

Resumen.

Se presenta en este trabajo, el diseño de planta relacionado con un sistema de producción secuencial. Los productos transformados son piezas metal-mecánicas. Se utiliza un marco metodológico asociado con la Planeación Táctica, desarrollado a partir de dos variables conocidas: los planos de fabricación de un producto y el volumen de producción. Dos modelos abstractos son introducidos: la Ecuación de Forma y las secuencias de distribución de Maquinaria Principal. Los tiempos de proceso fueron caracterizados mediante el volumen de producción y el análisis de los planos de fabricación. Se analizan algunas consideraciones sobre la selección y distribución de maquinaria, así como la construcción de las trayectorias de trabajo. Se plantean algunos puntos importantes relacionados con la Planeación Operacional la cual integra el control de procesos y la simulación computacional. Los resultados obtenidos pueden ser aplicados a problemas de simulación de manufactura reales.

Palabras clave: Planeación Táctica. Planeación operacional. Modelado de Sólidos. Trayectorias. Tiempos de Proceso.

Introducción

La Planeación de Procesos (PP) es considerada como la parte medular del diseño e implementación de los Sistemas de Manufactura (SM). La PP consiste en la generación de un plan preliminar y detallado de los procesos u operaciones asociados con la transformación de materias primas. El estudio económico y de factibilidad de un proyecto, esta asociado al plan preliminar, en tanto, el plan detallado se lleva a cabo una vez aprobado el proyecto en términos económicos.

La transformación de materias primas y la obtención de productos manufacturados requieren del estudio y análisis de actividades tales como: operaciones de manufactura, selección y distribución de maquinaria, herramientas, manejo de materiales, tiempos y movimientos, control y sincronización de procesos entre otras [1] y [2]. Todas estas actividades son desarrolladas en la Planeación de Procesos (PP) [1].

La PP puede ser dividida en tres etapas: 1) Planeación Estratégica, 2) Planeación Táctica y 3) Planeación Operacional.

El desarrollo de un plan preliminar de procesos que permita el estudio económico para la implementación de un SM constituye la Planeación Estratégica, en tanto, el estudio de las operaciones de manufactura, selección de maquinaria y herramientas, distribución de maquinaria, manejo de materiales son actividades de la PT. Finalmente, el control, sincronización y monitoreo de eventos que ocurren en una línea de producción y su puesta en marcha son tareas de la PO [1], [3] y [4].

El incremento de los niveles de producción demandado por el mercado, las elevadas normas de calidad en los productos, así como la diversidad de artículos, son tres factores que deben ser considerados en el estudio de la PP. Para el estudio de los actuales *Sistemas de Manufactura* es necesario integrar a la PP disciplinas tales como: Automatización Industrial, Robótica, Inteligencia Artificial, Simulación Computacional entre otras.

Las celdas de manufactura flexibles han sido desarrolladas para satisfacer las actuales exigencias de los mercados de productos manufacturados. La concepción de estos sistemas ha sido posible mediante la integración de las disciplinas anteriormente mencionadas.

La PP es desarrollada en base a marcos metodológicos, algunos de ellos se presentaron en [1] y [3]. Sin embargo, muchos de estos métodos son descriptivos e integran demasiada información que más de ser útil, complican la comprensión de los mismos. En otros casos, las metodologías se orientan a la construcción de los modelos específicos faltando la integración global de tales modelos para la concepción de la PP.

Para el auxilio de la PP diversas herramientas computacionales han sido desarrolladas. El CAD/CAM y el CAPP son softwares que se utilizan para auxiliar las actividades del diseño, la manufactura y la Planeación de Procesos. El Promodel es otra herramienta de ayuda para la PP, incluye el diseño, implementación y simulación de las actividades dentro y fuera de las fábricas. [5] y [6].

Para explotar al máximo estas herramientas computacionales, es necesario conocer por un lado, las formas de operación de tales herramientas y por otro, las metodologías y modelos sobre los cuales están basados.

Este trabajo este orientado al estudio de una de las etapas de la PP; la Planeación Táctica. Los planos de fabricación de un producto y el volumen de producción son dos variables sobre los cuales se centra este estudio.

El objetivo es aplicar un marco metodológico relacionado con la Planeación Táctica construido básicamente con las dos variables anteriormente mencionadas. Además de integrar modelos de transformación de materias primas y de distribución de maquinaria, utilizando el álgebra de Boole. También esta misma álgebra será utilizada para generar las ecuaciones de estado que integran un PLC (Programin Logic Control).

Este trabajo se divide en cuatro capítulos. El primer capítulo, se presenta el marco metodológico y las restricciones en que esta soportado. Se dan los pasos sistemáticos para desarrollar las actividades de: transformación de materias primas, selección y distribución de maquinaria y caracterización de trayectorias.

En el segundo capítulo, se define el problema asociada con un caso de estudio y se plantean restricciones. Se desarrollan dos modelos abstractos de manufactura, uno relacionado con la transformación de sólidos y otro con la distribución de la maquinaria principal. La caracterización de los tiempos de proceso es realizada por medio del volumen de producción y los planos de fabricación. Se presentan algunas consideraciones sobre la selección y distribución de la maquinaria de transporte.

En el tercer capítulo, se caracterizan las trayectorias de trabajo de la maquinaria sobre el módulo de producción y se presentan la distribución final de los elementos de trabajo que integran la línea de producción.

En el cuarto capítulo, se plantean algunas consideraciones sobre la Planeación Operacional. Se estudia el sistema de control y algunos aspectos de la simulación computacional del caso de estudio. Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo.

Introducción: Presentaremos en este capítulo el marco metodológico que será utilizado para diseñar un sistema de producción relacionado con la transformación de productos metal-mecánicos. El alcance de la metodología consiste en las siguientes actividades:

- Características y restricciones del problema.
- Transformación de materias primas (modelo abstracto).
- Primera distribución de maquinaria (modelo abstracto).
- Selección de maquinaria y tiempos de procesos.
- Selección de maquinaria de transporte.
- Caracterización de trayectorias de trabajo y segunda distribución de maquinaria.

Estas actividades forman parte de la Planeación Táctica. Las restricciones sobre las cuales se basa la metodología son:

- 1) Las variables conocidas son: los planos de fabricación, el volumen de producción y las restricciones de mercado.
- 2) Se considera fija y conocida la Planeación Estratégica.
- 3) No se incluyen los pasos para el diseño de control, esto es: la Planeación Operacional es fija y conocida.
- 4) La selección de maquinaria y herramientas se realiza tomando la información general.

- 5) No se incluyen estudios detallados de tiempos y movimientos.
- 6) La distribución de planta se realiza tomando en cuenta los máximos radios de alcance de la maquinaria (no se llevan a cabo análisis de optimización).

Las ideas aquí propuestas son tomadas de [7] y [8]. El marco metodológico desarrollado en [7] incluye el estudio de la Planeación Táctica y Operacional fijando el estimado de costos y consiste en 137 pasos los cuales permiten analizar, diseñar y simular los movimientos controlados y sincronizados de los elementos de trabajo que integran un sistema de producción. A continuación serán planteados los pasos de la metodología.

1.1. Características y restricciones del problema

En esta parte, se definen las características del problema. Básicamente se requieren dos datos fundamentales:

- 1) El volumen de producción (V_p).
- 2) Las especificaciones y requerimientos del producto dados en los planos de fabricación (PF) y las restricciones del mercado.

Se plantean las restricciones a las cuales estará sujeto el modelo de manufactura, determinando si existen o no, infraestructura que pueda ser utilizada para caracterizar los procesos. Se define el problema general siguiente:

"Dados V_p , PF encontrar la Planeación Estratégica (PE), la Planeación Táctica (PT) y la Planeación Operacional (PO), tal que, las restricciones del modelo y del mercado se satisfagan".

Procederemos a continuación a establecer los primeros pasos de la metodología, esto es:

- Caracterice el problema y analice las restricciones del mercado.
- Determine las restricciones del modelo.

- Defina el problema general (o particular según el caso).

Una vez planteados los pasos anteriormente escritos se realiza en la interpretación y el análisis de los planos de fabricación. Esto es:

- Analice los planos de fabricación del producto bajo los pasos siguientes:
 - a) Identificar y caracterizar las dimensiones críticas.
 - b) Identificar y caracterizar los puntos de sujeción y localización de la pieza en estudio.
 - c) Caracterizar las tolerancias nominales.
 - d) Identificar los procesos específicos, así como las características de la materia prima.
 - e) Identificar los ensambles y subensambles de las partes que componen la pieza de trabajo.

1.2. Primera transformación de materias primas

En esta parte, se presenta un modelo abstracto de manufactura, construido principalmente con la información dada en los planos de fabricación y los pasos anteriormente descritos. Se integran además, dos conceptos: la imagen virtual de sólidos regularizados y los operadores booleanos parametrizados. Se construye una ecuación que representa las diferentes etapas de transformación de las materias primas hasta la obtención del producto terminado. Es necesario visualizar las materias primas, los productos subprocesados y el producto final de forma tridimensional. La expresión obtenida será llamada Ecuación de Forma [9]. A continuación se exponen los pasos importantes que se requieren para construir el primer modelo Abstracto de Manufactura. Esto es:

- Identifique la forma geométrica tridimensional de las materias primas y producto finalizado.

- Asociar formas geométricas a las diferentes etapas de transformación de materias primas, tomando en cuenta la información impresa en los planos de fabricación y del punto anterior.
- Identificar (de los planos de fabricación) los procesos de manufactura asociados a la transformación de la pieza de trabajo.
- Caracterice las operaciones de manufactura primarias, es decir, aquellas operaciones donde se transforme la pieza de trabajo en términos geométricos.
- Asocie operadores booleanos parametrizados [10] con las operaciones primarias de manufactura caracterizadas en el punto anterior.
- Caracterice y asigne una nomenclatura a los sólidos que representen: materias primas, subproductos y productos terminados, así como a los sólidos idealizados que determinen una operación booleana específica.
- Definir una secuencia arbitraria de operaciones principales de manufactura tomando en cuenta los siguientes pasos:
 - a) El número total de secuencias de operaciones primarias (N_{TSO}) satisface:

$$N_{TSO} = n!$$
 donde "n" es el número de operaciones principales.
 - b) Represente una secuencia de operaciones a través de la nomenclatura siguiente:

$$SF^{F_1O_{23}}$$

T/O	O ₁	O ₂	O ₃
T ₁	1	0	0
T ₂	0	1	0
T ₃	0	0	1

donde $SF^{F_1O_{23}}$ representa una secuencia de forma de la familia F_1 , es decir, la familia caracteriza la primer operación principal realizada sobre la materia prima,

O_{23} significa que la operación siguiente es O_2 y finalmente O_3 . La nomenclatura arriba presentada esta asociada para $n = 3$.

- Una vez seleccionada la secuencia de operaciones construya la ecuación de forma según los pasos siguientes:

- a) Tome la primer operación de transformación de la pieza de trabajo según la secuencia seleccionada. Coloque el operador boleano asociado a la operación principal entre el que representa la materia prima base y el sólido asociado al proceso específico. Construya una primera representación tomando en cuenta lo anteriormente escrito. Dicha representación será llamada Ecuación de Subforma.
- b) Tome el sólido generado por el paso anterior y la segunda operación según la secuencia seleccionada. Construya la segunda ecuación de subforma.
- c) Tome la última subforma y la última operación principal y obtenga la expresión final en términos de subformas del producto terminado.
- d) Expanda la expresión de subformas y obtenga la Ecuación de Forma.
- e) Exprese geoméricamente la ecuación de forma obtenida.
- f) Si la forma geométrica obtenida en el paso anterior no corresponde al producto terminado seleccione otra secuencia de operaciones siguiendo las consideraciones siguientes:

- El número total de ecuaciones de forma (N_{TEF}) satisface:

$$N_{TEF} = n!$$

- Si "r" representa el conjunto de las familias de operaciones primarias de manufactura inadmisibles geoméricamente [11], entonces:

$$N_{TEFA} = \frac{n!}{(n-r)!r!}$$

siendo N_{TEFA} el número de ecuaciones de forma admisibles.

- g) Tome una secuencia de operaciones admisible y construya la ecuación de forma siguiendo los pasos a-g.

1.3. Secuencias de Distribución de Maquinaria

El objetivo en esta parte, es el de presentar otro modelo abstracto de manufactura el cual será llamado "Modelo de Secuencias de Distribución de Maquinaria Principal". Utilizaremos un nivel de abstracción máximo para seleccionar la maquinaria, así como la hipótesis de que una máquina solo puede realizar una y solo una operación primaria. El orden de operaciones de la maquinaria debe ser secuencial.

- Asocie a cada operador boleano parametrizado una máquina (de operación principal).
- Determine una línea (o cualquier gráfica) de distribución que inicie en algún punto de salida del almacén de materias primas y finalice en el punto final de entrada al almacén de productos terminados.
- Asocie "n" posiciones sobre la línea de distribución, siendo "n" el número de operaciones primarias.
- Seleccione una Ecuación de Forma Admisible.
- Por cada posición sobre la línea de distribución asocie una máquina siguiendo el orden de la secuencia de operaciones.
- El número total de secuencias de distribución (N_{TSO}) de maquinaria principal sobre la línea de distribución satisface:
$$N_{TSO} = m! = n!$$
donde "m" es el número total de máquinas principales.
- Una secuencia de Distribución de Maquinaria puede ser representada de la forma siguiente:

$$SM^{F_1 P_{23}}$$

M/P	P ₁	P ₂	P ₃
M ₁	1	0	0
M ₂	0	1	0
M ₃	0	0	1

siendo $SM^{F_1 P_{23}}$ la secuencia de distribución de maquinaria de la familia F_1 (máquina ubicada en la primer posición) con posición 2 y 3 sobre la línea de distribución.

- El conjunto admisible de secuencias de Distribución de Maquinaria principal satisface al conjunto admisible de Ecuaciones de Forma.
- Si una ecuación de forma es inadmisibles, entonces su respectiva secuencia de Distribución de Maquinaria también es inadmisibles.
- Analice del conjunto admisible de Ecuaciones de Forma cual es la más apropiada y asocie su respectiva Secuencia de Distribución de Maquinaria, tomando en cuenta lo siguiente:
 - a) Mínima distancia de recorrido de la pieza de trabajo sobre la línea de distribución.
 - b) No tomar en cuenta la maquinaria de transporte.

1.4. Caracterización y Selección de la Maquinaria Principales y Tiempos Principales de Proceso

En esta sección, se presenta el análisis sobre los tiempos de proceso de las operaciones sobre la línea de distribución. Se utiliza la variable V_p (Volumen de producción) para determinar el tiempo de producción unitaria (T_{pU}). Con los tiempos primarios de proceso y las restricciones del problema se selecciona la maquinaria principal.

- Seleccione una Ecuación de Forma admisible así como su correspondiente Secuencia de Distribución de Maquinaria.
- Determine el tiempo de producción unitaria (T_{pU}) de acuerdo a la expresión siguiente:

$$T_{pU} = \frac{J}{\# \text{ piezas}}$$

donde J es la jornada anual de trabajo.

- Determine los tiempos fijos de proceso según los planos de fabricación y las operaciones principales de manufactura [8].
- Analice las expresiones siguientes:

a) $T_{pU} = \Sigma T_F$ (ΣT_F es la suma de tiempos fijos).

b) $T_{pU} > \Sigma T_F$

c) $T_{pU} < \Sigma T_F$

- Establezca la igualdad siguiente:

$$I_{T_{si}} = T_{pU} - \Sigma T_F \geq 0$$

siendo $I_{T_{si}}$ el intervalo de equilibrio de tiempos.

- Si $T_{pU} \geq 0$, entonces el proyecto es técnicamente viable.

- Si $T_{pU} < \Sigma T_F$, entonces:

- a) Realice un análisis de reducción de tiempos fijos y determine si:

$$T_{pU} \geq \Sigma T_{FM}$$

siendo ΣT_{FM} la suma de tiempos fijos modificables.

- b) Si el paso a) no es satisfecho, introduzca una línea de producción paralela.

- c) Si el paso b) no es viable, entonces se determina la no-factibilidad del proyecto.

- Si se presentan las condiciones:

a) $T_{pU} \geq \Sigma T_{Fi}$ ó

b) $T_{pU} \geq \Sigma T_{FMi}$

entonces el proyecto es *técnicamente viable*.

- Determine las especificaciones del proceso, así como las restricciones del modelo para seleccionar preliminarmente la maquinaria principal. Agrupe estas restricciones en el conjunto R_S .

- La información necesaria para seleccionar preliminarmente la maquinaria es dada por:

$$M_i = \{R_S, I_M, T_{Fi}\}$$

Aquí, R_S son las restricciones del modelo, I_M es la información mínima de manufactura asociada con una operación principal, M_i es la i -ésima máquina de operación primaria en tanto T_{Fi} es el i -ésimo tiempo primario.

- Una vez seleccionada preliminarmente la maquinaria de trabajo principal, compruebe que las especificaciones de la máquina satisfagan los requerimientos mínimos de manufacturabilidad de la operación.
- Algunos datos importantes a considerarse en la selección de maquinaria, por ejemplo un robot, son:
 - Máximo radio de alcance (Reach).
 - Velocidad máxima.
 - Aceleración máxima.
 - Grados de libertad.
 - Rango de temperatura de operación.
 - Máxima carga.
 - Flexibilidad.
 - Repetibilidad.
 - Grado de automatización.
- Con los datos de los planos de fabricación en relación con las tolerancias requeridas seleccione o diseñe la herramienta de trabajo.

1.5. Selección de Maquinaria Secundaria

Presentaremos en esta sección algunos criterios relacionados con la selección de la maquinaria de transporte. Esto es:

- Determine la distancia comprendida del punto a la salida del almacén de materias primas y el punto de entrada al almacén de productos terminados.
- Sobre la línea de distribución ubique la maquinaria principal siguiendo la secuencia de distribución de maquinaria.
- Determine las distancias entre:
 - a) Almacén de materias primas y la ubicación de la primer máquina (principal).
 - b) Entre la primer máquina y la segunda máquina (principal).
 - c) Entre la i-ésima máquina y el almacén de productos terminados.
- Caracterice las operaciones de transporte de acuerdo a:
 - a) Transporte primario: de máquina principal a máquina principal.

- b) Transporte secundario: transporte de precisión sobre las mesas de trabajo y las salidas y entradas de materias primas y productos terminados de los almacenes.
- Determine el grado de libertad de las operaciones de transporte.
- Seleccione primeramente la maquinaria de transporte principal utilizando los datos siguientes:
 - a) Los grados de libertad requeridos y el peso de las materias primas.
 - b) La distancia de transporte.
 - c) Los parámetros cinemáticos y dinámicos de la máquina.
 - d) Las restricciones del modelo y las especificaciones del proceso (R_S).
 - e) Seleccione la herramienta según las características de la pieza a transportar.
- Distribuya la maquinaria de transporte principal sobre la línea de procesos.
- Determine si se requieren transportes secundarios.
- La maquinaria de transporte secundario no debe realizar movimientos mayores de tres grados de libertad.
- Seleccione la maquinaria de transporte secundario.
- Distribuya la maquinaria de transporte secundario sobre las mesas de operación, así como las bandas síncronas en las salidas y entradas de los almacenes.
- Ajuste las distancias de operación tanto de proceso como de transporte siguiendo el límite del máximo radio de alcance de la maquinaria seleccionada.
- Tome en cuenta que las distancias de transporte no deben ser iguales ni mayores a los radios de alcance de la maquinaria.

1.6. Caracterización de Trayectorias y Distribución Final de Maquinaria

En esta parte, se presentan los pasos a seguir para caracterizar y construir las trayectorias de trabajo asociados con los movimientos de la maquinaria. [8] En [8] se determinan las trayectorias de ida y vuelta, así como la asignación y cálculo de los tiempos de proceso. Finalmente se fijará la distribución de la maquinaria de trabajo.

- Determine los lugares geométricos de las trayectorias asociadas con los órganos terminales de la maquinaria de trabajo según la jerarquía siguiente:

- a) La maquinaria principal.
- b) La maquinaria de transporte principal.
- c) La maquinaria de transporte secundario.
- Con los tiempos fijos y las distancias de operación de la maquinaria principal, calcule las velocidades de operación.
- Construya el perfil de velocidad tomando en cuenta lo siguiente:
 - a) Una trayectoria completa se divide en dos partes: trayectoria de ida y trayectoria de vuelta.
 - b) Para cada proceso se deben determinar los lugares geométricos de ida y de vuelta de la trayectoria.
 - c) Una trayectoria de ida por lo general se divide en dos partes:
 - 1) Trayectoria de acercamiento.
 - 2) Trayectoria de operación real.

Las distancias y tiempos asociados con las trayectorias de operación real son generalmente conocidas, en tanto, los parámetros (de distancia y tiempo) relacionadas con las trayectorias de acercamiento se asignan según parámetros cinemáticos de la maquinaria.
 - d) Las trayectorias de vuelta se determinan una vez terminada la operación principal y finalizan en el punto de partida de la máquina asociada. También las distancias y tiempos son asignados según parámetros cinemáticos de la maquinaria.
 - e) El perfil de velocidad debe ser determinado tanto en los lugares geométricos de ida como en los de vuelta.
- El perfil de velocidad se construye en el plano comprendido entre la ordenada (t) tiempo y la abscisa q donde $q(t)$ es la función de perfil de velocidad.
- Para construir el perfil de velocidad tome en cuenta las condiciones iniciales de cada punto específico de la trayectoria de ida y vuelta.
- La gráfica obtenida será llamada perfil de velocidad.
- Obtenga la función asociada a la gráfica del perfil de velocidad caracterizando los lugares geométricos que componen a la gráfica.
- Una vez obtenida la función del perfil de trayectoria, obtenga los perfiles de posición y aceleración de acuerdo a los pasos siguientes:

- a) Para el perfil de posición, integre la función de velocidad.
 - b) Para el perfil de aceleración derive con respecto al tiempo la función de velocidad.
- Obtenga las gráficas asociadas con los perfiles de posición y aceleración.
 - Construya las trayectorias finales que integren las funciones asociadas a los lugares geométricos y las funciones relacionadas con los perfiles de trayectoria.
 - Una vez determinadas todas las trayectorias de la maquinaria realice un dibujo de planta que integre tanto los elementos de trabajo como las trayectorias.
 - Las posiciones finales de los órganos terminales sobre las trayectorias y las ubicaciones de la base de la maquinaria se determinan de acuerdo al máximo radio de trabajo.
 - Compruebe que los parámetros cinemáticos de la maquinaria estén en rangos funcionales de acuerdo a la distribución de maquinaria y las trayectorias.
 - Conocida el área de trabajo y la línea de distribución, distribuya la maquinaria que integre al sistema de producción.

Para diseñar el sistema de control asociada con el caso de estudio, en el capítulo IV se presentan algunas consideraciones sobre la Planeación Operacional.

CAPÍTULO II DISEÑO DE PLANTA DEL MODULO DE PRODUCCIÓN

Introducción: Presentaremos en este capítulo el diseño de planta de un proceso asociado a la transformación de un producto metal-mecánico. Los 5 primeros puntos generales de la metodología propuesta en el capítulo 1 serán utilizados para analizar, diseñar y seleccionar los elementos que integran al sistema de manufactura. La pieza de trabajo estudiada es hipotética. Las operaciones principales asociadas son: soldadura, marcaje y enfriamiento. Las diferentes etapas de transformación de materias primas serán representadas por una Ecuación de Forma [9]. Del análisis relacionado con las Ecuaciones de Forma, se determinan las secuencias de distribución de maquinaria principal. Se plantean algunas consideraciones sobre la selección de la maquinaria de transporte y se presenta una distribución preliminar de los elementos que constituyen al sistema de producción. Los datos conocidos son: los planos de fabricación, el volumen de producción y las restricciones técnicas del mercado en este capítulo esta asociado con la Planeación Táctica de procesos.

Consideración. Con el propósito de analizar y describir las etapas que constituyen la Planeación Táctica, repetiremos a lo largo de este capítulo, algunos puntos de la metodología dados en el capítulo I.

2.1. Características del caso de estudio

Presentaremos en esta sección las especificaciones asociadas con la pieza de trabajo que en este caso, estarán integradas a los llamados "Planos de Fabricación".

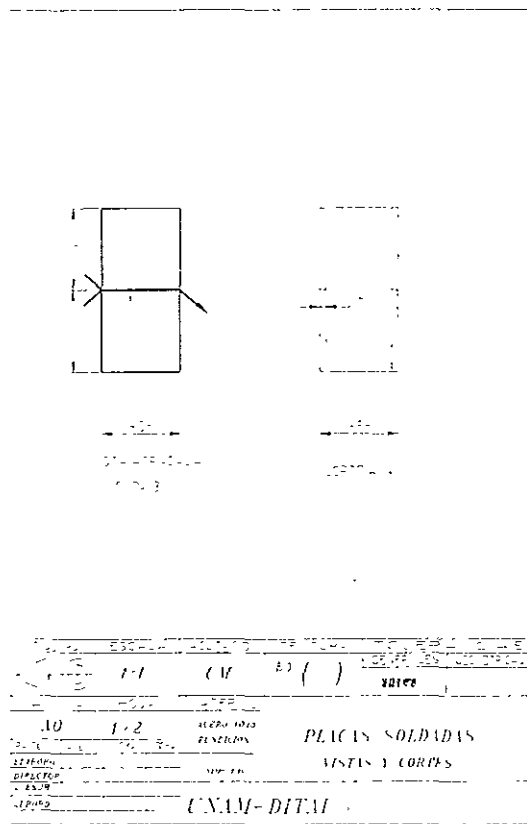


Figura 2.1 Los planos de fabricación.

Nuestro problema estará sujeto a las consideraciones siguientes:

- 1.- El mercado es fijo (Empresa "B").
- 2.- Se considera que el "estimado de costos es viable".
- 3.- No realizaremos estudio detallado de tiempos y movimientos.
- 4.- No se utilizará ningún método de optimización de procesos.
- 5.- El área de trabajo es conocida.
- 6.- La distribución de almacenes es fija y conocida.
- 7.- La pieza de trabajo es "hipotética".
- 8.- Los tiempos de proceso son discretos.
- 9.- La selección de maquinaria y herramientas se realizará tomando en cuenta datos generales.

Una vez conocidas las limitaciones del problema a resolver, a continuación presentaremos las restricciones generales (restricciones técnicas de mercado) impuestas en este caso por la empresa "B", esto es:

- a.- El volumen de producción requerido es de 871,000 piezas/anales.
- b.- El sistema de producción deberá operar en forma totalmente automática.
- c.- El tiempo de producción al día es de 16 horas.
- d.- El sistema de producción deberá ser flexible en caso de aumento o disminución de la demanda del producto.
- e.- Las especificaciones del producto son las mostradas en los planos de fabricación.

Las restricciones generales nos serán de utilidad para diseñar adecuadamente a nuestro sistema de producción.

La descripción general del proceso se presenta a continuación:

"Se requiere unir mediante dos cordones de soldadura las piezas A y B mostradas en la figura 2.2. Sobre la pieza A y en el lugar "X" se debe realizar un marcaje de apoyo para un ensamble posterior. La preparación de las piezas debe realizarse de manera manual, en este caso, los sistemas de sujeción y transporte. Las piezas A y B son de fundición de acero 1040, y las especificaciones totales son mostradas en la figura 2.1".

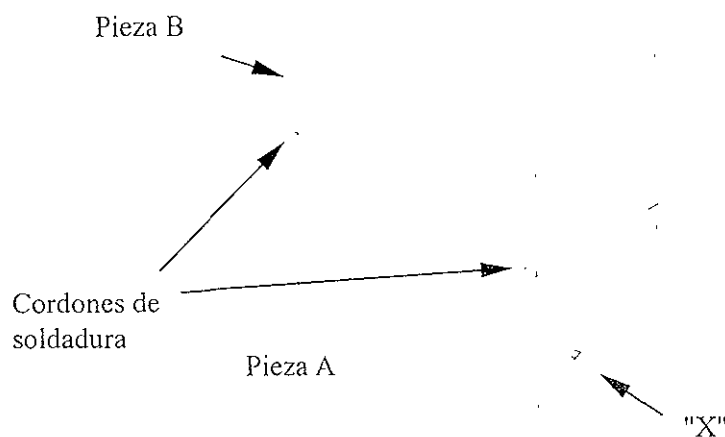


Figura 2.2. Vista isométrica de la pieza de trabajo.

2.2. Análisis de los planos de fabricación

Nuestro interés en esta sección es el analizar y obtener toda la información impresa en los planos de fabricación de nuestra pieza de trabajo, motivo de nuestro estudio. Para nuestros propósitos utilizaremos los pasos siguientes:

- 1.- Identificar y caracterizar las dimensiones críticas.
- 2.- Identificar y caracterizar los puntos de sujeción y localización de la pieza de trabajo.
- 3.- Caracterizar las tolerancias nominales.
- 4.- Identificar los procesos específicos así como las características de los materiales.
- 5.- Identificar los ensambles y subensambles de las partes que componen la pieza de trabajo.

A continuación procederemos a obtener la información de las especificaciones de la pieza de trabajo utilizando los pasos anteriormente descritos.

2.2.1. Las dimensiones críticas

De los planos de fabricación mostrados en la figura 2.1. las dimensiones críticas son:

- 1.- Longitud del cordón de soldadura que llamaremos $d_1 = 9.56$ cm.
- 2.- Las coordenadas del marcaje que denominaremos "M" son: $x = 3$, $y = 3$ con respecto a la esquina "R" (0,0) mostrada en la figura 2.3.
- 3.- La distancia " d_2 " = 10 cm medida de la esquina "R₁" o punto de referencia al punto de inicio del cordón de soldadura(ver figura 2.3).
- 4.- Los datos del marcaje son: $\phi = 0.4$ mm de profundidad y $l = 0.1$ mm y la geometría es cónica truncada.

Consideraremos que los datos arriba presentados son únicos y suficientes para el desarrollo de este trabajo.

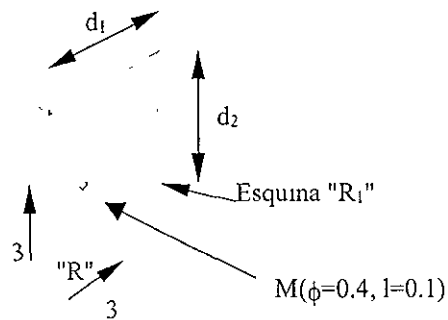


Figura 2.3. Las dimensiones críticas.

2.2.2. Los puntos de sujeción y localización de la pieza de trabajo

La información asociada con los puntos de sujeción y localización de nuestra pieza de trabajo se presenta a continuación:

- 1.- Puntos de sujeción (a diseñar).
- 2.- Planos (P_A) apoyo primario de soldadura de 9.56 cm. X 20 cm.
- 3.- Plano (P_B) de apoyo al marcaje "M" de 6.56 cm. X 20 cm.
- 4.- Caras 2 y 4 de apoyo, marcaje y soldadura.

La información arriba presentada se muestra en la figura siguiente:

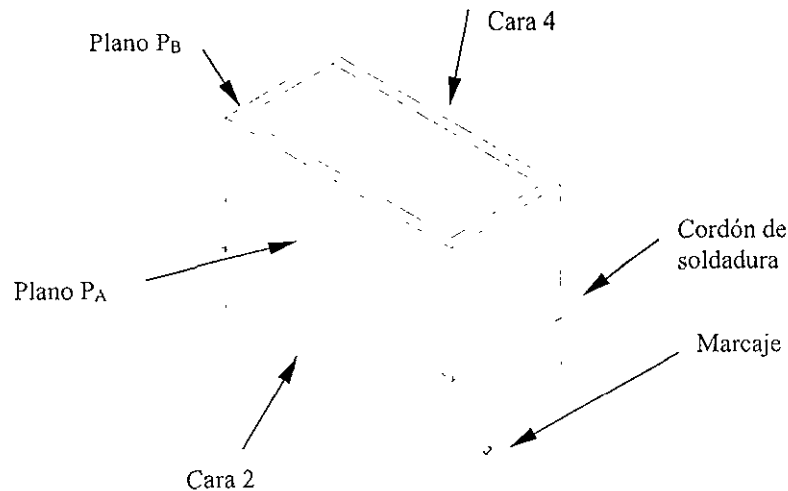


Figura 2 4. Puntos de localización.

Lo puntos de sujeción y transporte son caracterizados de la manera siguiente:

- 1.- Puntos de sujeción (p_U) asociado con la unión de preparación de las piezas A y B mostradas en los planos de fabricación (ver figura 2.5.)
- 2.- Puntos de sujeción (p_t) asociados con el transporte de la pieza.

Observación: Los procesos asociados con el diseño de los sistemas de “sujeción y transporte” no serán analizados en este trabajo. Además, los procesos realizados en los sistemas de sujeción sobre las piezas de trabajo no afectan la funcionalidad de la pieza. Llamaremos S_U y S_T a los sistemas de sujeción y transporte los cuales son mostrados en la figura 2.5.

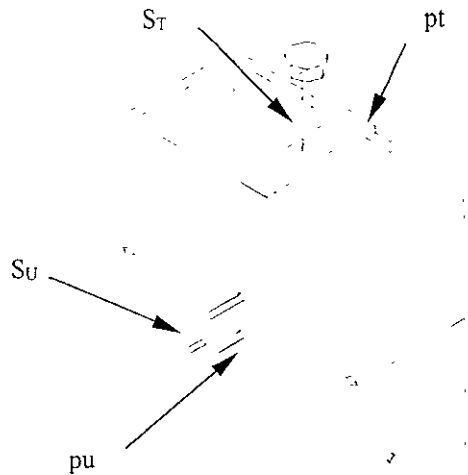


Figura 2.5 Sistemas de sujeción y transporte.

2.2.3. Las tolerancias nominales

Las tolerancias nominales asociadas con nuestra pieza de trabajo se presentan a continuación:

- 1.- Soldadura: ± 0.1 mm.
- 2.- Marca je "M": ± 1 mm.
- 3.- Plano de apoyo (unión) de piezas A y B: ± 0.001 mm.
- 4.- Dimensiones generales de la pieza A y B: ± 0.01 mm.

Los datos arriba presentados nos serán de utilidad para seleccionar adecuadamente la maquinaria de trabajo y los herramientas asociados a la manufactura de la pieza de trabajo, motivo de nuestro estudio.

2.2.4. Procesos específicos

Al observar los planos de fabricación mostrados en la figura 2.1 podemos obtener la información siguiente:

- 1.- Soldadura tipo MIG. Preparación en "V".

- 2.- Marcaje a toque sencillo.
- 3.- Enfriamiento de la pieza: tiempo 6 seg.
- 4.- Piezas A y B de fundición.

Observación: Notemos que la información anteriormente obtenida no es completa. Nuestro interés es caracterizar en forma general a los procesos específicos y mediante la mínima información generar el estudio de la Planeación Táctica. El proceso de enfriamiento es considerado como tal (proceso específico) puesto que al realizarse el proceso de soldadura, las piezas A y B tienen un incremento de temperatura y de volumen respectivamente.

2.2.5. Ensamblajes y subensambles

Notemos de las figuras 2.1 y 2.2 que el único proceso de ensamble, por llamarlo así, es la unión de preparación de las piezas A y B mediante el sistema de sujeción mostrado en la figura 2.5.

2.3. Algunas consideraciones sobre "La Ecuación de Forma" asociadas con la manufactura de la pieza de trabajo

Nuestro objetivo en esta parte, es construir una representación "primaria" de las fases de manufactura de la pieza de trabajo motivo de nuestro estudio. Tal representación será llamada en este trabajo "Ecuación de Forma". Los fundamentos teóricos y los alcances de este tipo de representación pueden consultarse en las referencias [9] y [10].

Las ecuaciones de forma representan las diferentes etapas de transformación en términos de manufactura de una pieza de trabajo. Por ejemplo, una materia prima es transformada de tal manera que la parte resultante sea el producto terminado. Las fases de la transformación son caracterizadas por los llamados "Operadores Boléanos" asociados con operaciones de manufactura bajo un nivel llamado de "abstracción

máxima”; esto es: se toman las especificaciones mínimas tanto geométricas como de manufactura de la pieza de trabajo para obtener las distintas fases de transformación de las materias primas representadas por la Ecuación de Forma.

Por tanto, de los planos de fabricación de nuestra pieza de trabajo se obtiene la información mínima tanto de los procesos de manufactura como de las características geométricas de las materias primas. Los pasos que a continuación presentaremos nos serán de utilidad para la construcción de la “ecuación de forma”.

2.3.1. Información mínima asociada con las ecuaciones de forma

- 1.- Identificar la forma geométrica tridimensional de las materias primas y del producto finalizado.
- 2.- Asociar formas geométricas a las diferentes etapas de transformación de las materias primas, tomando en cuenta la información impresa en los planos de fabricación y la información del punto 1.
- 3.- Identificar los procesos de manufactura asociados a la transformación de la pieza de trabajo.
- 4.- Identificar las operaciones primarias; es decir, aquellas operaciones donde se transforme la pieza en términos geométricos.

Con estas ideas, a continuación caracterizaremos los elementos primitivos de las ecuaciones de forma:

- a.- Las formas geométricas de la materia prima y el producto terminado se presentan en la figura siguiente:

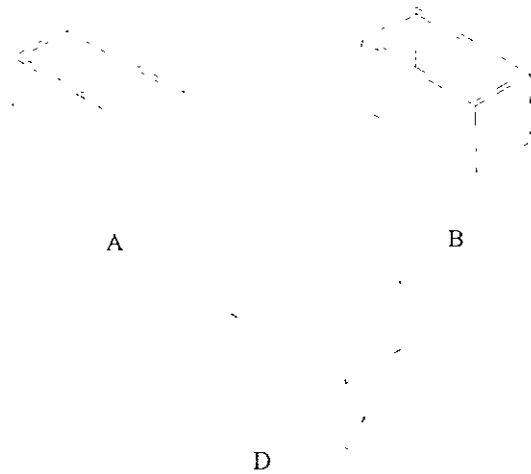


Figura 2.6. Formas geométricas de las materias primas y del producto terminado.

Observación: Nótese de la figura anterior que no tomamos en cuenta los sistemas de sujeción y de transporte, ya que para nuestros propósitos solo nos interesan las representaciones geométricas presentas en la figura 2.6.

b.- Las formas geométricas de las etapas de transformación se presentan a continuación:

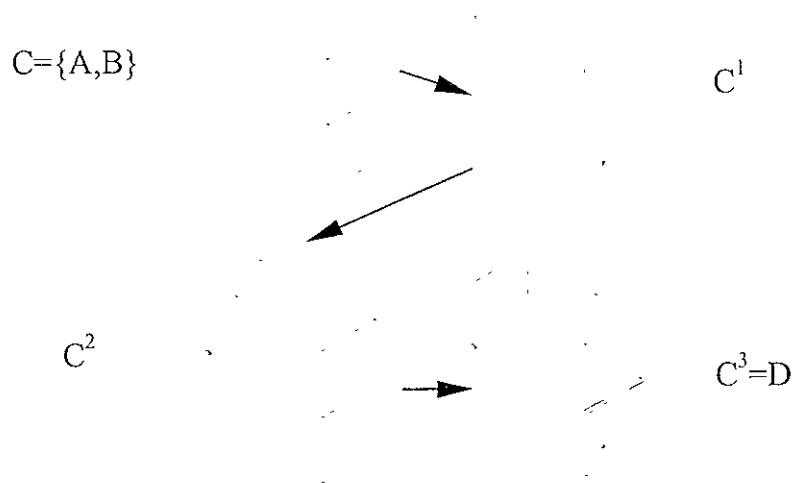


Figura 2.7 Formas geométricas de las etapas de transformación.

Observación: Notemos de la figura anterior que no hemos tomado en cuenta la forma geométrica asociada al enfriamiento, esta consideración la presentaremos posteriormente.

Observemos de la figura 2.7 se puede descomponer la pieza de trabajo finalizada "D" de la manera siguiente:

- 1.- Materias primas.
- 2.- Las formas geométricas de los sólidos o cuerpos asociados a los procesos de manufactura, en este caso, los cordones de soldadura y el sólido extraído del marcaje.

La figura siguiente muestra tal descomposición.

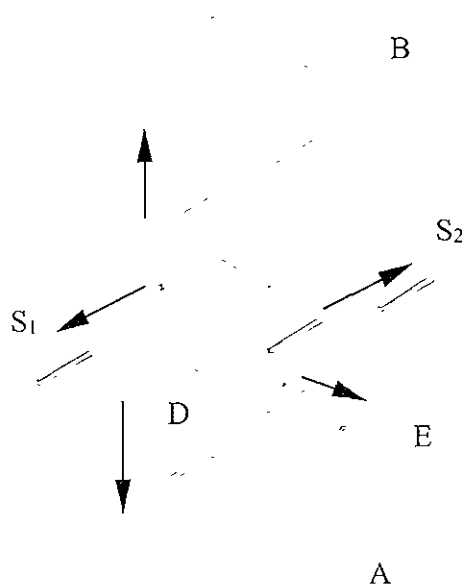


Figura 2.8. Descomposición del producto terminado.

c.- Los procesos de manufactura según los planos de fabricación son:

- 1.- Soldadura.
- 2.- Marcaje.
- 3.- Enfriamiento.

4.- Fundición.

Observación: En este trabajo consideraremos que las piezas o materias primas A y B son adquiridas de una empresa "W".

d.- Las operaciones primarias tomando en cuenta la observación anterior son:

- | | |
|---------------------------|-------|
| 1.- Soldadura. | O_1 |
| 2.- Marcaje o troquelado. | O_2 |
| 3.- Enfriamiento. | O_3 |

Notemos que las operaciones arriba escritas añaden o quitan volumen al cuerpo compuesto $C = \{A,B\}$ mostrado en la figura 2.7. Para nuestros propósitos tomaremos en lugar de volúmenes, el concepto de cuerpos añadidos o extraídos.

2.3.2. Los operadores boléanos asociados con las operaciones principales

Nuestro interés en esta sección, es caracterizar las operaciones principales de manufactura en términos de los comúnmente llamados "Operadores Boléanos"[10].

Una operación principal de manufactura esta asociada con un operador boleano siempre que tal operación transforme la materia prima. Por ejemplo, el proceso (u operación) de soldadura se le asocia la "unión regularizada", en tanto que al marcaje se le relaciona con el operador "diferencia regularizada". Asimismo, la operación de enfriamiento se le puede relacionar con el operador "intersección regularizada". A continuación presentaremos algunas representaciones de tales operadores en términos de manufactura, esto es:

$$1.- O_1 \Leftrightarrow \overset{s}{\cup}$$

$$2.- O_2 \Leftrightarrow \underline{\cap}$$

$$3.- O_3 \Leftrightarrow \bigcap^E$$

Aquí, \bigcup^S representa la unión por soldadura, $\underline{\quad}$ es la operación "diferencia de troquelado" y \bigcap^E representa la "intersección por temperatura".

2.3.3. Algunas consideraciones sobre la construcción de la ecuación de forma

Nuestro interés en esta parte, es de exponer algunas consideraciones geométricas sobre la materia prima y los cuerpos en transformación con el propósito de explicar nuestro modelo abstracto de manufactura, esto es:

- a.- Sobre la materia prima base. En este trabajo llamaremos materia prima base al cuerpo $C = \{A, B\}$ mostrado en la figura 2.6.
- b.- Sobre el cuerpo de la soldadura. Los cordones de soldadura serán representados a través del conjunto siguiente:
 $S = \{S_1, S_2\}$.
- c.- Sobre el proceso de enfriamiento. Consideraremos que las fases del proceso de enfriamiento son presentadas en la figura siguiente:

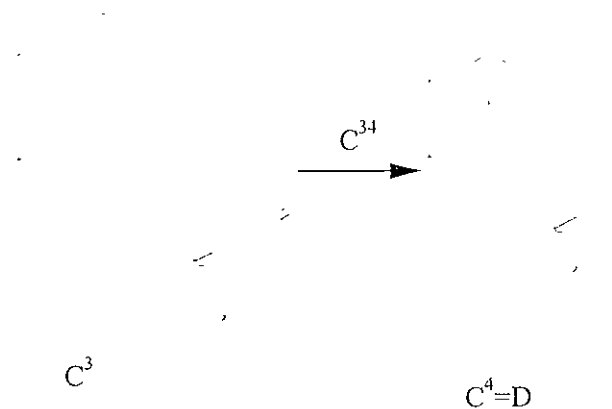


Figura 2.9. Representación geométrica del proceso de enfriamiento.

Con estas ideas a continuación se presentan las variables finales que serán utilizadas para la construcción de la ecuación de forma, esto es:

- | | |
|----------------------------------|-----------------|
| 1.- Materia prima base. | C |
| 2.- Cuerpo de la soldadura. | S |
| 3.- Forma de enfriamiento. | C ³⁴ |
| 4.- Cuerpo extraído del marcaje. | E |
| 5.- Producto terminado. | D. |

2.3.4. Construcción de la ecuación de forma

Nuestra atención será centrada ahora sobre la forma de construir la representación de transformación de las materias primas conocida como "ecuación de forma". Para tal propósito presentaremos a continuación los siguientes pasos:

- 1.- Definir una secuencia arbitraria de operaciones principales de manufactura.
- 2.- Tomando en cuenta las representaciones geométricas de los cuerpos dados en la sección anterior y las operaciones en términos de manufactura, constrúyase la ecuación de forma siguiendo la secuencia seleccionada.

Con estos dos pasos podemos construir la ecuación de forma considerando que el número total de secuencias de operaciones (N_{TSO}) puede ser encontrado aplicando la ecuación siguiente:

$$N_{TSO} = n! \quad (2.1)$$

siendo "n" el número total de operaciones primarias.

Notemos que para nuestro caso de estudio $n = 3$, y por tanto, obtendremos al aplicar la ecuación anterior, 6 secuencias posibles con las cuales podemos transformar las materias primas obteniendo el producto final. La siguiente representación de las secuencias nos será de utilidad para nuestros desarrollos, esto es:

$SF^{F_1O_{23}}$

T/O	O ₁	O ₂	O ₃
T ₁	1	0	0
T ₂	0	1	0
T ₃	0	0	1

Tabla 2.1. Código binario de $SF^{F_1O_{23}}$

Aquí, $SF^{F_1O_{23}}$ representa la "secuencia de forma" de la familia F_1 , es decir: la familia caracteriza la primera operación principal realizada sobre la materia prima, O_{23} significa que la operación siguiente es O_2 y finalmente la operación O_3 .

Estas consideraciones se observan claramente en el código de secuencia donde utilizaremos tiempos (T_1 , T_2 y T_3) llamados de caracterización (no son tiempos de manufactura).

Así entonces, podemos agrupar las secuencias de forma en familias, esto es:

1.- Familia 1 $\{ SF^{F_1O_{23}}, SF^{F_1O_{32}} \}$

2.- Familia 2 $\{ SF^{F_2O_{13}}, SF^{F_2O_{31}} \}$

3.- Familia 3 $\{ SF^{F_3O_{12}}, SF^{F_3O_{21}} \}$

Cabe mencionar que no toda secuencia nos otorgará la forma final de nuestra pieza motivo de nuestro estudio. Tomaremos la secuencia $SF^{F_2O_{13}}$ para construir la ecuación de forma. La representación $SF^{F_2O_{13}}$ indica que primero debe realizarse el marcaje, luego (en T_2) la operación de soldadura y finalmente la operación de enfriamiento, esta secuencia se puede representar en forma lineal y utilizando los operadores boléanos de la manera siguiente:

$$O_2 \rightarrow O_1 \rightarrow O_3$$

Ó, en su forma equivalente,

$$\underline{I} \rightarrow \overset{S}{\cup} \rightarrow \overset{E}{\cap}$$

Con estas ideas, iniciaremos la construcción de la ecuación de forma asociada con la secuencia $SF^{F_2O_{13}}$, esto es:

1.- Tómesese la materia prima base, el primer operador, en este caso \underline{I} , y el sólido asociado a tal operación, esto es:

a.- C

b.- \underline{I}

c.- E

La operación principal de marcaje según la secuencia $SF^{F_2O_{13}}$ puede representarse a través de la expresión siguiente:

$$C^1 = C \underline{I} E \tag{2.2}$$

Aquí, C^1 representa una "ecuación de subforma" [9].

2.- Tómesese la segunda operación, el cuerpo C^1 y sólido S , esto es:

a.- C^1

b.- \bigcup^S

c.- S

La segunda ecuación de subforma es la que a continuación se representa:

$$C^2 = C^1 \bigcup^S S \quad (2.3)$$

3.- Finalmente, presentaremos la última ecuación de subforma, esto es:

a.- C^2

b.- \bigcap^E

c.- C^{23}

Luego,

$$C^3 = C^2 \bigcap^E C^{23} \quad (2.4)$$

La ecuación de forma asociada a la secuencia $SF^{F_2O_{13}}$ se representa de la manera siguiente:

$$D = C^3 = \underbrace{\underbrace{\underbrace{((C \underline{I} E) \bigcup^S S) \bigcap^E C^{23}}_{C^2}}_{C^3}}_{C^3} \quad (2.5)$$

Observemos que la expresión arriba escrita está compuesta de tres procesos primarios: troquelado, soldadura y enfriamiento caracterizados por las operaciones booleanas $\underline{\text{I}}$, \bigcup^S y \bigcap^E respectivamente. Por otro lado, la construcción de las ecuaciones de forma se basa en el concepto de "Nivel de Abstracción Máximo" [10], es claro que el número total de ecuaciones de forma (N_{TEF}) es igual al número de secuencias de operaciones. Esto es:

$$N_{TEF} = n! \quad (2.6)$$

Por tanto, la selección de una secuencia de operaciones de manufactura, no siempre garantiza que una ecuación de forma sea "admisibles" ya sea de forma geométrica o en tiempo de procesos.

Cuando una ecuación de forma no es admisible, entonces toda la familia que contenga dicha(s) operación(es) tampoco es admisible.

Por ejemplo, si en un proceso de taladrado múltiple bajo una línea de acción común, se debe primero realizar la operación de "taladrado de centros" y posteriormente un "taladrado guía", es claro que esta secuencia de operaciones es admisible. Pero si primero se realiza el "taladrado guía" y después el "taladrado de centros" tal secuencia sería inadmisibles posiblemente por tiempos de proceso o por geometría.

2.3.5. Secuencias admisibles

Nuestro interés en esta sección, es caracterizar las secuencias admisibles de nuestro modelo de manufactura, para tal propósito utilizaremos el llamado "proceso de manufactura perfecto".

Un proceso de manufactura se dice "perfecto" si las operaciones primarias se realizan de manera secuenciada sin considerar tiempos secundarios, y solo se toma en cuenta las transformaciones de materia prima. En otras palabras, la materia prima es

transformada sobre la base de la ecuación de forma asociada con la secuencia de operaciones sin considerar los tiempos de proceso. La tabla siguiente caracteriza en términos de la primera operación sobre el sólido compuesto "C" a las familias de secuencias. Esto es:

Familia F_i	Característica	Operador
F_1	Familia de soldadura	$\overset{s}{U}$
F_2	Familia de troquelados	$\overset{I}{I}$
F_3	Familia de enfriamiento	$\overset{E}{\cap}$

Tabla 2.2. Familias de operaciones.

Observemos que la familia F_3 es completamente "inadmisible" pues el cuerpo C no requiere de un proceso de enfriamiento en la primera operación.

Consideración: La secuencia $SF^{F_1O_{23}}$ también es inadmisibles ya que al realizar el proceso de soldadura el sólido C^1 se asocia dos transformaciones; una relacionada con el aumento de volumen del cuerpo "C" por medio del cordón de soldadura y otra por el incremento de volumen por la acción de la temperatura. Tal característica (de aumento de volumen) puede afectar la segunda operación que en este caso, corresponde al troquelado, ya que la localización "X" del punto de referencia del troquelado puede ser "desplazada".

En [7] se ha encontrado una relación que nos determina el número de secuencias admisibles (N_{TSO}), esto es:

$$N_{Tso} = \frac{n!}{(n-r)!r!} \quad (2.7)$$

siendo "r" el número de familias inadmisibles, para nuestros propósitos, F_3 es inadmisibles y por lo tanto $r = 1$. Al sustituir en la expresión anterior para $n = 3$ y $r = 1$

obtenemos que $N_{Tso} = 3$. En este caso las secuencias admisibles son: $SF^{F_2O_{13}}$, $SF^{F_1O_{32}}$, $SF^{F_1O_{23}}$, sin embargo, la secuencia $SF^{F_1O_{23}}$ es inadmisibles por la consideración anterior.

Observación: El hecho de que al aplicar la expresión arriba escrita no se obtuvo la totalidad de las secuencias inadmisibles es porque se utilizan solamente familias, o sea

"r". Las inadmisibilidades de las secuencias resultantes (como el caso de $SF^{F_1O_{23}}$) se realiza bajo otro tipo de consideraciones. Bajo la premisa de que el número de secuencias admisibles es igual al número de ecuaciones de forma "admisibles", a

continuación escribiremos la ecuación de forma asociada con la secuencia $SF^{F_1O_{32}}$, esto es:

$$D = C^3 = \underbrace{\left(\left(\left(C \overset{S}{\cup} S \right) \overset{E}{\cap} C^{23} \right) \overset{I}{\cap} E \right)}_{C^{11}} \quad (2.8)$$

$$\underbrace{\left(\left(C \overset{S}{\cup} S \right) \overset{E}{\cap} C^{23} \right)}_{C^{12}}$$

$$\underbrace{\left(C \overset{S}{\cup} S \right) \overset{E}{\cap} C^{23}}_{C^{13}}$$

Las expresiones de subforma son:

$$C^{11} = C \overset{S}{\cup} S$$

$$C^{12} = C^{12} \overset{E}{\cap} C^{23}$$

$$C^{13} = C^{12} \overset{I}{\cap} E.$$

Las figuras siguientes muestran las ideas geométricas de las secuencias de forma

$SF^{F_1O_{32}}$ y $SF^{F_2O_{13}}$. Esto es:

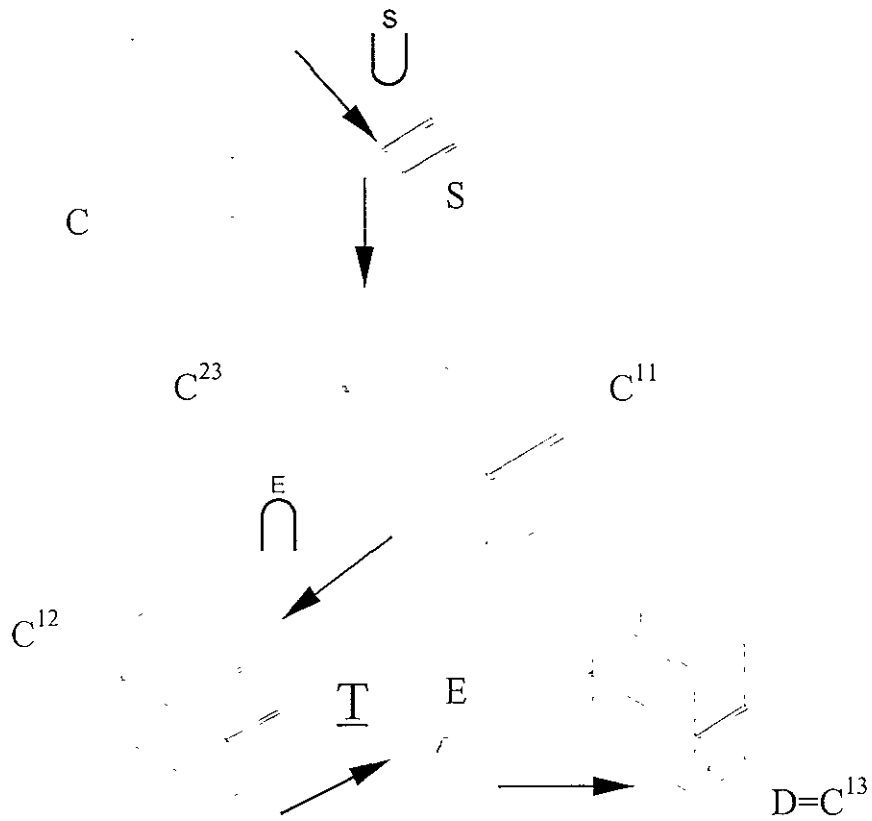


Figura 2.10. Forma geométrica de la secuencia $SF^{F_1O_{32}}$

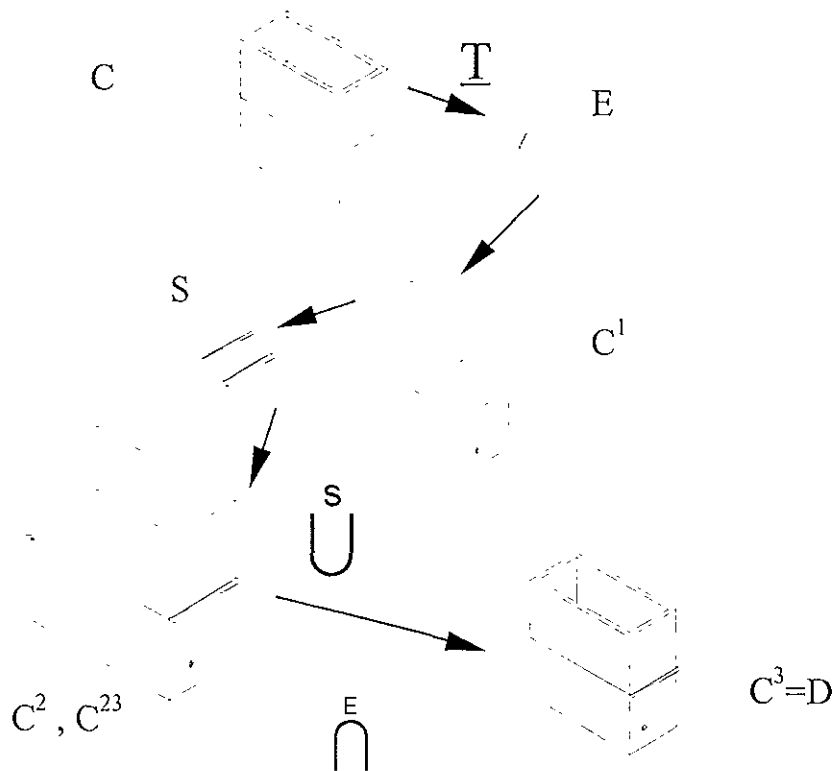


Figura 2.11. Forma geométrica de la secuencia $SF^{F_2O_{13}}$

2.3.6. Primera caracterización y distribución de maquinaria

Nuestro interés en esta sección es utilizar los resultados obtenidos en la sección anterior para caracterizar la maquinaria de trabajo que llamaremos "caracterización perfecta". Posteriormente distribuiremos la maquinaria utilizando la figura 2.12 y las ecuaciones de la forma admisibles.

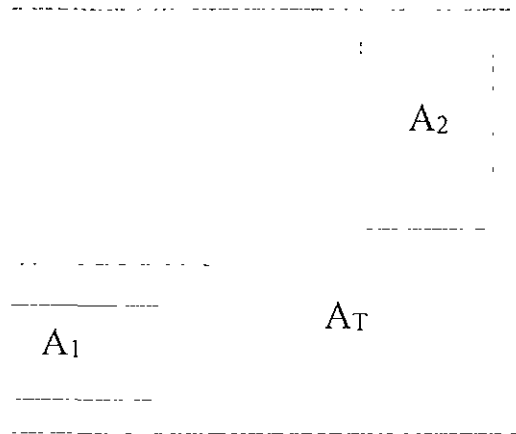


Figura 2.12 Localización de los almacenes.

La figura anterior, muestra el área de trabajo A_T y la ubicación de los almacenes de materias primas A_1 y de productos terminados A_2 respectivamente. La idea de “caracterización perfecta de la maquinaria” se basa sobre el llamado “Nivel de Abstracción Máximo” [10]. El cual nos indica que a cada operador booleano asociado a un proceso de manufactura se le puede relacionar con una máquina principal. La tabla siguiente muestra tal asociación, esto es:

Operador Boleano	Máquinas	Posiciones
$\overset{s}{\cup}$	M_1	P_1
$\overset{I}{\cap}$	M_2	P_2
$\overset{E}{\cap}$	M_3	P_3

Tabla 2.3. Asociación de maquinaria con operadores booleanos.

Así, M_1 representa una máquina de "soldadura", M_2 una máquina de troquelado y M_3 una máquina de enfriamiento, en tanto P_1 , P_2 y P_3 representan posibles posiciones de las máquinas sobre el área de trabajo A_T mostrada en la figura 2.12.

Observación: Generalmente en procesos de manufactura, una máquina puede realizar dos o más operaciones, para el propósito de nuestro modelo, utilizaremos una máquina para cada operación. Por otro lado, notemos que hemos usado el término "máquina" sin considerar que tipo, marca o volumen ocupado en A_T . Razón por la cual a tal caracterización se le llama "perfecta".

Consideraremos que el recorrido de la pieza de trabajo se idealiza por una línea recta según se muestra en la figura siguiente:

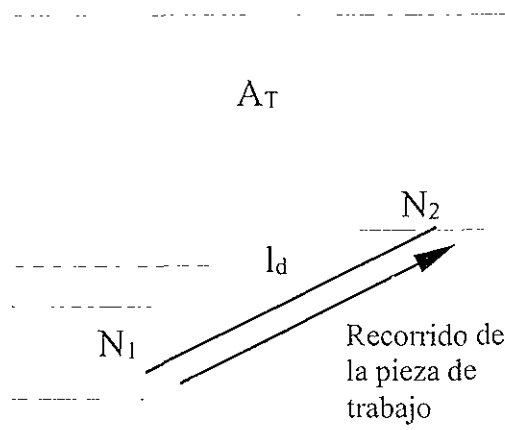


Figura 2.13 Línea primaria de distribución de maquinaria

Las nomenclaturas N_1 y N_2 mostradas en la figura 2.13 representan nodos de distribución, en tanto l_d será llamada en este trabajo "línea de distribución de maquinaria primaria". Sobre la línea l_d ubiquemos las posiciones P_1 , P_2 y P_3 dadas en la tabla 2.3, esto es :

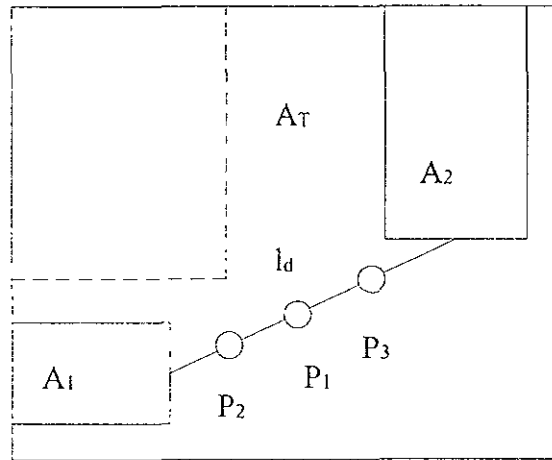


Figura 2.14. Posiciones arbitrarias.

Las posiciones P₁, P₂ y P₃ sobre l_d son arbitrarias.

Observemos que las ubicaciones posibles de maquinaria también están gobernadas por un factorial [10], esto es:

$$N_{UM} = m! \tag{2.9}$$

siendo N_{UM} el número total de distribuciones de maquinaria y "m" el número de máquinas. Consideraremos las nomenclaturas siguientes:

$$SM^{F_1 P_{23}}$$

M/P	P ₁	P ₂	P ₃
M ₁	1	0	0
M ₂	0	1	0
M ₃	0	0	1

Tabla 2.4 Representación en código binario de una secuencia de distribución de maquinaria

Aquí, $SM^{F_1 P_{23}}$ representa una secuencia de maquinaria de la familia 1 (Posición después del nodo N_1) con ubicaciones P_2 y luego P_3 (posición anterior al nodo N_2).

Observemos entonces que la secuencia de distribución depende de la secuencia de operación pues, $O_1 \rightarrow \bigcup^s \rightarrow M_1 \rightarrow P_1$ si es la operación de soldadura. De tal manera que las familias admisibles de distribución de maquinaria también dependen de las familias admisibles de secuencias de operación y por tanto de las ecuaciones de forma admisibles. Puesto que las secuencias de forma $SF^{F_1 O_{32}}$ y $SF^{F_2 O_{13}}$ son admisibles según nuestro desarrollo, entonces las distribuciones de maquinaria admisibles serán $SM^{F_1 P_{32}}$ y $SM^{F_2 P_{13}}$.

En la figura 2.14 se observa la distribución de posiciones de maquinaria $SM^{F_2 P_{13}}$.

Cabe mencionar que mientras obtengamos más secuencias de formas admisibles mayor serán las posibilidades de analizar cual de todas es óptima bajo el "nivel de abstracción máxima". A fin de cuentas se requiere caracterizar finalmente una y solo una secuencia de forma, que asocie de manera natural una distribución de maquinaria la cual debe ser fija en un proceso real de manufactura.

2.4. Los tiempos de proceso

Nuestro interés en esta parte, es caracterizar los tiempos de proceso bajo la variable "volumen de producción requerido". También en esta sección, identificaremos los tiempos primarios de proceso, así como el llamado "Intervalo de tiempos secundarios" [7].

Los tiempos de proceso pueden ser caracterizados de la manera siguiente:

- 1.- El tiempo de producción unitario T_{pU} .
- 2.- Los tiempos fijos o primarios T_{Fi} .
- 3.- El intervalo de tiempos secundarios I_{Tsi} .

El tiempo T_{pU} depende directamente de la variable "volumen de producción requerido" y de algunas restricciones generales. En tanto los tiempos fijos se caracterizan según las operaciones asociadas con los procesos caracterizados de los planos de fabricación. Algunas veces estos tiempos son asignados según se requiera en la línea de proceso. El intervalo de tiempos secundarios, es aquel relacionado con la condición de "equilibrio de tiempos".

El cálculo del tiempo de producción unitario se realiza con las variables siguientes:

- 1.- Volumen de producción $V_p = 942,540$ piezas / anuales.
- 2.- Tiempo de producción diaria (jornada de trabajo (J_T)) = 16 horas.

Consideraremos que el "volumen de producción" se genera de forma "perfecta"; esto es: no existen errores de producción que afecten al V_p . La siguiente relación [7] nos permite calcular el tiempo T_{pU} , esto es:

$$T_{pU} = \frac{\text{Tiempo total en seg(anuales)}}{N_T \text{ piezas/anuales}} \quad (2.10)$$

Notemos que $N_T \text{ piezas} = 942,540$ y el tiempo total anual es $(16)(360)(3600) = 20736000$ seg. Así entonces, para satisfacer el volumen de producción requerido, es necesario producir una pieza cada 22 segundos (redondeados) en 16 horas de trabajo por día. El cálculo de los tiempos fijos se realiza de la manera siguiente:

- 1 - El tiempo fijo T_{F1} esta asociado a la soldadura, de los datos del plano de fabricación obtenemos que la velocidad de soldadura (V_s) es de 41 cm/min. Luego,

$$T_{F1} = \frac{d_1}{V_s} = \frac{9.56 \text{ cm.}}{41 \text{ cm/mim.}} = 14 \text{ seg.}$$

Notemos que d_1 es la longitud del cordón de soldadura. Puesto que se requieren dos cordones, entonces el tiempo fijo es $T_{F1} = 28$ seg.

2.- El tiempo fijo T_{F2} será asociado al proceso de enfriamiento, al observar el plano de fabricación, obtendremos que $T_{F2} = 6$ seg.

3.- El tiempo fijo T_{F3} estará relacionado con el proceso de troquelado. Aquí T_{F3} será asignado de manera preliminar y diremos que $T_{F3} = 1$ seg.

Para obtener el intervalo de tiempos secundarios, es necesario que la igualdad siguiente sea satisfecha, esto es:

$$I_{TSi} = T_{PU} - \sum T_{Fi} \geq 0 \quad (2.11)$$

Aquí, I_{TSi} es el intervalo de tiempos secundarios y $\sum T_{Fi}$ es la sumatoria de tiempos fijos, de acuerdo a los cálculos anteriormente realizados, $\sum T_{Fi} = 35$ seg. Observemos que al sustituir $T_{PU} = 22$ seg. y $\sum T_{Fi} = 35$ seg. en la expresión arriba escrita obtendremos un resultado negativo y, por tanto, inadmisibles. La restricción única y suficiente para encontrar I_{TSi} es:

$$T_{PU} \geq \sum T_{Fi} \quad (2.12)$$

Puesto que $I_{TSi} = 0$ puede ser admisible. El problema se centra ahora sobre el procedimiento para obtener la desigualdad presentada anteriormente pues de lo contrario no podremos caracterizar nuestro modelo de producción.

Observación: en una gran cantidad de problemas asociados con los sistemas de manufactura se presenta la desigualdad $T_{PU} < \sum T_{Fi}$ la cual implica serias modificaciones al estimado de costos, esto es; en ocasiones se requiere introducir nueva maquinaria para corregir los tiempos, en otras ocasiones el proyecto puede ser cancelado, puesto que es necesario introducir no solo una máquina sino toda una línea

de producción para satisfacer V_p , lo cual implica más inversión monetaria y de mano de obra entre otras variables económicas.

Antes de alarmarse por tal condición ($T_p U < \sum T_{Fi}$) lo primero que debe hacerse es un análisis técnico respecto a la modificación y posteriormente las implicaciones económicas, para nuestro caso de estudio realizaremos solamente el análisis técnico considerando las restricciones propuestas al inicio de este capítulo.

2.4.1. Análisis y corrección de los tiempos fijos

El análisis sobre la modificación de los tiempos fijos se realiza según los pasos siguientes:

- 1.- Analice cual de los tiempos fijos puede ser modificado sin que altere la operación asociada.
- 2.- En el caso de encontrar un tiempo fijo modificable según el paso anterior, disminuir el tiempo al máximo, pues esto garantizará un mayor intervalo de tiempo secundario.
- 3.- Si no es posible encontrar un tiempo fijo modificable, utilice otro análisis.
- 4.- En caso de utilizar varios análisis técnicos y no es posible modificar un tiempo fijo, diseñe una línea de producción paralela.

Con estas ideas procederemos a caracterizar los tiempos fijos modificables, esto es:

- a.- Observemos que el tiempo fijo T_{F1} si puede ser modificado pues al observar el plano de fabricación, los cordones de soldadura pueden ser realizados simultáneamente.
- b.- El tiempo T_{F2} no puede ser modificado, ya que depende del proceso de soldadura y es una restricción de proceso.
- 3.- El tiempo T_{F3} no puede ser modificado, pues ha sido asignado y está asociado al proceso de troquelado que debe tener un tiempo de proceso funcional, de tal manera que si $T_{F3} < 1$ seg. esto implicaría problemas en la máquina seleccionada.

Observación. Nótese que el tiempo fijo T_{F1} es modificable en el sentido de "decrementar los tiempos fijos" ya que no tendría caso aumentarlos pues el objetivo es disminuirlos.

Una vez que ha sido encontrado un tiempo fijo modificable entonces se procede a su análisis según los pasos 1, 2 y 3, esto es

El tiempo fijo $T_{F1} = 28$ seg. puede reducirse a la expresión siguiente:

$$T_{F1M} = \frac{T_{F1}}{2} \quad (2.13)$$

Nótese que tal consideración es válida si suponemos que los cordones de soldadura se realizan simultáneamente. Aquí, T_{F1M} será llamado el tiempo fijo T_1 modificado. La reducción total será entonces de 14 seg.

Ahora centraremos nuestra atención sobre el análisis del proceso de soldadura. Esto es, debemos verificar si tal modificación de tiempos no afecta a la operación de soldadura. Considérese que la pieza de trabajo se localiza en posición P_1 asociada con la distribución de maquinaria $SM^{F_2M_{13}}$; ó sea, estará ubicado en un dispositivo (mesa de trabajo) sobre el cual se realizará el proceso de soldadura. Supóngase, además, que la modificación del tiempo primario T_{F1} implica utilizar otra máquina (M_2) de soldadura de tal forma que su ubicación sea mostrada en la figura siguiente:

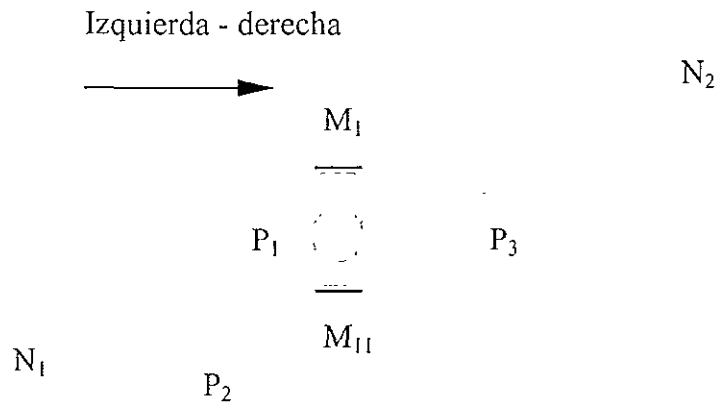


Figura 2.15. Posición de la máquina de soldadura.

En realidad las posiciones de las máquinas M_1 y M_{11} mostradas en la figura anterior no son significativas, lo que realmente interesa es la forma en que se generan los cordones de soldadura la cual puede ser de dos formas, esto es:

- 1.- Cordones simultáneos de izquierda a derecha.
- 2.- Cordones simultáneos, (M_1) de izquierda a derecha y (M_{11}) de derecha a izquierda o viceversa.

La primer forma parece la más idónea ya que la distribución de la temperatura puede decirse que es homogénea siguiendo el flujo del cordón de izquierda a derecha. En tanto la segunda forma puede tener problemas ya que la distribución de temperatura no es homogénea. Puesto que no realizaremos un estudio detallado de estas posibilidades, seleccionaremos la primera opción. Notemos entonces que la disminución del tiempo primario T_{F1} es de 14 seg. Esto es por la consideración de operación "simultánea" de soldadura y por lo tanto, será en este caso el máximo tiempo disminuido.

2.4.2. Caracterización del intervalo de tiempo secundario

Una vez caracterizado el tiempo fijo modificado $T_{F1M} = 14$ seg. procederemos a encontrar el intervalo de tiempo secundario, esto es:

$$I_{TS} = T_p U - \sum T_F^M = 1 \text{ seg.}$$

Aquí, $\sum T_F^M = T_{F1M} + T_{F2} + T_{F3}$ ($\sum T_F^M$ es la suma de tiempos fijos más el modificado).

Obsérvese que en este caso $I_{TS} = 1$ seg. y posiblemente estaremos restringidos en cuanto al tiempo asignado a las operaciones secundarias. Sin embargo, puesto que el proceso es totalmente automático (no necesariamente) entonces los tiempos secundarios estarán implícitos en los tiempos primarios, pues es posible que mientras la máquina de troquelado este en funciones primarias al mismo tiempo otra pieza de trabajo este siendo transportada. Estas ideas serán formalizadas en una etapa posterior.

2.5. Caracterización de la maquinaria de trabajo asociada con las operaciones primarias

Nuestro interés en esta sección, es el de caracterizar la maquinaria de trabajo, así como los herramientas asociados con las operaciones primarias. Utilizaremos para este propósito, las restricciones generales y de proceso así como los "Planos de Fabricación" mostrados en la figura 2.1.

Observemos que las restricciones generales a), b) y c) dadas al inicio de este capítulo, indican que la maquinaria de trabajo asociada con las operaciones primarias o principales debe ser seleccionada de forma tal que satisfaga un volumen alto de producción. Así también, deben ser flexibles a incrementos y decrementos de producción. Otra consideración importante es que el proceso debe operar de forma

totalmente automática. Considerando estas restricciones la maquinaria de trabajo debe ser seleccionada en base a las siguientes características generales.

- 1.- La maquinaria debe operar en forma automática.
- 2.- Deberá operar a nivel altos de producción.
- 3.- Debe ser "flexible" a cambios de procesos en las líneas de producción.

Para seleccionar de manera adecuada a los elementos de trabajo principales, debemos tomar en cuenta tanto los tiempos fijos de producción como las especificaciones de la pieza de trabajo motivo de nuestro estudio, dadas en los planos de fabricación mostrados en la figura 2.1.

El número de máquinas principales de acuerdo al análisis hecho en la sección **2.4.1** es de 4; estas son:

- 1.- Dos máquinas para aplicación de soldadura (M_1 y M_{11}).
- 2.- Una máquina para troquelado.
- 3.- Una máquina para enfriamiento.

2.5.1. Selección de las máquinas de soldadura

Nuestra idea en esta sección, es seleccionar la maquinaria de trabajo principal en base a la consideración 9) dada al inicio de este capítulo. Cabe señalar que existen en el mercado una gran cantidad de maquinaria asociada con procesos de soldadura. Para nuestros propósitos utilizaremos tecnología ABB [12], en este caso, seleccionaremos "Robots Industriales" del tipo IRB.

Observemos que según consideración 2) dada al inicio de este capítulo, el estimado de costos es satisfecho y, por tanto, caracterizaremos la selección de maquinaria en base a sus "restricciones de proceso".

Un "robot industrial" puede fácilmente satisfacer las características antes mencionadas, esto es: es un sistema que opera automáticamente y los niveles de producción a los que trabaja son altos. Además, según el manual de datos técnicos de la tecnología ABB los robots del tipo IRB pueden ser "flexibles" en cuanto a cambios en las líneas de producción. Así, por ejemplo, un robot tipo IRB 2400 puede realizar tareas como, soldadura por arco eléctrico u operaciones de transporte entre otras. Para estos procesos es necesario contar con cabezales de trabajo asociados con tales operaciones. Algunas especificaciones para seleccionar un robot del tipo IRB son las siguientes:

- 1.- Máximos grados de libertad de las tareas de trabajo.
- 2.- Temperatura de operación.
- 3.- Peso de las piezas a transportarse o en su caso, el peso de los cabezales y herramientas.
- 4.- Las distancias de trabajo.
- 5.- Los parámetros cinemáticos asociados con las operaciones de trabajo.
- 6.- Tipo de proceso requerido.

Para realizar operaciones de soldadura mediante robot industrial generalmente se requiere 5 grados de libertad, en caso de la temperatura de operación la fijaremos para nuestros propósitos en 30 °C. Obsérvese que para el caso del proceso de soldadura asociado con nuestra pieza de trabajo, no se requiere el peso de la pieza. El peso del cabezal de soldadura según ABB puede ser variado, esto depende de la operación requerida (tipos de soldadura). La distancia principal de trabajo es de $d_1 = 9.56$ cm, en tanto, el parámetro cinemático asociado con este proceso es: $V_S = 41$ cm/min.

Con la información mencionada anteriormente, un robot que satisface estas especificaciones es un IRB 1400 AWG, [12] con cabezal para aplicaciones de soldadura que en este caso, representa la herramienta de trabajo, y satisface las tolerancias dadas en los planos de fabricación. Los datos técnicos de interés asociados con este robot son:

- 1.- Máximo radio de alcance: 1.40 mts.

2.- Velocidad máxima de trabajo: 2.1 m/s.

La maquinaria de trabajo y los elementos de apoyo relacionados con el proceso de soldadura son:

- a.- Un robot IRB 1400 AWG ($R_3 \rightarrow M_1$) para realizar el cordón S_1 de soldadura.
- b.- Un robot IRB 1400 AWG ($R_4 \rightarrow M_{11}$) para realizar el cordón S_2 de soldadura.
- c.- Una mesa de operación. (M_{02}).

La siguiente figura muestra la distribución de los robots sobre la mesa de operación, esto es:

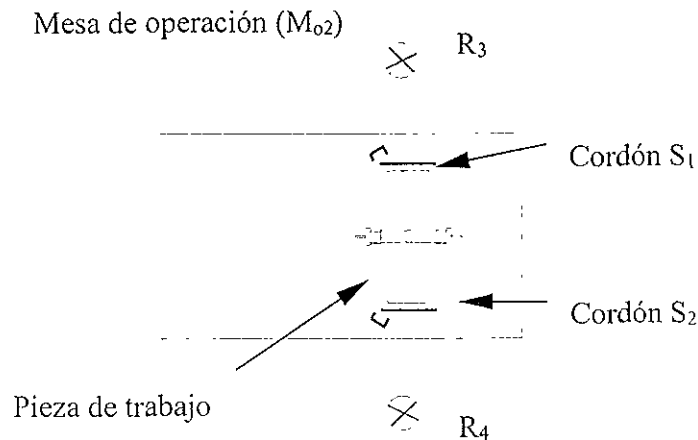


Figura 2.16. Robots Industriales para el proceso de soldadura.

2.5.2. Selección de la maquinaria de troquelado

La máquina asociada con la operación de troquelado también debe satisfacer las características mencionadas en la sección 2.5. Según el plano de fabricación, la operación de troquelado debe ser a "toque sencillo". En este caso, no se requiere de grandes presiones hidráulicas en este proceso. Por tanto, llamaremos "punzonado" a esta operación, la cual puede realizarse mediante un pistón neumático con cabeza adaptable para punzonado.

Utilizaremos tecnología Festo Neumatic. C) para seleccionar al actuador neumático, es este caso, se requiere la carrera de trabajo que la fijemos en 50 mm. De tal forma que el pistón seleccionado sea tipo EC – 50. Cabe mencionar que se requiere realizar un estudio más detallado para seleccionar al actuador, para propósito de este trabajo utilizaremos la restricción del proceso 9). Por tanto, la maquinaria de trabajo asociado con el proceso de punzonado es la siguiente:

- 1.- Un actuador neumático EC – 50 ($A_{c1} \rightarrow M_2$).
- 2.- Una mesa de operación (M_{o1}).

La distribución de los elementos de trabajo señalados anteriormente se muestran en la siguiente figura:

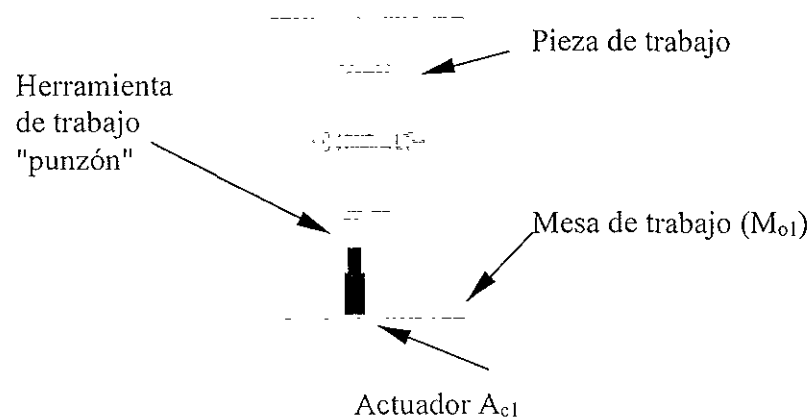


Figura 2.17. Elementos de trabajo de la operación de "punzonado".

Observación: Notemos que de la figura anterior que la herramienta de trabajo es un "punzón" tal que satisfaga las especificaciones requeridas. Aquí, no realizaremos cálculo alguno (del diseño de herramientas) y nos limitaremos a identificar a la herramienta de trabajo como un "punzón funcional" para nuestros propósitos.

2.5.3. Selección de la máquina de enfriamiento

De los planos de fabricación mostrados en la figura 2.1. se obtiene que el tiempo de enfriamiento de la pieza de trabajo, después de haber aplicado los cordones de soldadura, es de al menos 6 segundos.

Obsérvese que para este proceso no se requiere maquinaria especial. Utilizaremos para nuestros propósitos un "Robot Industrial" el cual será el encargado de realizar el proceso de enfriamiento y que al mismo tiempo, sea un proceso de transporte. Para la selección del Robot Industrial, requeriremos el peso total de la pieza integrando la tenaza de sujeción que en este caso, es de 4.8 Kg. de manera que el peso total efectivo es de 6.8 Kg. para procesos de transporte, generalmente se necesitan de 2 a 6 grados de libertad.

Con esta información procederemos a seleccionar un Robot Industrial del tipo IRB. Un elemento de trabajo que satisface las características dadas en la sección 2.5. y las especificaciones anteriormente señaladas es un tipo IRB 2400. Los datos técnicos de interés asociados con este robot son:

- 1.- Máximo radio de alcance 2.4 m.
- 2.- Velocidad máxima de trabajo 2.1 m/s.

Observemos que se requiere un solo Robot($R_5 \rightarrow M_3$) y para este caso, la herramienta de trabajo es precisamente la "pinza o tenaza de sujeción".

2.5.4. Ubicación preliminar de maquinaria principal según la secuencia de

posiciones $SM^{F_2 M_{13}}$

Nuestro interés será centrado ahora sobre la distribución de la maquinaria anteriormente seleccionada dada la secuencia de distribución $SM^{F_2 M_{13}}$. La distribución preliminar se observa en la figura siguiente:

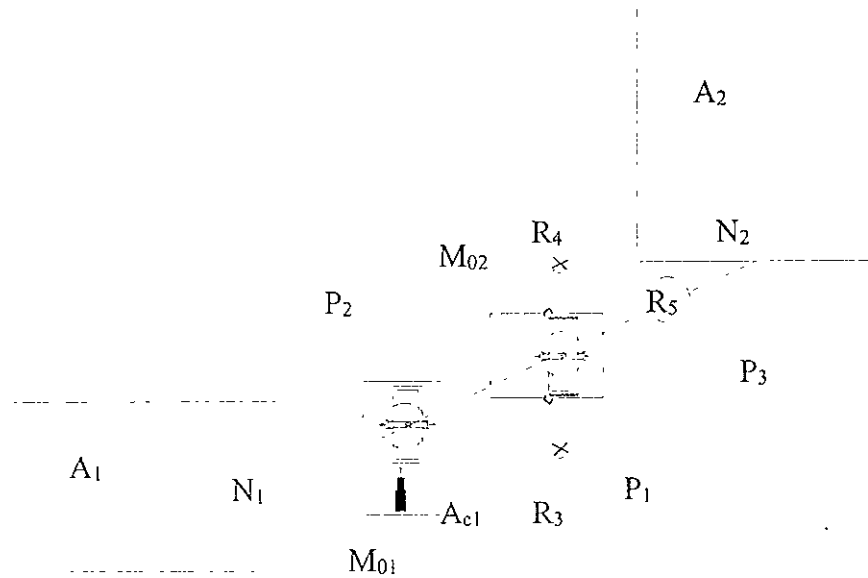


Figura 2.18 Distribución preliminar de maquinaria asociada con SM^{F2M13} .

Notemos de 2.18 que tanto las mesas de trabajo como la maquinaria asociada se localizan próximas a la línea de distribución. Cabe mencionar que la distribución total (de maquinaria) será caracterizada más adelante. Es importante señalar que la caracterización de secuencia de distribución de maquinaria es de suma importancia, pues nos permite generar alternativas de flujos de materiales y de proceso. Por otro lado, las posiciones P_1 , P_2 y P_3 mostradas en la figura 2.15 son localizadas en el área de trabajo en forma arbitraria, por tanto, las distancias medidas del nodo N_1 a la posición P_3 , de P_2 a P_1 y de P_1 a P_3 y de P_3 al nodo N_2 localizado en el almacén A_2 serán caracterizadas bajo dos variables principales, a saber:

- 1.- La distancia del nodo N_1 al nodo N_2 , la cual es conocida.
- 2.- Los rangos de operación de la maquinaria de transporte; en este caso, el rango asociado será el área de trabajo efectivo de los elementos de trabajo.

En la figura siguiente se muestran las consideraciones arriba escritas; esto es:

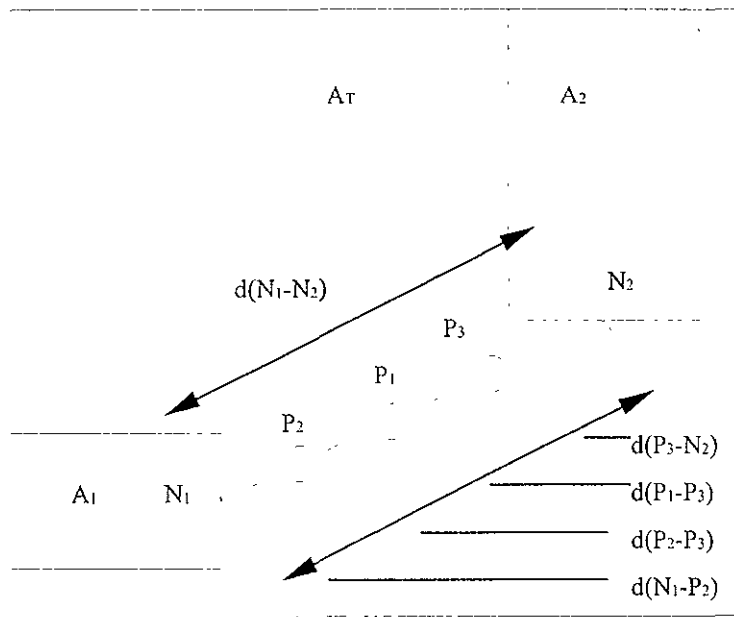


Figura 2.19. Distancias de trabajo.

Para nuestro caso de estudio, las distancia de trabajo serán caracterizadas siguiendo el máximo radio de trabajo del robot R_5 puesto que conocemos este dato: "Reach" = 2.4 m. Sin embargo, antes de realizar tal caracterización, se debe seleccionar la maquinaria de transporte, la cual será llamada en este trabajo "maquinaria secundaria".

2.6. Caracterización de la maquinaria secundaria

El objetivo en esta sección, es seleccionar los elementos de trabajo que serán utilizados en las tareas de transporte de la pieza de trabajo. Para nuestros propósitos, dividiremos en dos grupos a tales elementos; esto es:

- 1.- Maquinaria de transporte principal, la cual estará asociada a los traslados de la pieza de trabajo de las posiciones $N_1 - P_2$, $P_2 - P_1$, $P_1 - P_3 - N_2$.
- 2.- Maquinaria de transporte auxiliar. Estos elementos de trabajo están relacionados con las formas de traslado, ubicación y orientación de la pieza de trabajo sobre las mesas de operación y, también, están asociadas con las salidas y entradas en los almacenes A_1 y A_2 respectivamente.

2.6.1. Algunas consideraciones sobre la caracterización de la maquinaria

secundaria

En las operaciones de transporte de piezas de trabajo secundarias se utilizan diversos elementos de trabajos tales como: bandas síncronas, actuadores neumáticos, robots, entre otros. Cada maquinaria tiene asociadas características propias de operación como áreas de trabajo efectivas, velocidades de operación, grados de libertad, volúmenes de trabajo, etc. Así por ejemplo, un actuador neumático tiene un grado de libertad en tanto un robot industrial tiene asociados de dos a seis o más grados de libertad. De manera que la selección de la maquinaria de transporte debe realizarse dependiendo el tipo de transporte y las variables de posición y orientación de la pieza de trabajo que generalmente se asocian a los grados de libertad.

Otras variables importantes que se relacionan con las tareas de transporte son: el peso de la pieza, la forma y las distancias de transporte, así como las velocidades de operación entre otras. Cabe mencionar que el costo de cada elemento de trabajo también es un variable importante. Sin embargo, debido a que la "Planeación Estratégica" es fija (satisfecha) no realizaremos el análisis comparativo de costos. En realidad lo que nos interesa para nuestro trabajo, es el análisis técnico entre un elemento de trabajo y otro.

Las diferencias cualitativas y cuantitativas entre los elementos de trabajo secundarios puede conocerse según su modo de operación. Por ejemplo una banda síncrona generalmente transporta piezas de trabajo de una posición a otra con una posición y orientación fija y con velocidades de operación relativamente menores (o mayores) que un robot industrial, en este caso, el grado de libertad asociado es uno.

Además, las bandas síncronas son elementos de transporte "intermedios", esto es: se requiere de otro dispositivo para ubicar las piezas de trabajo sobre una mesa de operación primaria. Un actuador neumático se utiliza en tareas de transporte más especiales; esto es: para posicionar, orientar y trasladar piezas de trabajo ya sea en bandas síncronas o en mesas de operación por ejemplo. El rango de operación del

actuador es menor que el asociado a la banda síncrona en el sentido de transporte a distancias y generalmente, el grado de libertad también es uno.

Un robot industrial utilizado para tareas de transporte tiene en cierto sentido más cualidades de operación que una banda síncrona o actuador neumático. Por ejemplo, un robot es capaz de transportar, orientar y posicionar una pieza de trabajo ya sea en una posición estratégica (mesa de operación principal) o en una posición intermedia (transporte simple). Estas características de operación se asocian a los grados de libertad que posee un robot industrial.

Sin embargo, una banda síncrona puede soportar mayor peso que un robot, así también realiza operaciones de traslado en distancias mayores y su modo de operación interno es más sencillo que un robot. Cabe mencionar que el costo de un robot es mucho más alto que una banda o un actuador neumático.

Una vez conocidas las características importantes de la maquinaria secundaria nuestro propósito será el de seleccionar la que utilizaremos en este trabajo, siendo las siguientes variables únicas y suficientes para el desarrollo de nuestro sistema de producción:

- 1.- Velocidad de operación.
- 2.- Traslado preciso.
- 3.- Traslado intermedio.
- 4.- Distancias de operación.
- 5.- Grados de libertad.

2.6.2. Selección de la maquinaria de transporte principal

Los elementos de trabajo que serán caracterizados en esta sección, están asociados a los transportes de las piezas de trabajo de las posiciones siguientes:

- 1.- Transporte de: Nodo $N_1 - P_2$.

2.- Transporte de: $P_2 - P_1$.

3.- Transporte de: $P_1 - P_3 - \text{Nodo } N_2$.

Para nuestros propósitos a continuación realizaremos crónica de transporte; esto es:

Las materias primas estarán localizadas en el almacén A_1 , y serán transportadas del Nodo N_1 a la posición P_2 donde se ubica la mesa de operación M_{01} . Sobre M_{01} se realizará el proceso de punzonado. Posteriormente la pieza de trabajo deberá ser transportada de la posición P_2 a la posición P_1 donde se localiza la mesa de trabajo M_{02} . En M_{02} se realiza el proceso de soldadura. De la posición P_1 a la posición P_3 y el Nodo N_2 del almacén de productos terminados (A_2) se realiza una operación híbrida, esto es; se transporta y enfría al mismo tiempo la pieza de trabajo. Una vez localizada la pieza de trabajo del Nodo N_2 se dice que se ha recorrido "la línea de producción".

Notemos de la crónica anterior que no hemos mencionado como salen y entran las piezas de trabajo en los almacenes, tampoco se hace referencia del tipo de transporte sobre las mesas de operación.

La maquinaria de trabajo que deberá ser seleccionada debe satisfacer las siguientes características:

- 1.- El grado de libertad para la operación de transporte debe ser mayor de uno.
- 2.- Debe soportar un peso aproximado de 7 Kg. (peso promedio de la pieza).
- 3.- Deberá ser flexible a los incrementos o decrementos de producción.
- 4.- Requiere ser operado en forma automática.
- 5.- Las distancias promedio de trabajo serán de 1.7 m como máximo.

La razón por la cual la maquinaria de transporte principal debe ser seleccionada en términos de mayores grados de libertad (mayores que uno), es por la necesidad de posición y orientar las piezas de trabajo en las mesas de operación. Además, el transporte debe ser de precisión, pues en la operación de punzonado, se requiere ubicar la pieza de tal forma que la cara donde se localiza el lugar "X" de la operación

esté perpendicular a la carrera del actuador y que, además, se satisfagan las tolerancias requeridas.

Las operaciones de soldadura también requiere que la pieza de trabajo sea ubicada sobre la mesa de operación con una orientación determinada, por tanto, se necesitan grados de libertad mayores que uno. Para las operaciones de transporte de las posiciones $N_1 - P_2$ y $P_2 - P_1$ utilizaremos robots IRB 2400 ABB, pues esta maquinaria satisface las características mencionadas al inicio de esta sección. Notemos entonces que las operaciones de transporte primarias se realizan con robots industriales IRB 2400 (R_1 y R_2) y su ubicación preliminar sobre el área de trabajo se muestra en la figura siguiente:

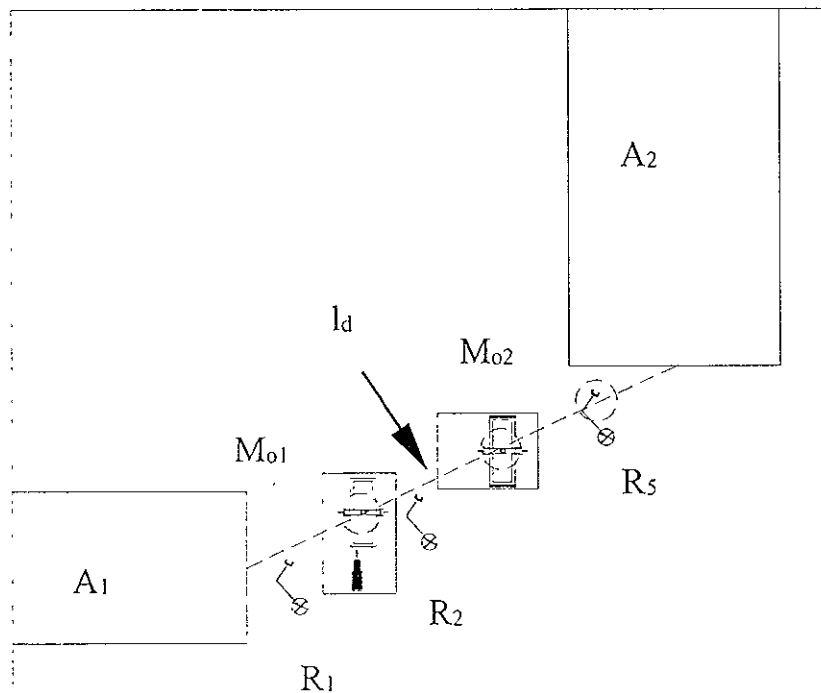


Figura 2.20. Localización de los robots IRB 2400 ABB.

De la figura anterior se observa que la ubicación de los robots industriales se localiza próxima a la línea de distribución (l_d). Las nomenclaturas que utilizaremos en cuanto a robots es la siguiente:

a.- Robots de operaciones principales (primarias).

R_3 y R_4 Tipo IRB 1400 AW6.

b.- Robots de operación de transporte secundario y principales (incluyendo la operación de enfriamiento).

R_1 , R_2 y R_5 Tipo IRB 2400

2.6.3. Selección de la maquinaria de transporte auxiliar

Presentaremos en esta sección los parámetros importantes para seleccionar la maquinaria de transporte auxiliar asociada con nuestro caso de estudio. Los elementos de trabajo auxiliares pueden caracterizarse de la manera siguiente:

- 1.- Las bandas de transporte.
- 2.- Los dispositivos de traslado de piezas o herramientas sobre las mesas de trabajo.

Las bandas de transporte estarán ubicadas para nuestro sistema de producción, en la salida del almacén A_1 y sobre la entrada del almacén A_2 , puesto que las operaciones de transporte sobre la línea de distribución l_d mostrada en la figura 2.21 ya han sido caracterizadas mediante los robots industriales. Algunos parámetros importantes para la selección de las bandas que en este caso serán síncronas son:

- 1.- Velocidad lineal máxima.
- 2.- Distancia de operación.
- 3.- Altura de operación.
- 4.- Temperatura de operación.
- 5.- Tipo de trabajo; de movimiento continuo o movimiento síncrono.
- 6.- Peso a transportarse.
- 7.- Sección de apoyo de transporte.

Es muy importante señalar que los parámetros cinemáticos y dinámicos de las bandas síncronas industriales deben ser caracterizada de forma cuidadosa, pues en sistemas de producción integradas por dos o más módulos de trabajo, las bandas juegan un papel de fundamental importancia para la llamada "sincronización global de procesos" [7].

Para nuestros propósitos requeriremos de dos bandas síncronas con las características siguientes.

- 1.- Velocidad lineal máxima: 2.1 m/s.
- 2.- Distancia mínima de operación: 4 m.
- 3.- Altura máxima de operación: 1.20 m.
- 4.- Temperatura de operación: 30 °C.
- 5.- El tipo de trabajo es: transporte síncrono.
- 6.- Peso de la pieza es: 6 Kg.
- 7.- Debe operar en forma totalmente automática.
- 8.- Debe ser flexible a los cambios en los incrementos y decrementos del volumen de producción.
- 9.- Sección de apoyo de transporte es: 0.5 m.

Para el desarrollo de este trabajo consideraremos que las bandas satisfacen las características antes mencionadas. La figura siguiente muestra la distribución de las bandas síncronas sobre el área de trabajo.

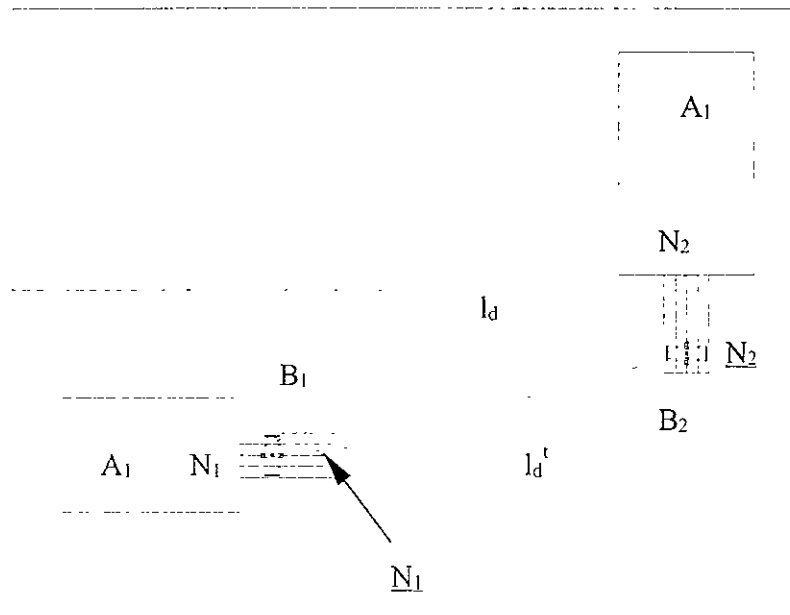


Figura 2.21. Localización de las bandas de transporte.

Llamaremos B_1 a la banda ubicada a la salida del almacén A_1 y B_2 según se muestra en la figura anterior. Notemos de 2.21 que los nodos N_1 y N_2 están ubicados sobre las bandas, y que, además, la línea de distribución l_d debe trasladarse de N_1 a $\underline{N_1}$ y de N_2 a $\underline{N_2}$, la línea de $\underline{N_1}$ a $\underline{N_2}$ será llamada l_d^t .

Finalmente caracterizaremos los dispositivos de traslado de piezas sobre las mesas de operación. En realidad, la mesa que requiere de un dispositivo de traslado es la mesa de soldadura por las consideraciones siguientes:

- 1.- La tolerancia de las caras donde se debe aplicar los cordones de soldadura es de ± 0.01 mm. con respecto a una línea imaginaria de centros de la mesa.
- 2.- Es preciso ubicar la pieza en una región estratégica de la mesa de soldadura con la tolerancia indicada.

Notemos entonces que para garantizar el proceso de soldadura bajo las tolerancias especificadas en los planos de fabricación, es necesaria una operación de traslado sobre la mesa de soldadura. Estas ideas se presentan en la figura siguiente:

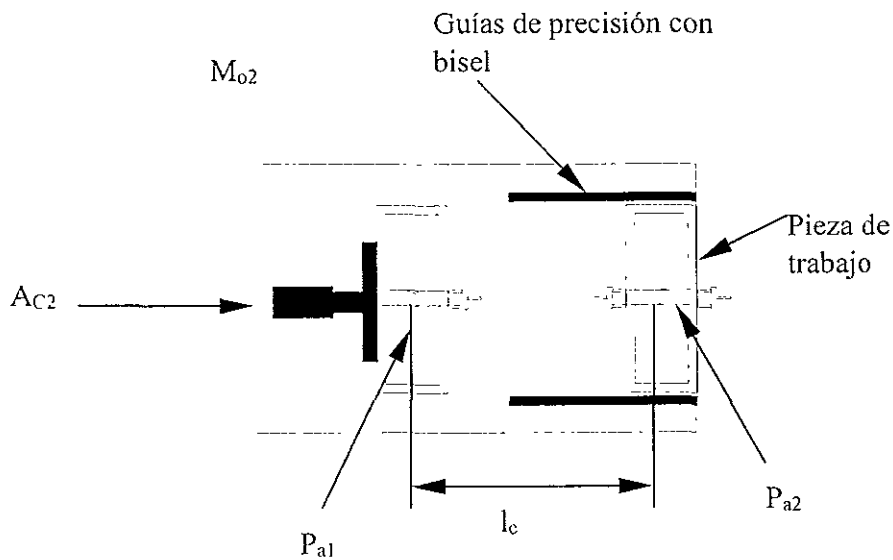


Figura 2.22. Actuador neumático sobre la mesa de operación M_{o2} .

De la figura anterior podemos notar que la pieza de trabajo es colocada y centrada sobre la posición P_{a1} de la mesa de trabajo. La cual debe integrar unas guías con bisel de control de precisión. Posteriormente el actuador A_{C2} mostrado en 2.22 traslada la pieza a la posición P_{a2} ya con la precisión requerida.

Notemos que en realidad se requiere un grado de libertad y una longitud de carrera l_c , además, del peso de la pieza. Por tanto, un actuador neumático DNUA-500 marca Festo es adecuado para esta operación.

Una vez caracterizada en forma preliminar la maquinaria de trabajo y su distribución también de forma preliminar, el paso siguiente es construir las trayectorias de operación, lo cual se realizará en el siguiente capítulo.

En la figura siguiente se muestra la forma preliminar de la distribución de maquinaria así como las nomenclaturas de los elementos de trabajo que serán utilizados más adelante.

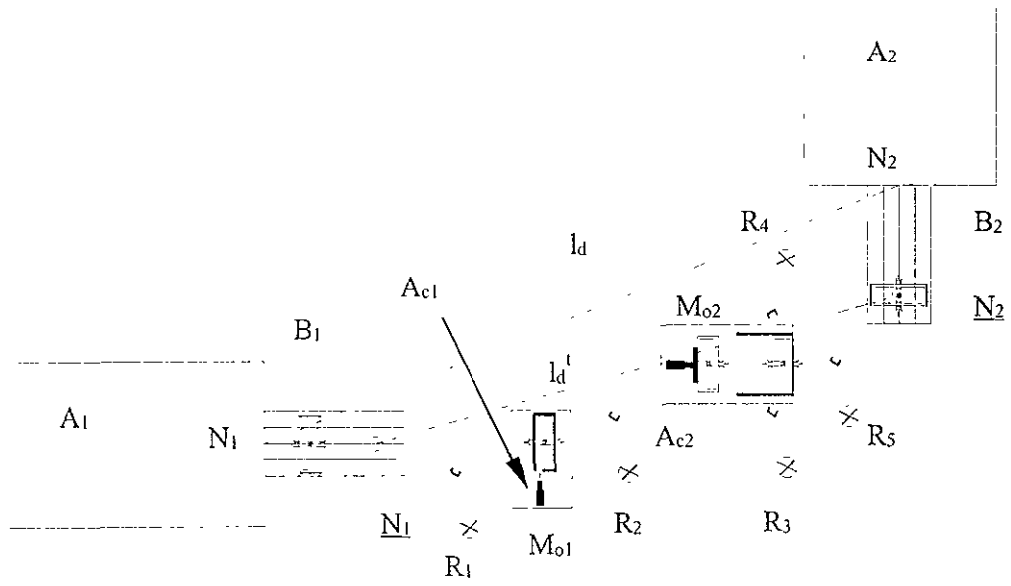


Figura 2.23. Distribución preliminar de maquinaria.

CAPÍTULO III LAS TRAYECTORIAS DE OPERACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE TRABAJO

Introducción: Presentaremos en este capítulo las trayectorias de trabajo asociadas con la maquinaria seleccionada en forma preliminar en el capítulo II. Nuestro especial interés, es construir las trayectorias de “ida y vuelta” de cada elemento de trabajo. Los tiempos principales serán incluidos en las trayectorias de “ida”. Asimismo, conoceremos la *distribución final de maquinaria sobre el área de trabajo*. Caracterizaremos una trayectoria real de trabajo asociada con una operación de soldadura a forma de ejemplo. Finalmente, caracterizaremos el llamado “semi-ciclo de arranque” [7] en base a la construcción de una “crónica de proceso”. Incluiremos para este propósito algunos tiempos secundarios utilizando el rango de operación (parámetros cinemáticos) de la maquinaria de transporte.

3.1. Restricciones sobre las trayectorias de trabajo

El diseño de las trayectorias de trabajo para simular nuestro proceso estará sujeto a las restricciones siguientes:

- 1.- Los lugares geométricos de las trayectorias serán líneas rectas.
- 2 - Los tiempos de proceso y secundarios serán discretos.
- 3.- Los perfiles de trayectoria no serán considerados.
- 4.- El diseño de trayectorias será del nodo N_1 al nodo N_2 (ver figura 2.23).

- 5.- Las orientaciones de las mesas de trabajo y las bandas serán las mostradas en la figura 2.23.
- 6.- Las trayectorias de operación serán diseñadas únicamente para posiciones generales.

Una vez restringido el problema sobre las trayectorias de operación a continuación indicaremos algunos pasos a seguir para diseñar las trayectorias, esto es:

- a.- Diseñar trayectorias de trabajo de las mesas de operación jerarquizando tales mesas por la importancia del proceso.
- b.- Se construye primeramente las trayectorias de ida y posteriormente las de vuelta en las mesas de operación.
- c.- Se diseñan las trayectorias de los elementos de transporte fuera de las mesas de operación.

Con los pasos anteriormente señalados diseñaremos las trayectorias de nuestro sistema de producción. Las siguientes consideraciones nos serán de utilidad para nuestros propósitos.

3.2. Caracterización de las trayectorias reales de trabajo y algunas consideraciones importantes

Una de las etapas más importantes relacionadas con el diseño de planta de un sistema de manufactura, es el diseño de las trayectorias. Una trayectoria de trabajo se descompone en dos partes: [7] 1) "El lugar geométrico de la trayectoria", 2) "El perfil de trayectoria".

En la primera parte se presentan los puntos cartesianos por donde pasará ya sea una herramienta o una pieza de trabajo manipulada por un robot o actuador. En este caso, se caracterizan las funciones paramétricas asociadas. La segunda parte se relaciona con las ecuaciones en el tiempo de la posición, velocidad y aceleración con que se

desplazaran los órganos terminales de la maquinaria (un robot por ejemplo) de trabajo. Ambas partes se asocian y se define el término “trayectoria”.

Consideremos los puntos a y b mostrados en la figura siguiente:

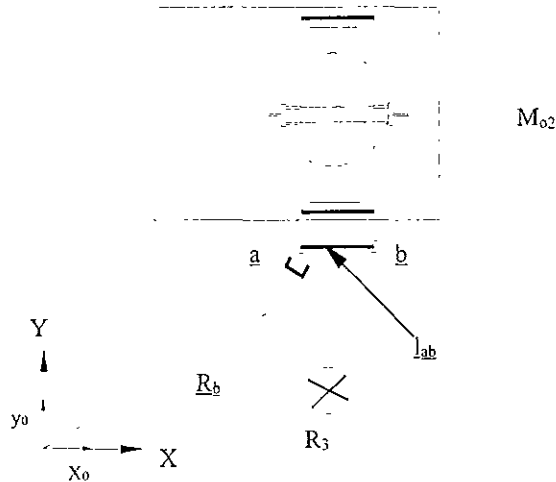


Figura 3.1. Caracterización de una trayectoria de trabajo.

De la figura anterior l_{ab} representa un lugar geométrico donde en la posición a se localiza el órgano terminal adaptado con una pistola de soldadura del robot R_3 . El recorrido será de a a b y sobre l_{ab} se realizará el cordón de soldadura S_1 . Notemos que la trayectoria de trabajo estará referida al sistema inercial XY mostrado en la figura 3.1. En este caso la ecuación siguiente relaciona tanto la función de trayectoria como a lugar geométrico (línea recta), esto es: [15]

$$R_b(t) = \begin{pmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \end{pmatrix} + \underline{K} \cdot q(t) \quad (3.1)$$

Siendo, para $t = 0$, $q(0) = 0$, $X(0) = X_a$, $Y(0) = Y_a$, y para $t = t_1$, $q(t_1) = t_1$; $X(t_1) = X_b$, $Y(t_1) = Y_b$ y el vector \underline{K} esta dado por la expresión siguiente:

$$\underline{K} = \frac{1}{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2} \begin{pmatrix} X_b - X_a \\ Y_b - Y_a \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Observemos de la ecuación (3.1) que tal expresión relaciona tanto el lugar geométrico como el perfil de la trayectoria. La función escalar $q : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ es precisamente quien caracteriza los parámetros de velocidad y aceleración al derivar la expresión (3.1.) con respecto al tiempo. Luego, $\dot{q}(t)$ y $\ddot{q}(t)$ serán las funciones o partes de trayectoria asociadas con tales parámetros. Las expresiones genéricas de la trayectoria son las siguientes:

$$\dot{R}_{b(t)} = \begin{pmatrix} \dot{X}(t) \\ \dot{Y}(t) \end{pmatrix} = \underline{K} \cdot \dot{q}(t) \quad (3.3)$$

$$\ddot{R}_{b(t)} = \begin{pmatrix} \ddot{X}(t) \\ \ddot{Y}(t) \end{pmatrix} = \underline{K} \cdot \ddot{q}(t)$$

Las ecuaciones (3.1.) y (3.3.) representan las trayectorias reales de trabajo asociadas con la operación del robot R_3 .

En general, para problemas de sistemas de manufactura se conoce uno de los tres parámetros siguientes:

- 1.- El perfil de posición($q(t)$).
- 2.- El perfil de velocidad($\dot{q}(t)$).
- 3.- El perfil de aceleración($\ddot{q}(t)$).

Por ejemplo, si se conoce $\dot{q}(t)$, se encuentra $q(t)$ integrando la función asociada a $\dot{q}(t)$, en tanto la función $\ddot{q}(t)$ se construye derivando la función $\dot{q}(t)$.

La función de trayectoria se construye dada una gráfica del perfil. La figura siguiente muestra un "perfil trapezoidal" de velocidad, esto es:

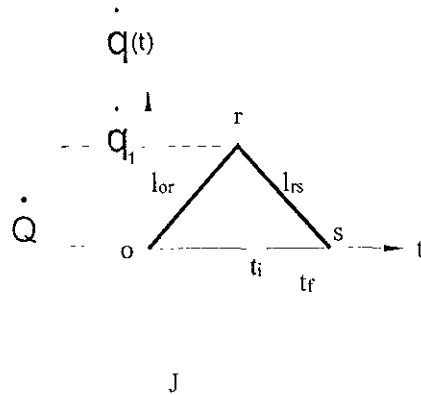


Figura 3.2. Perfil trapezoidal de velocidad.

Observemos de la figura anterior que la línea l_{or} puede ser escrita en términos de $\dot{q}(t)$. Esto es:

$$\dot{q}(t)_{lor} = m_1 t + b_1 \tag{3.4}$$

Al utilizar las condiciones $t = 0$, entonces $\dot{q}(0)_{lor} = 0$ y la ordenada $b_1 = 0$. Para el punto

"r" tendremos para $t = t_i$; $\dot{q}(t_i)_{lor} = \dot{q}_1$ y $m_1 = \frac{\dot{q}_1}{t_f}$.

Por tanto, la expresión final será la siguiente:

$$\dot{q}(t)_{lor} = \frac{\dot{q}_1}{t_f} (t). \tag{3.5}$$

En este caso, el subintervalo de tiempo analizado es:

$$J = \{t \in \mathbb{R}^+ \mid 0 \leq t \leq t_i\} \tag{3.6}$$

y el intervalo de la función escalar esta dada por:

$$\dot{Q} = \{\dot{q} \in \mathbb{R} \mid 0 \leq \dot{q} \leq \dot{q}_1\}$$

Al integrar (3.5.) con respecto al tiempo obtendremos la siguiente expresión:

$$q(t)_{lor} = \frac{1}{2} \dot{q}_1 \frac{t^2}{t_f} + C_1 \quad (3.7)$$

Siempre que $t = 0$, entonces $q_{lot}(0) = 0$ y $C_1 = 0$. Por tanto,

$$q(t)_{lor} = \frac{\dot{q}_1}{2t_f} (t^2) \text{ en } (J, Q) \quad (3.8)$$

La expresión (3.8.) representa la función asociada con el perfil de posición. Notemos que al derivar la expresión (3.5.) obtendremos finalmente la función de trayectoria relacionada con el perfil de aceleración. Esto es :

$$\ddot{Q}(t)_{lor} = \frac{\dot{q}_1}{t_f} \text{ en } (J, \ddot{Q}) \quad (3.9)$$

Para conocer las funciones de trayectoria asociadas a la recta l_{rs} se procede de igual forma que el análisis anterior.

Una vez conocida la forma de caracterizar las trayectorias de trabajo, a continuación procederemos a caracterizar en forma general la trayectoria de soldadura, esto es; de la posición \underline{a} a la posición \underline{b} . Para nuestros propósitos modificaremos el lugar geométrico de la trayectoria según se muestra en la figura siguiente:

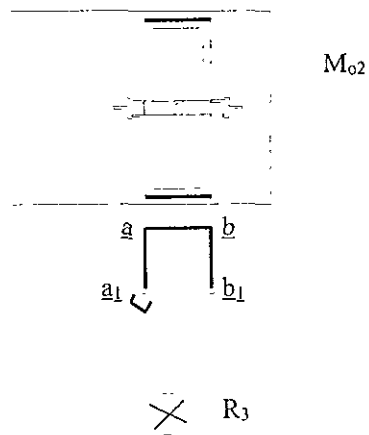


Figura 3.3. Modificación de la trayectoria de trabajo.

De la figura anterior, a_1 representa el punto de partida del robot R_3 , en tanto b_1 representa un punto de salida. Así, la velocidad del punto a al b es conocida pues, $V_s = 41 \text{ cm / min}$. y es constante sobre estos puntos a_1 y b_1 , y la aceleración $a_{R_3} = 0$ sobre estos puntos.

Notemos entonces que en base a estas consideraciones el perfil de velocidad puede ser representado a través de la gráfica siguiente:

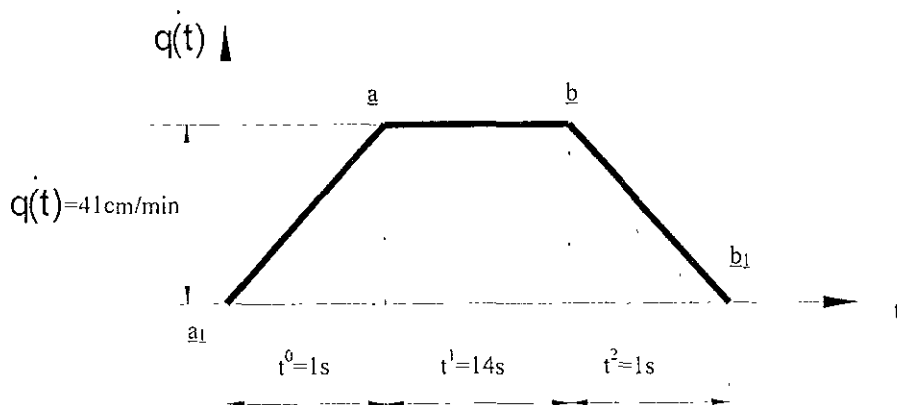


Figura 3.4 El perfil de velocidad asociado con la operación del robot R_3 .

Los tiempos t^0 y t^2 son asignados, en tanto t^1 es un dato conocido, pues $l_{ab} = 9.56 \text{ cm}$ y $V_s = 41 \text{ cm/min}$. Los perfiles aproximados de posición y velocidad se muestran en la figura 3.5.

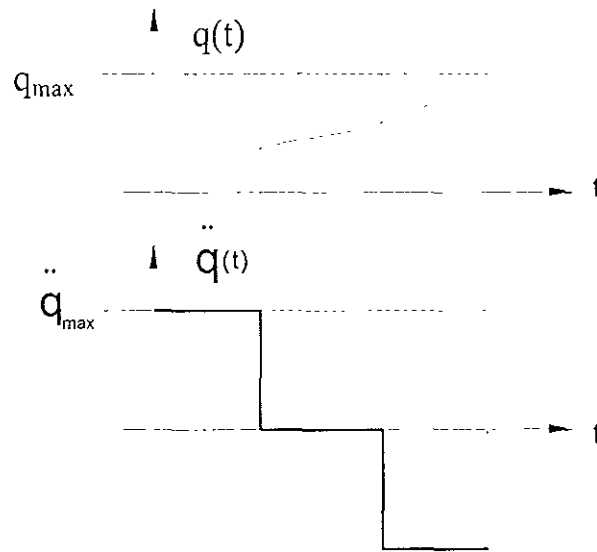


Figura 3.5. Perfiles aproximados de posición y aceleración.

Así entonces, el robot R_3 iniciará en el punto q_1 con $V_{R3} = 0$ y $a_{R3} = 0$, para $t = 0$, de \underline{a} , \dots \underline{a} , $V_{R3} = V'_{R3}$ y $a_{R3} = a'_{R3}$ en t^0 . En \underline{a}_1 , $V_{R3} = \dot{q}_{max}$ y $a_{R3} = 0$. De $\underline{a} - \underline{b}$, $V_{R3} = \dot{q}_{max}$ y $a_{R3} = 0$. De $\underline{b} - \underline{b}_1$, $V_{R3} = V''_{R3}$ y $a_{R3} = a''_{R3}$ en t^2 . En \underline{b}_1 , $V_{R3} = 0$ y $a_{R3} = 0$.

3.2.1. Primera consideración sobre las trayectorias de trabajo del sistema de manufactura

En la sección anterior, hemos caracterizado en términos generales una trayectoria de trabajo asociada con el proceso de soldadura. Sin embargo, en este trabajo no trabajaremos con los perfiles de trayectoria, pues el propósito fundamental es crear una metodología que nos permita modelar en forma abstracta un sistema de manufactura. Utilizaremos para el desarrollo de este trabajo la parametrización siguiente:

$$f_t : \varepsilon \times J \subset \mathbb{R}^+ \rightarrow \tau \quad (3.10)$$

siendo ε el espacio de puntos tridimensional, $J \subset \mathbb{R}^+$ un intervalo de tiempo y τ una trayectoria (Lugar geométrico).

Por ejemplo, para un lugar geométrico caracterizado por una recta obtendremos la parametrización siguiente:

$$X = t \tag{3.11}$$

$$Y = mt + b_1$$

En este caso, el tiempo $t \in \mathbb{R}^+$ estará discretizado en intervalos “tamaño 1”.

3.2.2. Segunda consideración sobre las trayectorias de trabajo

En los robots de transporte se requiere diseñar un lugar geométrico “especial”. Por ejemplo, en el transporte del nodo N_1 a la mesa de operación M_{o1} se necesita una trayectoria que permita al robot R_1 tomar la pieza, levantarla y luego trasladarla, finalmente se requiere “bajar” la pieza y soltarla. Estas sub-operaciones se muestran en la figura siguiente:

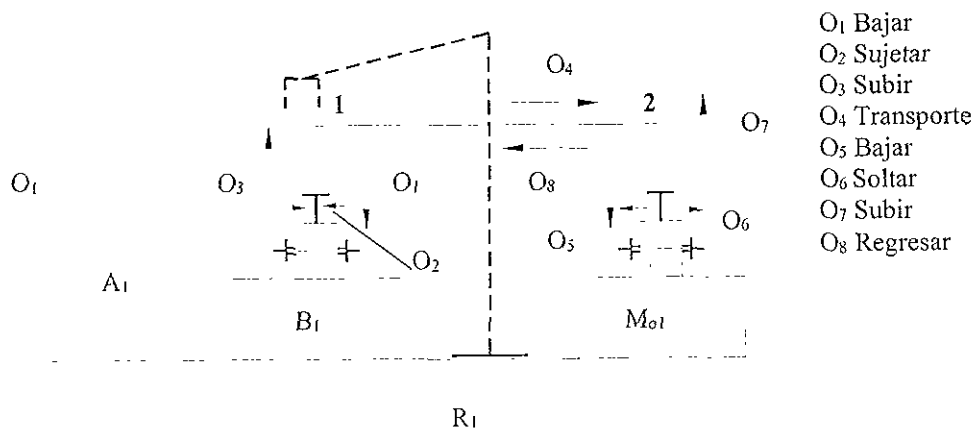


Figura 3.6. Sub-operaciones de transporte de la pieza de trabajo realizadas por R_1 .

El análisis de estas sub-operaciones no será considerado en este trabajo, pues se requiere diseñar demasiadas trayectorias. Consideraremos para nuestros desarrollos que las posiciones generales 1 y 2 mostrados en la figura anterior serán únicas y suficientes para caracterizar las trayectorias de trabajo, y que, las sub-operaciones estarán implícitas. Por tanto, es necesario localizar posiciones generales en nuestro

sistema de manufactura. En este caso, tales posiciones se muestran en la figura siguiente:

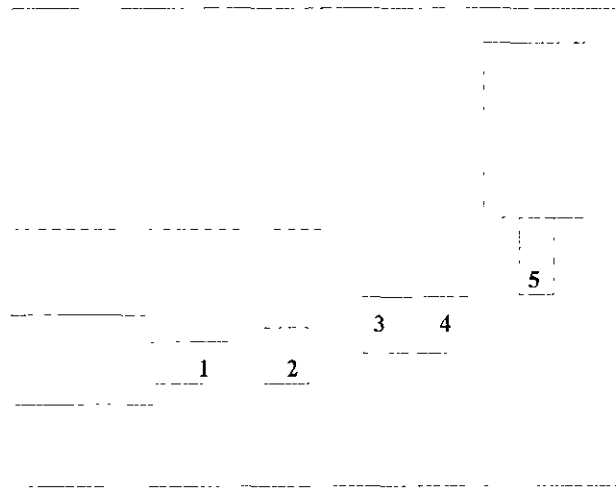


Figura 3.7. Posiciones generales.

3.2.3. Tercera consideración de las trayectorias de trabajo

En esta sección jerarquizaremos los elementos de trabajo y las mesas de operación en relación al proceso más importante, de forma tal que la base de tal selección se realice bajo las consideraciones siguientes:

- 1.- Por complejidad del proceso.
- 2.- Por el máximo tiempo primario.

Para nuestro caso de estudio, la mesa de operación M_{02} es la de máxima jerarquía y los elementos de trabajo que la integran. La mesa de trabajo M_{01} es la de segunda jerarquía y finalmente los robots de transporte. Así entonces, los grupos jerárquicos serán los siguientes.

1 Jerarquía I Mesa M_{02} .

- 1a) R_3
- 1b) R_4
- 1c) A_{C2}

2 Jerarquía II Mesa M_{01} .

2a) A_{C1}

3 Jerarquía III Robots de transporte.

3a) R_5

3b) R_2

3c) R_1

Obsérvese que la mesa M_{02} es de jerarquía I, pues es donde se realiza el proceso más complejo y, además, en esta mesa está asociado el mayor tiempo primario. El robot R_3 o R_4 será en este caso, el primer elemento de trabajo sobre el cual diseñaremos la primera trayectoria, en tanto, el actuador A_{C2} tendrá la mínima jerarquía en esta mesa de operación. La mesa M_{01} tiene asociada la segunda fase de la jerarquía, en tanto los robots de transporte tienen la mínima jerarquía en cuanto a grupo.

Nota: El robot R_5 puede tomar la jerarquía II, pues tiene asociado un tiempo de proceso mayor que la mesa M_{01} . Para nuestros propósitos utilizaremos la jerarquía escrita anteriormente.

Con estas ideas, a continuación caracterizaremos las trayectorias de trabajo de la maquinaria asociadas con nuestro modelo de manufactura.

3.3. Diseño de las trayectorias de la mesa de trabajo de operación M_{02}

Según el proceso de jerarquización anterior la mesa de operación M_{02} es la que será analizada primeramente. En este caso, el robot R_3 será el primer elemento de trabajo estudiado, esto es:

3.3.1. Análisis de las trayectorias de los robots R_3 y R_4 .

Los lugares geométricos asociados con la operación del robot R_3 son los que se muestran en la figura siguiente:

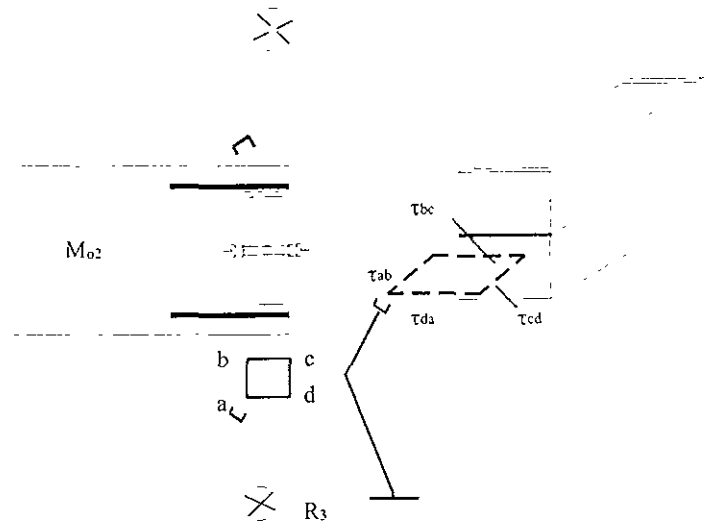


Figura 3.8. Trayectoria de trabajo del robot R_3 .

Al observar la figura anterior notaremos que la trayectoria completa (lugar geométrico) del robot R_3 esta compuesta por 4 sub-trayectorias, estas son:

- 1.- τ_{ab} trayectoria de "ida".
- 2.- τ_{bc} trayectoria de "ida".
- 3.- τ_{cd} trayectoria de "vuelta".
- 4.- τ_{da} trayectoria de "vuelta".

El término "ida" se refiere a las operaciones de "acercamiento y de proceso primario", en este caso, la soldadura y los tiempos asociados son sumados, esto es: para completar la operación de soldadura se debe añadir (suma) el tiempo de acercamiento de "ida". El término "vuelta" está asociado al regreso del robot a su posición inicial que llamaremos "home" (a). Para este robot (R_3) se conoce el tiempo asociado a la subtrayectoria τ_{bc} y es de 14 seg.

Por otro lado, los tiempos asociados a las trayectorias τ_{ab} , τ_{bc} y τ_{cd} son asignados con base en las restricciones de proceso ("Reach", velocidad máxima de operación). Para nuestros propósitos asignaremos un segundo a la subtrayectoria τ_{ab} . En tanto los tiempos de τ_{dc} y τ_{da} serán considerados en el capítulo IV.

Con base en esta última consideración los tiempos de "ida" son los siguientes:

- a) τ_{ab} 1 seg.
- b) τ_{bc} 14 sag.

Observación: Bajo la premisa de que el proceso de soldadura se realiza simultáneamente con dos robots asociados, esto es, R_3 y R_4 , es factible colocar el robot R_4 simétricamente a R_3 bajo la línea de centros de la mesa M_{02} tal como se muestra en la figura siguiente:

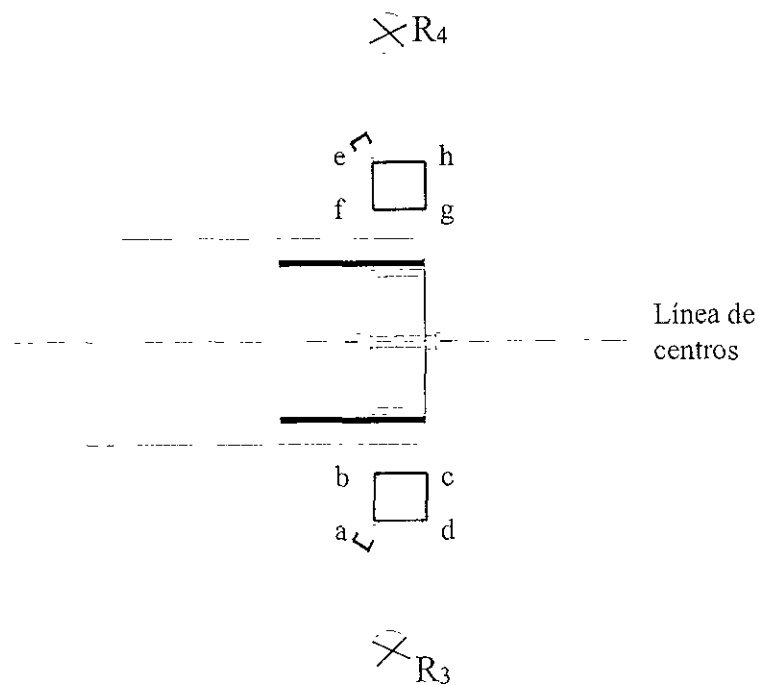


Figura 3 9. Trayectorias simétricas del robot R4

Según la observación anterior, la idea de colocar simétricamente al robot R_4 da como resultado lo siguiente:

- a) $\tau_{ab} \Leftrightarrow \tau_{ef}$ (ida).
- b) $\tau_{bc} \Leftrightarrow \tau_{fg}$ (ida).
- c) $\tau_{cd} \Leftrightarrow \tau_{gh}$ (vuelta).
- d) $\tau_{da} \Leftrightarrow \tau_{he}$ (vuelta).

El símbolo \Leftrightarrow se refiere al término "equivalencia" ya que en sentido estricto las trayectorias no son iguales; esto es por las coordenadas. Aquí, los tiempos de ida asociados con el robot R_4 son los mismos que los relacionados con el robot R_3 (pues operan simultáneamente). Esto es:

- a) $\tau_{ab} \quad \tau_{ef} \rightarrow 1 \text{ seg.}$
- b) $\tau_{bc} \quad \tau_{fg} \rightarrow 14 \text{ sag.}$

Al igual que las trayectorias de "vuelta" de robot R_3 , los tiempos asignados a las subtrayectorias τ_{gh} y τ_{he} serán consideradas en el capítulo IV.

3.3.2. Análisis de la trayectoria del actuador A_{C2}

La trayectoria del actuador A_{C2} es una línea recta (punteada) sobre la mesa de trabajo M_{02} . El punto inicial es la posición estratégica 3 y el punto final es la posición 4 según se muestra en la figura siguiente:

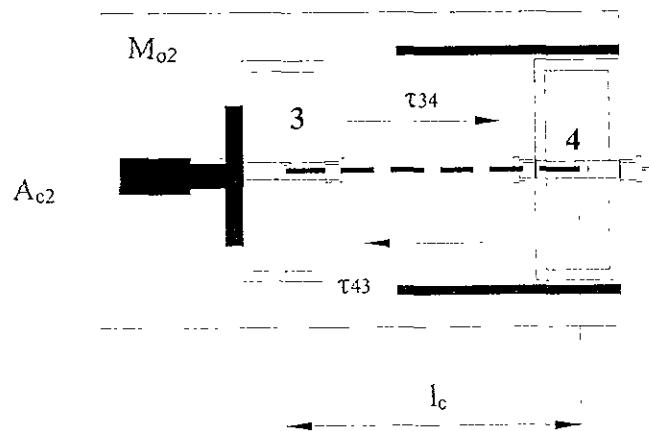


Figura 3 10. Trayectorias de trabajo del actuador A_{C2} .

Nótese de la figura anterior que la trayectoria de "ida" τ_{34} es la misma que la de "vuelta" τ_{43} . En este caso, la tarea del actuador es trasladar la pieza de la posición 3 a la posición 4.

Los tiempos asignados están en función de la longitud de la carrera l_c y la velocidad de operación del actuador. Para nuestros propósitos asignaremos un tiempo $t = 4$ seg. a la trayectoria τ_{34} , en tanto, el tiempo de retorno del actuador será estudiado en el capítulo IV. En la figura siguiente se muestran las trayectorias (líneas punteadas) de trabajo asociadas a la mesa de operación M_{02} . Esto es:

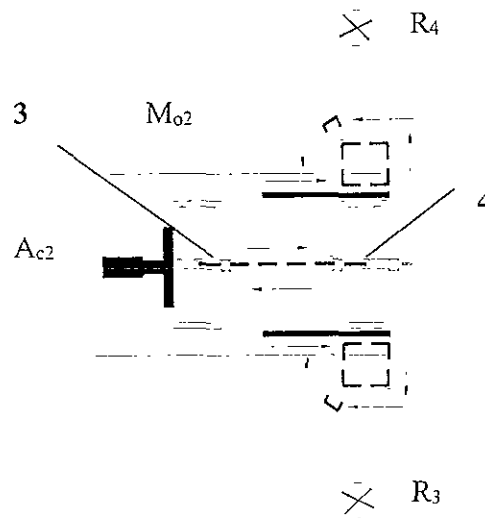


Figura 3.11. Las trayectorias de trabajo en la mesa de operación M_{02}

Observación: La caracterización de trayectorias sobre la mesa de operación M_{02} es puramente descriptiva en términos de lugares geométricos. Una vez conocidas las coordenadas de todos los puntos de las trayectorias la parametrización será realizada en forma total.

3.4. Trayectorias de trabajo en la mesa de operación M_{01}

Nuestro interés en esta sección es caracterizar las trayectorias de trabajo sobre la mesa M_{01} . En este caso, diseñaremos las trayectorias de "ida" y "vuelta" del actuador A_{C1} el cual se muestra en la figura siguiente:

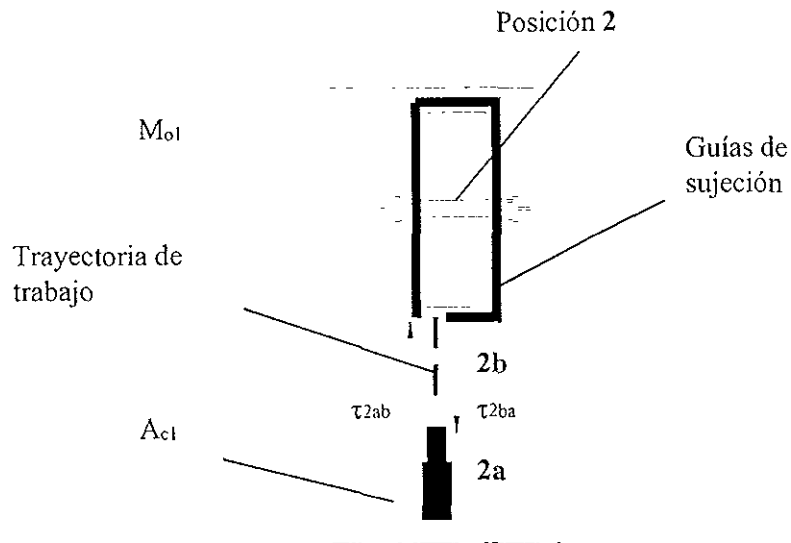


Figura 3.12. Trayectoria de operación del actuador A_{C1}

El punto "2a" mostrado en la figura 3.11, es el inicio de la trayectoria τ_{2ab} , en tanto el punto "2b" se localiza sobre la pieza de trabajo (sobre la futura huella de punzonado). En este caso, los lugares geométricos son líneas rectas y el tiempo asignado a la trayectoria de "ida" τ_{2ab} según el capítulo anterior es conocido ($\tau_{F2} = 1s$), en tanto, el tiempo asociado con la trayectoria de "vuelta" τ_{2ba} será estudiado en el capítulo IV.

Observación: Nótese de la figura 3.11 que hemos colocado guía de sujeción (adaptador con resortes) para posicionar correctamente la pieza de trabajo sobre la posición 2 de tal forma que la operación de punzado se realice de manera adecuada.

3.5. Trayectoria de trabajo de los robots R_1 , R_2 y R_5

Las trayectorias de trabajo del robot R_5 que en este caso, es la máxima jerarquía (sobre la jerarquía III), se diseñan del punto 4 al punto 5 según se muestra en la figura 3.12.

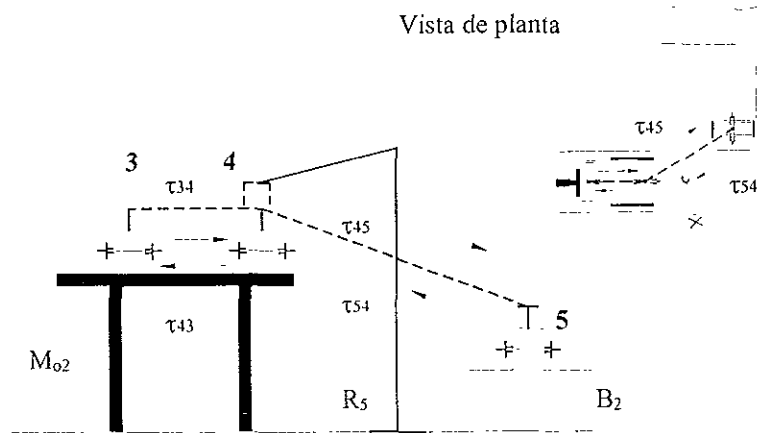


Figura 3 13. La trayectoria del robot R_5

De la figura anterior se observa que la trayectoria de "ida" es τ_{45} y que el lugar geométrico es una línea recta en el espacio. La trayectoria de "vuelta" τ_{54} es en este caso, de la posición 5 a la posición 4. El tiempo asociado con τ_{45} es el tiempo relacionado con el proceso de enfriamiento, esto es: $T_{F3} = 6$ seg. El tiempo de τ_{54} será caracterizado en el capítulo IV.

R_2 es el segundo robot de transporte en estudiarse. Las trayectorias de trabajo asociadas con este robot se caracterizan de la posición 2 a la posición 3. En este caso, R_2 transporta la pieza de trabajo de la mesa de operación M_{01} a la mesa M_{02} según se muestra en la figura siguiente:

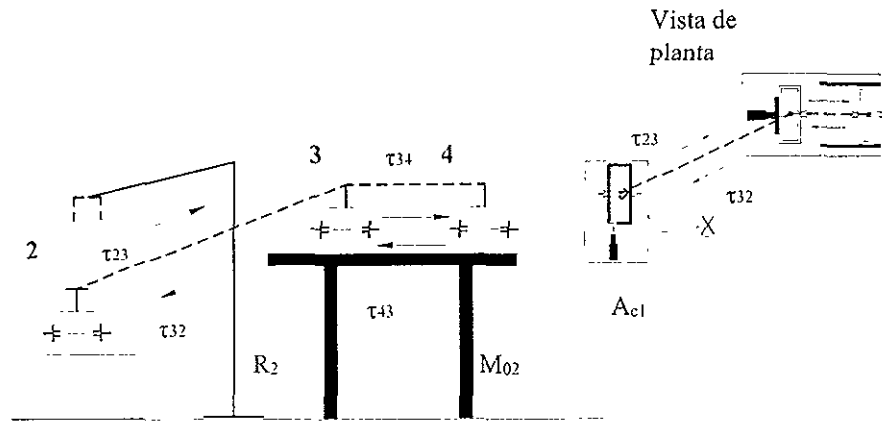


Figura 3.14 La trayectoria del robot R₂

Para el caso de las trayectorias de "ida" τ_{23} no existe tiempo asociado. En realidad dicho tiempo debe ser asignado, para nuestros propósitos lo fijaremos en 10 seg.

En el capítulo IV estudiaremos el porqué de esta asignación, analizaremos también el tiempo relacionado con la trayectoria de "vuelta" τ_{32} .

Finalmente las trayectorias del robot R₁ serán caracterizadas. La operación de este robot consiste en transportar la pieza de trabajo motivo de nuestro estudio, de la posición 1 localizada en la banda B₁ a la posición 2 de la mesa de marcaje M₀₁ según muestra la figura siguiente:

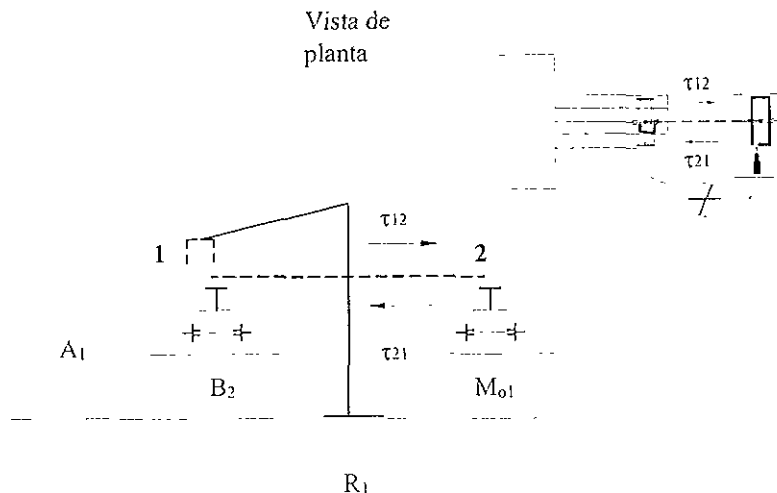


Figura 3.15. Las trayectorias del robot de transporte R₁

Observemos de la figura anterior que la trayectoria tanto de "ida" como de "vuelta" son iguales dado el lugar geométrico de la recta definida de posición 1 a la posición 2 y viceversa. El tiempo de "ida" lo asignaremos para este caso en 4 segundos; esto es: $\tau_{12} \rightarrow 4s$. En tanto el tiempo de "vuelta" lo estudiaremos en el capítulo siguiente.

En la figura 3.16 se muestran las trayectorias de "ida" y "vuelta" caracterizadas parcialmente de los elementos de trabajo asociados con nuestro caso de estudio,

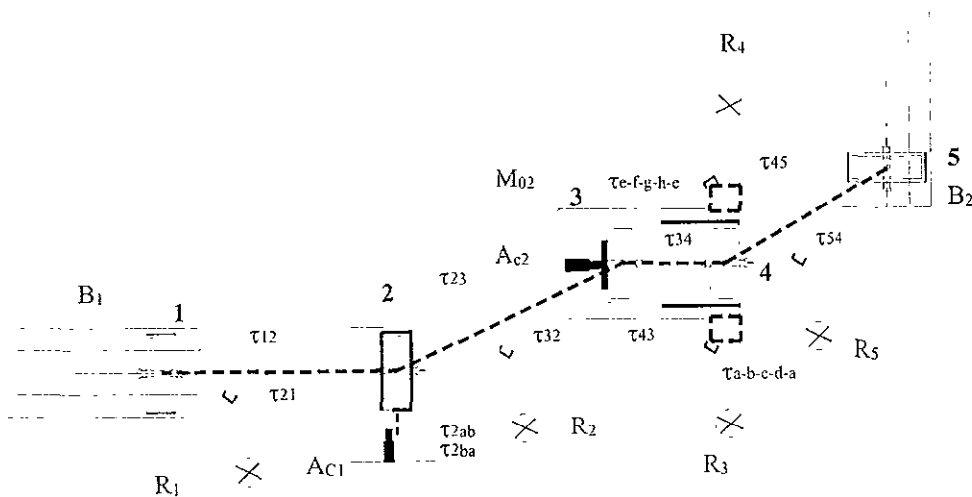


Figura 3.16. Trayectorias de trabajo del caso de estudio.

3.6. Análisis de la distribución final de maquinaria

Nuestro interés en esta sección es analizar la distribución final de maquinaria sobre el área de trabajo utilizando para este propósito, algunas consideraciones sobre los parámetros de operación de los robots industriales.

Con base en las restricciones 3 y 4 escritas en el capítulo II, para distribuir la maquinaria no realizaremos el estudio detallado de tiempos y movimientos. Tampoco utilizaremos algún método de optimización. Nuestra idea en este trabajo es satisfacer el volumen de producción (V_p) bajo las restricciones de proceso siguientes:

- 1.- Los elementos de trabajo deben operar en rangos de velocidad funcionales.

- 2.- Las distancias de operación deben ubicarse dentro del rango de operación funcional de la maquinaria.
- 3.- Localizar las bases de los robots en los lugares de funcionamiento adecuado, también los órganos terminales.
- 4.- Deberán ubicarse una región de distribución sobre el área de trabajo de forma tal que las restricciones 1, 2 y 3 sean satisfechas.
- 5.- La distribución de maquinaria deberá localizarse próxima a las líneas de distribuciones l_d y l_d^t .

Los rangos de operación funcional tanto de velocidad como de distancia son caracterizados con base en los parámetros siguientes:

- 1.- La velocidad máxima de operación de los robots industriales IRB 1400 AWG y IRB 2400 es de 2.1 m/s y la aceleración es 14.1 m/seg².
- 2.- Los radios de operación (Reach) de los robots IRB 1400 AWG y IRB 2400 son: 1.44 m y 2.40 m respectivamente.

Notemos entonces que si caracterizamos velocidades de operación cercanas a 2.1 m/s, entonces los robots estarían trabajando a máxima capacidad (de velocidad).

Este hecho implicaría que la maquinaria (robots) tendría un ciclo de vida mas corto, y, además, es posible obtener picos de alta aceleración que no permitan realizar de manera adecuada una operación secundaria, por ejemplo: una mala sujeción de alguna pieza, o simplemente, la fuerza debida a la aceleración podrá vencer la fuerza de sujeción de la pinza o herramienta de trabajo.

Notemos que para el caso de los robots asociados con la operación de soldadura la velocidad de operación es muy baja (operación de "ida"), ya que se requiere una velocidad de 41 cm/min para realizar los cordones de soldadura. Sin embargo, las velocidades asociadas a las trayectorias de regreso deben ser analizadas de manera cuidadosa.

Otro parámetro importante es el relacionado con el radio de operación de los robots. En la figura siguiente se muestra el "Reach" del robot IRB 2400 así como el área de trabajo (vista de planta).

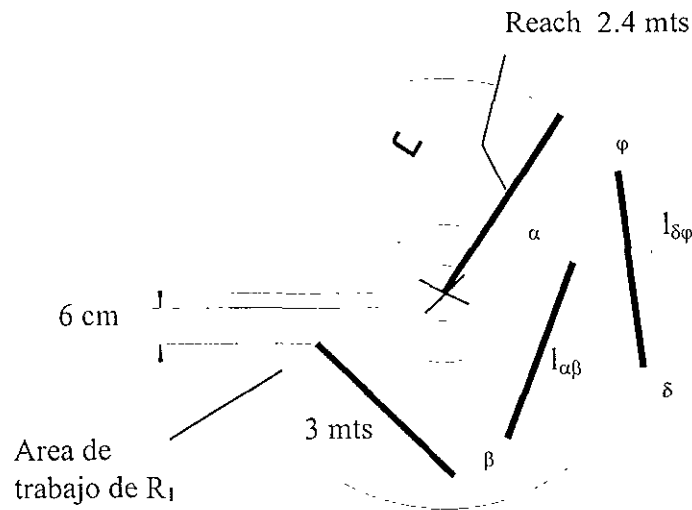


Figura 3.17. "Reach" del robot R_1 .

De la figura 3.17 se observa que la distancia de operación $l_{\delta\phi}$ es crítica, pues en los puntos δ y ϕ el robot estaría "extendido" al máximo.

Este hecho también implicaría (como en el caso de las velocidades máximas) una operación forzada del robot, y puesto que requieren una operación repetitiva, entonces el período de vida se reduce.

Una opción sería utilizar la distancia $l_{\alpha\beta}$. Por tanto, los rangos de operación funcional varían dependiendo de los requerimientos del proceso. Para nuestro caso de estudio seleccionaremos los siguientes:

1.- Velocidades funcionales: [0.1 - 1 m/s] y las aceleraciones: [2-8m/s²]

2.- Radios de operación funcionales: IRB 1400 AWG [6 cm ----- 100 cm]
 IRB 2400 AWG [6 cm ----- 300 cm].

Notemos que los 6 cm se miden según el radio de máximo alcance (Reach) del robot y los límites de la región de trabajo (ver figura 3.17).

Nuestra atención se va centrar ahora sobre la ubicación de las bases de los robots, así como en las posiciones iniciales de trabajo (localización de los órganos terminales). Algunas consideraciones benéficas sobre la ubicación correcta de un robot sobre las líneas de producción se presentan a continuación:

- 1.- El robot trabaja sobre rangos de operación funcionales.
- 2.- Se minimizan los tiempos de transporte y los tiempos de regreso.

Existen dos formas de ubicar un robot: la primera de ellas consiste en colocar el órgano terminal sobre una posición específica ya sea sobre la trayectoria real de trabajo o cercana a ella, y posteriormente ubicar la base. La otra forma es primero localizar la base del robot y trazar o dibujar su área (volumen) de trabajo, y posteriormente diseñar la posición del órgano terminal.

Estas consideraciones se muestran en la figura siguiente:

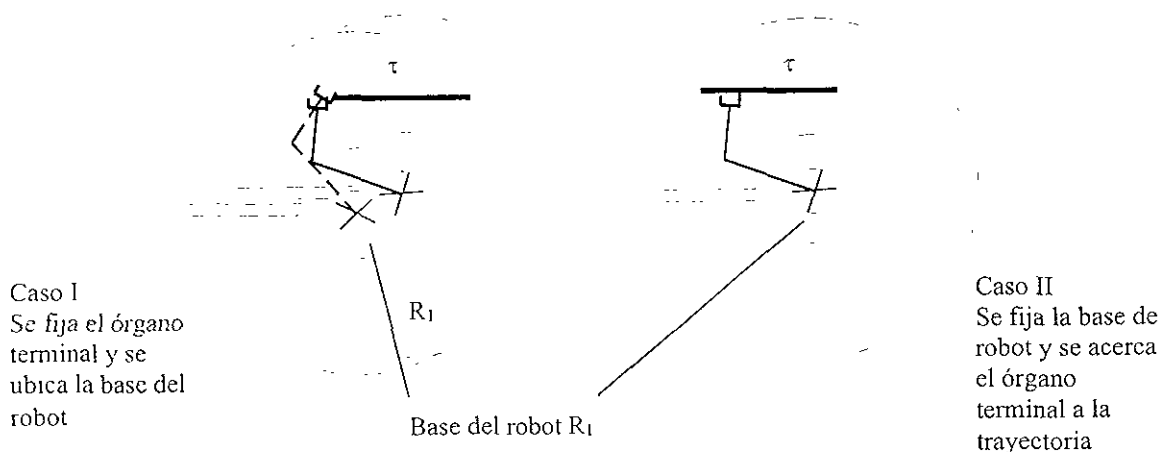


Figura 3.18. Formas de ubicar un robot.

En este trabajo, ubicaremos a los robots de transporte tomando en cuenta la primera consideración. Para el caso de los robots asociados con el proceso de soldadura, los

órganos terminales se localizan sobre las posiciones "a" y "e" según se muestra en la figura siguiente:

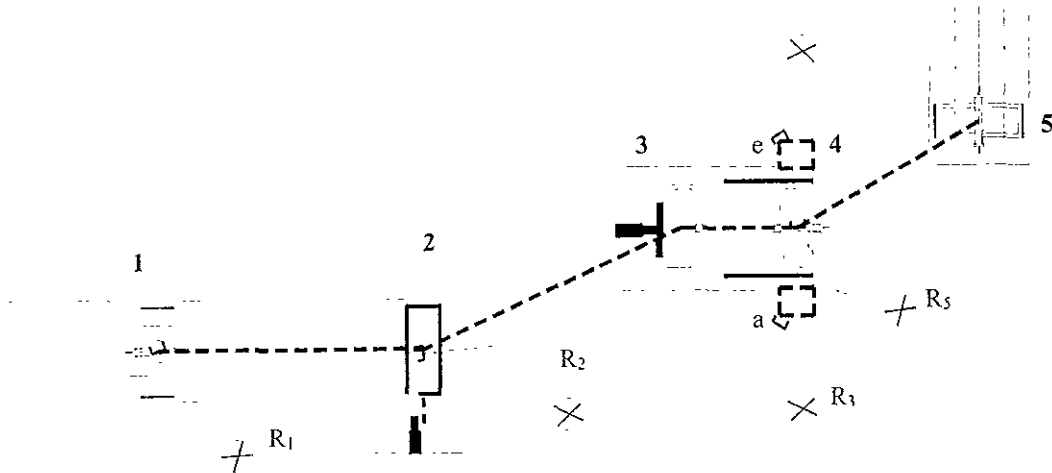


Figura 3.19 Localización de los órganos terminales de los robots industriales.

La localización de las bases de los robots una vez fijados los órganos terminales se puede caracterizar a través de las consideraciones siguientes:

- 1) La base de un robot con órgano terminal fijo debe ubicarse de tal manera que las posiciones de trabajo deberán estar contenidas sobre el "Reach" del robot.
- 2) Las posiciones de las bases deberán ser tales que los puntos iniciales y finales de las trayectorias de trabajo no estén localizados sobre el perímetro o fronteras del área de trabajo.
- 3) La altura medida de la base del robot al órgano terminal debe ser caracterizada con base en los datos técnicos del robot y bajo las restricciones de proceso.

En general, la posición correcta de la base del robot depende de la localización de las áreas de trabajo. En muchas aplicaciones industriales, las bases de los robots son montadas en columnas ó sobre guías, de tal forma que para procesos complicados traducidos a trayectorias complicadas se ubiquen correctamente los robots. La figura siguiente muestra la ubicación de las bases de los robots industriales asociados con nuestro caso de estudio.

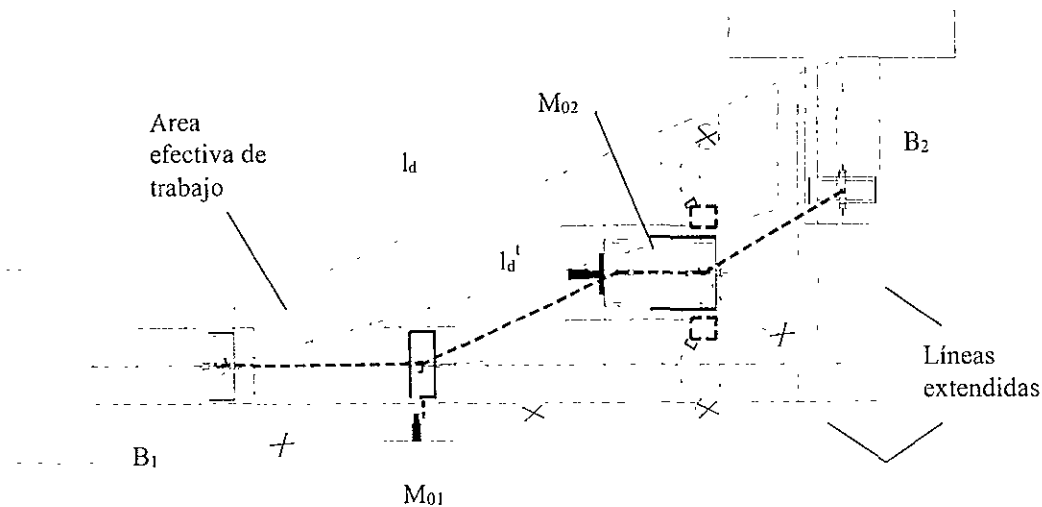


Figura 3.20. Ubicación de las bases de los robots.

De la figura anterior se puede notar que la colocación de la mesa de trabajo M_{01} es paralela a la dirección de operación de la banda B_1 . Este hecho garantiza que el robot R_1 opere con menos grados de libertad siempre que la orientación de la pieza de trabajo sobre la banda B_1 sea la misma que en la mesa de punzonado. Por otro lado, la altura estimada de B_1 es la misma que la altura de la mesa M_{01} (1m).

También de la figura 3.20 podemos observar que el área de trabajo (sombreada) efectiva está limitada por la línea de distribución l_d y las líneas extendidas de las direcciones de las bandas. Nótese, además, que la línea l_d^t está contenida dentro del área efectiva. En este trabajo, recorreremos las líneas asociadas a las direcciones de las bandas hacia sus laterales según se muestra en la figura 3.20 de tal forma que se incremente el área efectiva.

Para nuestros propósitos, la altura de trabajo de la mesa de operación M_{02} la fijaremos en 1.20 m, en tanto la altura de la banda B_2 es 1 m. Por otro lado, el área efectiva de trabajo está relacionada con el recorrido de la pieza de trabajo. Por tanto, no es necesario que las bases de los robots estén contenidas en ella (las bases de robots y las trayectorias de trabajo no pueden localizarse fuera del área A_T ya que es una restricción).

Finalmente, la ubicación de la mesa M_{02} se relaciona con la idea de aproximar lo más posible a la pieza manufacturada a la banda B_2 .

Nota: Las consideraciones aquí presentadas referentes a la caracterización del área efectiva de trabajo y a las posiciones de las bases de los robots no son únicas. En realidad utilizaremos las restricciones 3 y 4 de nuestro modelo (ver capítulo II) y nos limitaremos a trabajar con la propuesta dada en la figura 3.20. Es un hecho que un diseño de planta más correcto que el presentado anteriormente, es aquel que nos permita diseñar el flujo de recorrido de la pieza sobre la línea l_0 . Sin embargo, un análisis más profundo asociado con un modelo de manufactura óptimo lo realizaremos en un trabajo futuro.

3.7. El "tiempo preliminar" de recorrido de "ida" de la pieza de trabajo

Nuestro interés en esta sección es caracterizar de forma preliminar el tiempo estimado relacionado con las trayectorias de ida de nuestra pieza de trabajo, esto es: el recorrido de la posición **1** a la posición **5** mostradas en la figura 3.7. El tiempo de "ida" es preliminar por el hecho de haber asignado tiempos de ida a los elementos de transporte. En el capítulo IV realizaremos la corrección adecuada de tales tiempos bajo el concepto de la "sincronización de procesos".

El tiempo de ida preliminar se encuentra sumando los tiempos asociados a las trayectorias de ida y considerando una pieza de trabajo que recorre la distancia comprendida entre el nodo N_1 al nodo N_2 . Esto es:

- 1) De **1** a **2** → 4 seg.
- 2) **2a** a **2** → 1 seg.
- 3) **2** a **3** → 10 seg.
- 4) **3** a **4** → 4 seg.
- 5) **a--b--c** → 15 seg. (**e--f--g** → 15 seg. simultáneamente en **4**).
- 6) **4** a **5** → 6 seg.

En este caso, la suma de tiempos es de 40 seg. En general, el tiempo de ida preliminar es siempre mayor que el tiempo de producción unitario (T_pU). A continuación realizaremos una "crónica de proceso preliminar de ida", con el propósito de indicar el trabajo de maquinaria, así como los tiempos de procesos de ida. Esto es:

3.7.1. Crónica preliminar del proceso de ida

La pieza de trabajo se localiza sobre la banda B_1 (nodo N_1). El robot R_1 transporta la pieza en 4 seg. de la posición **1** a la posición **2** localizada sobre la mesa de trabajo M_{01} . En M_{01} el actuador A_{c1} ejecuta la operación de punzonado de las posiciones **2a** a **2b** en un segundo. Posteriormente el robot R_2 transporta la pieza ya marcada de la posición **2** a la posición **3** localizada sobre la mesa M_{02} en 10 seg. Sobre la mesa de soldadura, el actuador A_{c2} transporta la pieza de trabajo de la posición **3** a la **4** en 4 seg. En **4** los robots R_3 y R_4 realizan la operación de soldadura en los puntos **a--b--c** y **e--f--g** en 15 seg. (un seg. de acercamiento de la pistola y 14 seg. de la operación de soldadura). Finalmente el robot R_5 transporta y enfría de la posición **4** a la posición **5** localizada sobre la banda B_2 (Nodo N_2) en 6 seg. a la pieza de trabajo.

CAPÍTULO IV ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA PLANEACIÓN OPERACIONAL

Introducción: Presentaremos en este capítulo, algunas consideraciones sobre la Planeación Operacional relacionadas con el sistema de control de procesos asociado al sistema de producción analizado en los capítulos anteriores. La distribución de planta caracterizada en el capítulo 3 será utilizada para describir un código binario de procesos con el cual se pueden controlar, monitorear y sincronizar los movimientos y las operaciones de la maquinaria de trabajo. Finalmente se presenta la programación y salidas del Módulo de Punzonado y gráficas del Módulo de Soldadura-Enfriamiento.

4.1. Algunas consideraciones sobre el “sistema de control”

Presentaremos en esta sección algunas consideraciones importantes relacionadas con el diseño del sistema de control, referente a las señales y su procesamiento utilizando la comúnmente conocida "álgebra de Boole"[15]. Una de las etapas importantes relacionadas con la planeación de proceso es el diseño del sistema de control. El cual consiste en caracterizar señales emitidas por “sensores”, procesarlas y emitir señales de salida hacia los elementos de trabajo.

La figura siguiente muestra un esquema de un sistema de control.

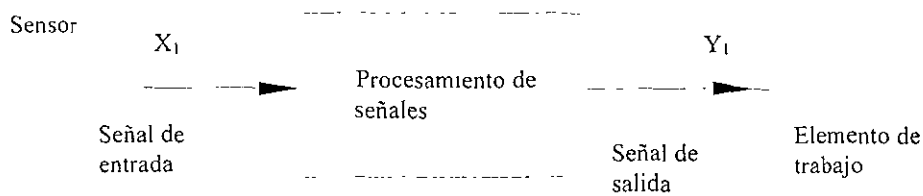


Figura 4.1 Esquema de un sistema de control.

Obsérvese de la figura anterior que " X_1 " es una variable que caracteriza una señal de entrada. Dicha señal se procesa y se emite una señal de salida caracterizada por la variable " Y_1 ". Los elementos primitivos de un sistema de control son los siguientes:

- 1.- *Sensores.*
- 2.- *Sistema de procesamiento de señales.*
- 3.- *Convertidores de señales.*
- 4.- *Elementos y piezas de trabajo.*

Los sensores son los elementos de control encargados de emitir señales de entrada a un sistema de procesamiento de señales y pueden ser ópticos, inductivos, capacitivos y mecánicos entre otros. Se colocan en posiciones estratégicas dentro del sistema de manufactura de tal forma que detecten una pieza o un elemento de trabajo y emitan una señal que posteriormente será procesada.

Los sistemas de procesamiento de señales son los encargados de recibir las señales de entrada caracterizada por los sensores, procesarlas bajo ciertas condiciones y posteriormente emitir señales de salida. Entre estos sistemas se encuentran los microprocesadores y las comúnmente conocidos "PLCs" (Programing Logic Control). Las condiciones o restricciones diseñadas dentro de un PLCs depende de los requerimientos de los procesos. Por ejemplo un robot no puede operar si dos o más sensores no están activados. A estas restricciones se les conoce como "Ecuaciones de Estado"[16].

Los convertidores de señales son aquellos elementos que se encargan de transformar señales de una energía a otra, por ejemplo, una electroválvula. Los elementos de trabajo aquí mencionados se refieren a la maquinaria asociada al sistema de producción motivo de nuestro estudio, como son los robots, los actuadores y las bandas síncronas entre otros elementos. Así, una máquina requiere de uno a varias señales procesadas para iniciar su operación.

Podemos decir que una máquina esta “sensada exteriormente” si la operación inicial de trabajo requiere de una o varias señales de entrada y, además, una vez terminada su operación se emite una o varias señales de salida, que a su vez son entradas para iniciar el trabajo de otra máquina (o para finalizar el proceso).

Las piezas de trabajo se consideran asociadas al sistema de control si una vez ubicadas sobre ciertas posiciones estratégicas, un sensor las detectan y emite una señal. Generalmente las piezas de trabajo son los elementos mas sensados en una línea de producción. En la figura siguiente se muestra la pieza de trabajo motivo de nuestro de estudio ubicada en la posición 1 (N_1) y un sensor S_1 . La activación del sensor emitirá una señal que una vez procesada, dará inicio a la operación del robot R_1 que transportará la pieza a la mesa M_{01} .

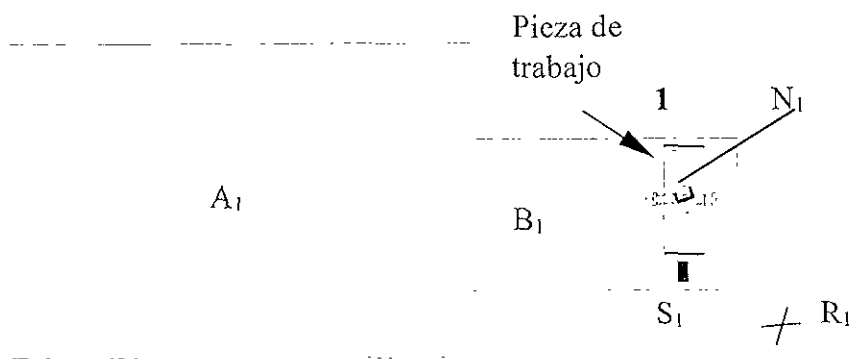


Figura 4.2. Localización de un sensor.

Los componentes de las señales son generalmente “0” y “1”, esto es: son señales binarias que se transportan por canales de conducción. La relación

$$R_B: S_1 \times P_T \rightarrow \{1,0\} \Leftrightarrow \{Si, No\} \quad (4.1)$$

es un criterio binario si,

- a) $S_1 R_B P_T \rightarrow 1$ cuando S_1 y P_T se localizan en la posición 1.
- b) $S_1 R_B P_T \rightarrow 0$ cuando P_T no se localiza en la posición 1.

Cabe hacer notar que el sensor S_1 mostrado en la figura 4.2 tendrá dos criterios caracterizados por el conjunto $\{1,0\}$; esto es, emitirá señal "1" cuando sense la pieza, y emitirá señal "0" cuando no sense la pieza.

Supóngase que el sensor S_1 ha emitido señal "1", el procesamiento de esa señal dará como resultado una señal de salida al robot R_1 . Existen tres operaciones fundamentales relacionadas con el procesamiento de señales; estas son:

- 1.- La conjunción $\bullet : X_{A2} \times X_{A2} \rightarrow X_{A2}$ (4.2)
- 2.- La disyunción $+$: $X_{A2} \times X_{A2} \rightarrow X_{A2}$
- 3.- La negación $-$: $X_{A2} \rightarrow X_{A2}$

Aquí, X_{A2} es el conjunto de vectores que toman valores en $A_2 = \{1,0\}$. Tales operaciones están definidas en el conjunto $\{1,0\}$ y se caracterizan a través de las tablas siguientes:

X_1	X_2	$Y_1 = X_1 \bullet X_2$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

a)

X_1	X_2	$Y_1 = X_1 + X_2$
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

b)

X_1	$Y_1 = -X_1$ o $Y_1 = \bar{X}_1$
1	0
0	1

c)

Tabla 4.1. Operaciones lógicas. a) Conjunción, b) Disyunción, c) Negación.

Obsérvese de las tablas anteriores que X_1 , X_2 son señales de entrada y Y_1 es una señal de salida. El sistema $\langle X_{A2}, \bullet, +, - \rangle$ se le conoce como "álgebra de Boole"[16].

Una restricción conocida como ecuación de estado es la siguiente:

$$Y_1 = X_1 \bullet X_2 \tag{4.3}$$

En forma más general podemos obtener una ecuación de estado utilizando las operaciones anteriormente definidas, esto es:

$$Y_1 = \overline{X_1} \bullet X_2 + X_3 \tag{4.4}$$

Para representar las ecuaciones de estado también se utilizan diagramas lógicos, utilizando símbolos equivalentes a las operaciones " \bullet ", " $+$ ", " $-$ " algunos de ellos se muestran en la figura siguiente:

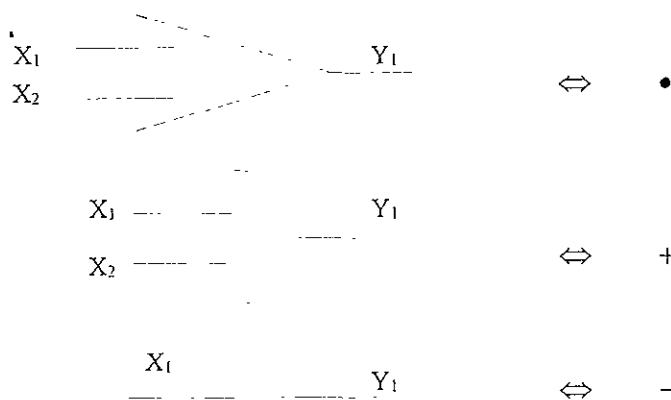


Figura 4.3. Símbolos lógicos (\Leftrightarrow es un símbolo de equivalencia).

Una expresión equivalente en términos de simbolismos a la ecuación (4.4) se muestra a continuación:

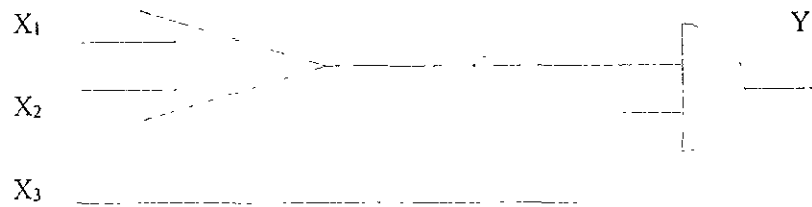


Figura 4 4. Representación esquemática de una ecuación de estado.

El álgebra de Boole permite utilizar las propiedades de conmutatividad, asociatividad y distributividad para simplificar las ecuaciones de estado. Por ejemplo, si utilizamos la propiedad $\overline{X_1} \cdot \overline{X_2} = \overline{X_1 + X_2}$ y reescribimos la expresión (4.4) obtendríamos lo siguiente:

$$Y_1 = (X_1 + \overline{X_2}) + X_3 \quad (4.5)$$

Finalmente la ecuación de estado (4.4) se puede presentar en forma de tabla; esto es:

X_1	X_2	X_3	$X_1 \cdot X_2$	Y_1
1	1	1	0	1
1	1	0	0	0
1	0	1	1	1
0	1	1	1	1
1	0	0	1	1
0	1	0	1	1
0	0	1	1	1
0	0	0	1	1

Tabla 4 2 Representación en código binario de una ecuación de estado.

4.2. Algunas Consideraciones sobre la caracterización y distribución de sensores sobre el sistema de producción

Una vez conocidas las consideraciones lógicas referentes al sistema de control, nuestra atención será centrada ahora sobre la selección de los sensores asociados con el sistema de producción aquí estudiado. Posteriormente, tales sensores serán distribuidos sobre la línea de producción.

La selección correcta de los sensores está en función del objeto a ser sensado; por ejemplo, nuestra pieza de trabajo es metálica, y para ser sensada, podemos utilizar "un sensor inductivo". También un sensor fotoeléctrico puede ser empleado para este propósito, según se muestra en la figura siguiente:

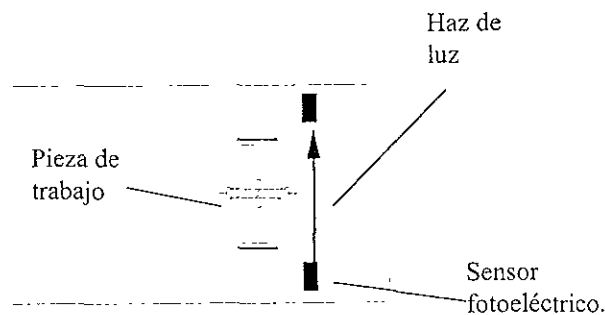


Figura 4.5 Operación de un sensor fotoeléctrico

De la figura anterior podemos notar que si la pieza interrumpe el haz de luz se emitirá una señal de detección, en caso contrario, el sensor no emite señal. La selección de un sensor depende también de las condiciones de un determinado proceso; como pueden ser: posición de la pieza, posición de los elementos de trabajo, tipo de proceso, condición del medio ambiente, etc.

Para nuestros propósitos, los sensores que utilizaremos serán los siguientes:

- 1.- Ópticos sobre las bandas B_1 y B_2 .
- 2.- Inductivos sobre las mesas de operación M_{01} y M_{02} .

3.-Ópticos, inductivos y de accionamiento mecánico para sensores que posteriormente caracterizaremos

Los elementos de mando de los actuadores neumáticos A_{C1} y A_{C2} serán dos electroválvulas servopiloteadas del tipo 3/2 y 4/2 vías que en realidad son convertidores de señales eléctricas en neumáticas.

4.3. Clasificación de los sensores según su jerarquía

Nuestro interés en esta sección es el de clasificar los sensores por jerarquía para posteriormente distribuirlos sobre las líneas de producción. Consideremos las jerarquías siguientes[7]:

- | | |
|---|------------------------|
| 1.- <i>Sensores principales</i> | <i>(Jerarquía I)</i> |
| 2.- <i>Sensores secundarios</i> | <i>(Jerarquía II)</i> |
| 3.- <i>Sensores para sincronización</i> | <i>(Jerarquía III)</i> |
| 4.- <i>Sensores bandera</i> | <i>(Jerarquía IV)</i> |

Los sensores principales se caracterizan por estar asociados a las posiciones estratégicas de las piezas de trabajo ubicadas sobre la línea de producción. Estos sensores deben ser seleccionados según las condiciones de proceso y son los primeros en distribuirse. Una característica importante relacionada con los sensores principales es que sensan únicamente piezas de trabajo.

Los sensores secundarios se utilizan para completar la operación de ida del sistema de producción y están asociados con el sensado de elementos de trabajo (algunas veces sensan piezas de trabajo). Para seleccionarlos y ubicarlos se requiere realizar una "crónica de proceso de ida" y detectar en esta crónica que elementos no pueden operar con los sensores principales, de tal forma que no se pueda realizar la operación de ida. El número de sensores secundarios estará en función del número de señales faltantes para completar la operación de ida.

Los sensores para sincronización se caracterizan bajo la restricción del tiempo unitario (T_{PU}) y están asociados generalmente al cumplimiento correcto de la producción sensando principalmente a dos o más piezas dentro de las líneas de producción. De tal forma que el tiempo medido entre la activación de los sensores de sincronización sea el T_{PU} . Estos sensores pueden ser primarios o secundarios o en su caso, seleccionar y ubicar nuevos sensores sobre las líneas de producción.

Finalmente, los sensores bandera se caracterizan por emitir señales “intermedias” que pueden ser útiles para diseñar una ecuación de estado. Otro uso de estos sensores, es el de la seguridad, por ejemplo, si se requiere conocer si un robot o actuador ha regresado a su posición inicial, entonces hemos garantizado que ha completado su ciclo. En caso de que un robot se averíe y no llegue a su posición inicial transcurrido un cierto tiempo, el sistema de control podría detenerse.

La figura siguiente muestra la distribución de sensores primarios y secundarios sobre la línea de producción motivo de nuestro estudio.

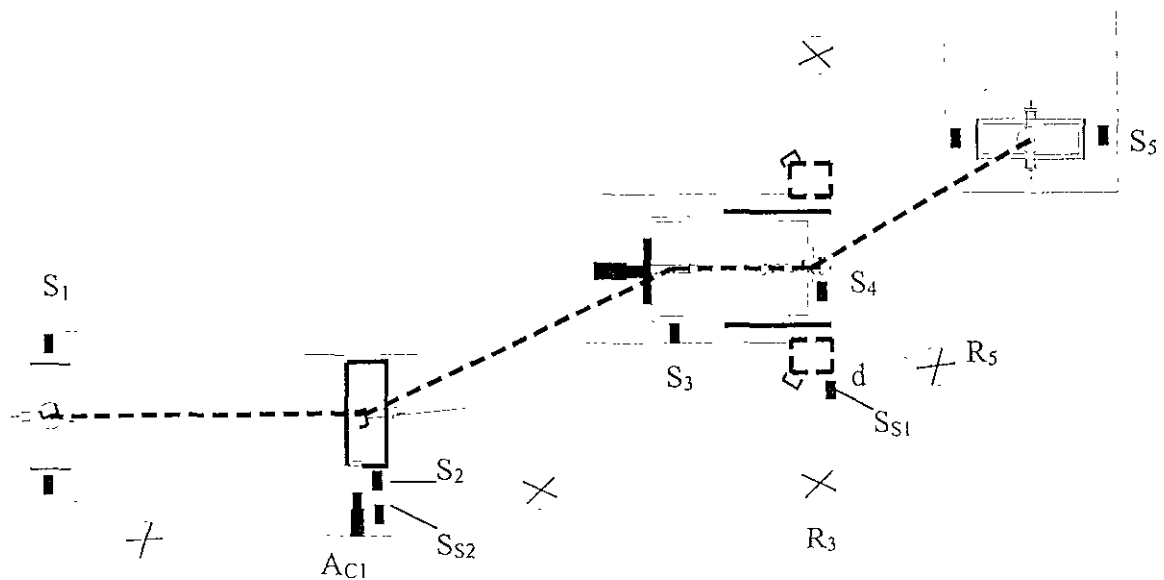


Figura 4.6. Distribución de sensores primarios y secundarios.

Aquí, S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , y S_5 , son sensores primarios, en tanto, S_{S1} y S_{S2} son sensores secundarios. Nótese de 4.6 que los sensores primarios sensan piezas de trabajo sobre las posiciones estratégicas, en tanto, el sensor secundario S_{S2} detecta el

regreso del actuador A_{C1} (y da salida al robot R), finalmente el sensor secundario S_{S1} detecta al robot R_3 en su trayectoria de regreso(y da salida al robot R_5).

4.4. Modularización

Presentaremos en esta sección una partición de nuestro modelo de manufactura la cual será llamada "Modularización". Un sistema de producción puede ser particionado o dividido en pequeños sistemas con el propósito de simplificar el modelo de control. Dicha partición se realiza de acuerdo a las consideraciones siguientes:

- 1.- *Por operación unitaria de cada elemento de trabajo, incluyendo los sensores y piezas de trabajo asociadas con el trabajo de este elemento.*
- 2.- *Por proceso híbrido, que incluye los elementos de trabajo primarios y secundarios, así como los sensores asociados.*
- 3.- *Por dos o más procesos híbridos.*
- 4.- *Por todo el sistema de producción.*

La idea del proceso híbrido es en el sentido de caracterizar las operaciones primarias y secundarias en un solo proceso. Cada partición deberá ser un subsistema de producción y el número de divisiones dependerá tanto de los elementos de trabajo como los procesos incluidos.

Nótese que la consideración 2) es el extremo máximo de las particiones, en tanto la consideración 4) se aplica cuando una empresa tiene varias "sucursales". Utilizaremos en este trabajo la consideración 2) y 3). Por tanto, nuestra partición dependerá del número de procesos. Así entonces, llamaremos Módulo de Punzonado (MP) y Módulo de Soldadura – Enfriamiento (MSE) a nuestras particiones, los cuales integrarán los elementos de trabajo y de control siguientes:

1.- Módulo de Punzonado.

- $B_1, S_1.$
- $M_{01}, R_1, A_{c1}, S_2, S_{s2}.$
- $R_2.$

2.- Módulo de Soldadura – Enfriamiento.

- $M_{02}, A_{c2}, S_3, S_4.$
- R_3, R_4, S_{s1}
- $R_5, B_2, S_5.$

La figura siguiente muestra la modularización arriba caracterizada.

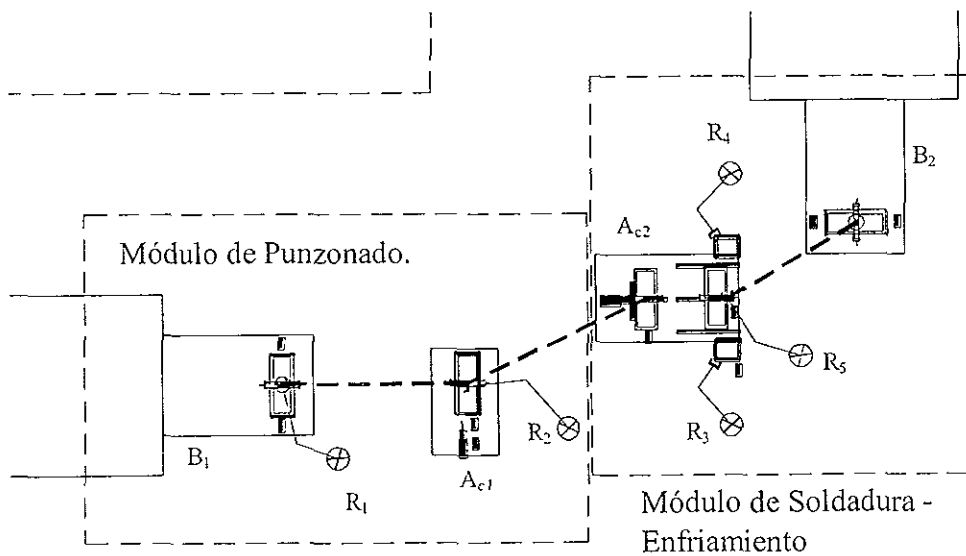


Figura 4 7. Modularización de la línea de producción.

4.4.1. Jerarquización de Módulos

La clasificación de módulos de producción por jerarquía juega un papel muy importante en el diseño del sistema de control. Algunas consideraciones importantes relacionadas con esta clasificación se presentan a continuación:

- 1.- *El módulo de máxima jerarquía tiene asociado el máximo tiempo fijo o el proceso más complicado.*
- 2.- *La sincronización de procesos se realiza principalmente sobre el módulo de máxima jerarquía.*
- 3.- *Generalmente los tiempos de procesos de los módulos de jerarquía II, III, son menores que los de jerarquía I.*

En nuestro modelo de manufactura el Módulo de Soldadura – Enfriamiento tiene el máximo tiempo fijo, esto es: $T_{FM1} = 14$ s y, por tanto,

- a.- MSE Jerarquía I

- b.- MP Jerarquía II

Observemos que la partición de nuestro sistema de manufactura es “tamaño 2”, y que cada subsistema generado tendrá un ciclo de arranque asociado.

4.4.2. Subciclos de arranque

Un subciclo de arranque se determinará por la activación de los elementos de trabajo y control sobre las trayectorias de ida. El análisis relacionado con este subciclo se realiza considerando una sola pieza de trabajo que pasa por la línea de producción. Una vez recorridas todas las trayectorias de ida y habiéndose localizado la pieza de trabajo sobre algún nodo que finalice el proceso, se determina el tiempo total del subciclo. Posteriormente, se analiza la salida de otra pieza de trabajo del

almacén de materias primas y se recorre de igual forma que la primera pieza, la trayectoria de ida. Tal tiempo de recorrido de ambas piezas debe coincidir.

Cabe señalar que para caracterizar un ciclo de arranque, se debe considerar que los elementos de trabajo estén de nueva cuenta en su posición inicial. Por tanto, para que una nueva pieza sea analizada bajo el ciclo de arranque, se debe sumar el tiempo de regreso del último elemento de trabajo ó en su caso, determinar si una máquina todavía no ha llegado a su posición de arranque nuevamente y sumar ese tiempo al de recorrido de la pieza.

Con estas ideas a continuación caracterizaremos el ciclo de arranque de los módulos de producción asociados con nuestro caso de estudio, esto es:

a) Ciclo de arranque del Módulo de Punzonado.

El ciclo de arranque de este módulo, inicia con la activación del sensor S_1 (ver figura 4.7) y termina cuando el robot R_2 a retornado a su posición de arranque. La relación siguiente nos será de utilidad para caracterizar los tiempos de ciclo de arranque de cada módulo en estudio:

$$T_{TCAi} = \sum T_{ida} + T_r \quad (4.6)$$

Aquí, T_{ida} la sumatoria de los tiempos de ida y T_r el tiempo de regreso del último elemento de trabajo asociado a la línea de producción y T_{TCAi} es el tiempo total del ciclo de arranque.

Observemos que el tiempo T_r no es conocido y por tanto T_{TCA} no puede ser determinado. Estos tiempos serán calculados en el proceso de sincronización. La medida de los tiempos de ida estará gobernada por la activación de los sensores S_1 y S_3 según se muestra en la figura 4.8. Por otro lado, se debe asociar un sensor bandera que indique el regreso del robot R_2 a su posición inicial. Diremos entonces que el ciclo de arranque del Módulo de Punzonado estará gobernado por los

sensores S_1 , S_2 y S_{B1} , siendo S_{B1} un sensor bandera el cual es mostrado en la figura 4.8.

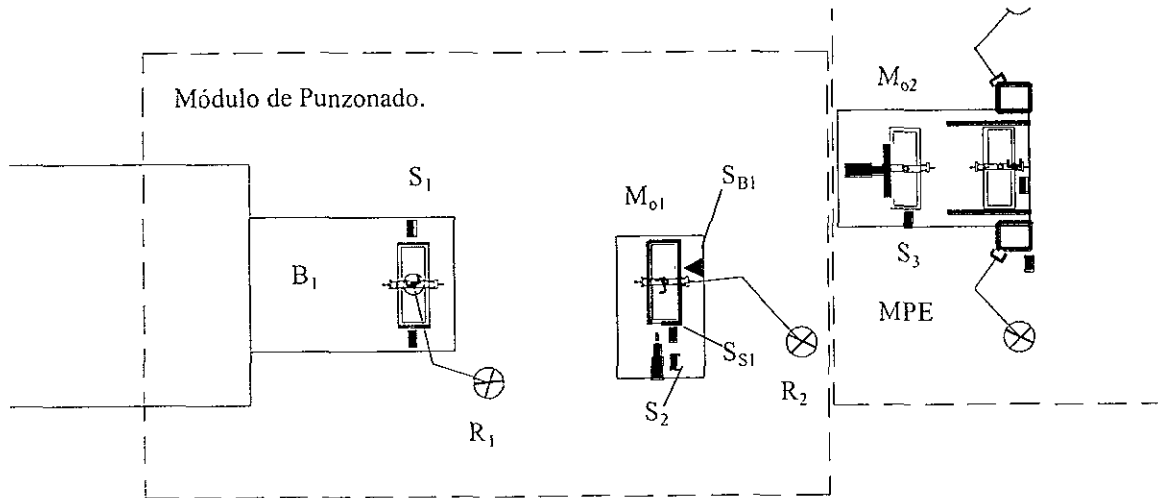


Figura 4.8 Sensor bandera S_{B1} .

b) Ciclo de arranque del Módulo de Soldadura – Enfriamiento. (MSE).

El sensor S_3 inicia en ciclo de arranque del Módulo (SE), en tanto S_5 termina las operaciones de “ida” de la pieza de trabajo. Luego, debemos asociar un sensor bandera (S_{B2}) sobre el regreso del robot R_5 para medir el tiempo total del ciclo, el cual está gobernado por la expresión (4.7).

Cabe señalar que el tiempo asociado con el ciclo de arranque del MP es el tiempo “ T_0 ” y el final es T_{TCAi} , siendo $i = 1$ el módulo analizado. Para el caso del ciclo de arranque del Módulo SE el tiempo inicial estará dado por la ecuación siguiente.

$$T_{TCA2} = T_{TCA1} - T_r \quad (4.7)$$

La expresión anterior es equivalente a decir que el ciclo de arranque de M_{SE} se inicia una vez activado el sensor S_3 . Por tanto, el tiempo inicia el sistema global es T_0 , en tanto, el tiempo final del proceso (T_{FCG}) esta dado por:

$$T_{FCG} = (\sum T_{ida} + T_{r1})_{MP} + [(\sum T_{ida} + T_{r1})_{MP} - T_{r1}]_{MSE}$$

Lo cual equivale a:

$$T_{FCG} = (\sum T_{ida})_{MP} + (\sum T_{ida} + T_{r2})_{MSE} \quad (4.8)$$

Note de la expresión anterior que T_{r2} es el tiempo de regreso del robot R_5 . Para analizar esta sección, a continuación se presentan los elementos de trabajo y sensado asociados con los ciclos de arranque de los módulos arriba analizados, esto es:

1.- Módulo de Punzonado.

Inicio $S_1 - R_1$

Término $S_{B1} - R_3$

2.- Módulo de Soldadura – Enfriamiento.

Inicio $S_3 - A_{C2}$.

Término $S_{B2} - R_5$.

4.5. Tiempos de proceso

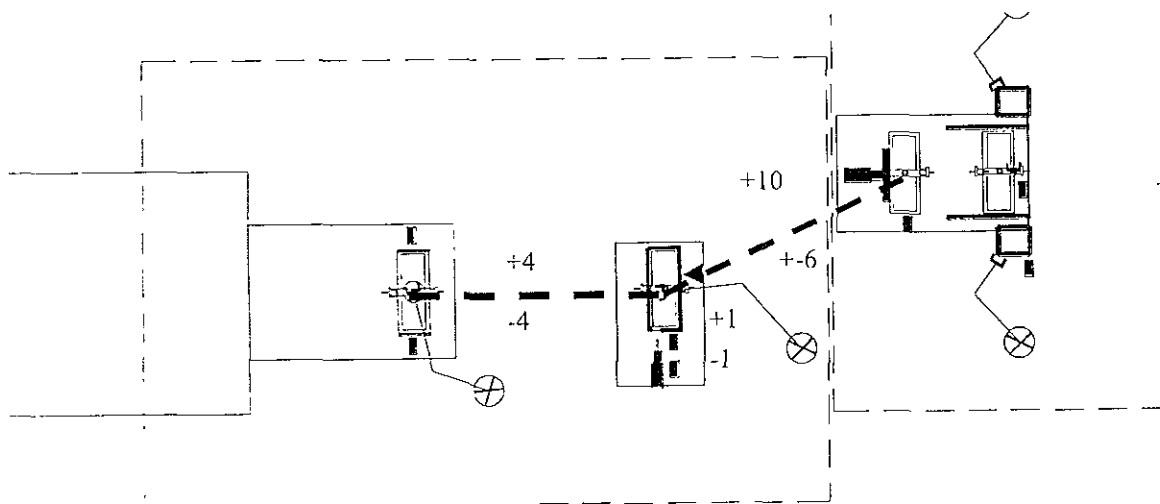
En esta sección se presentan los tiempos de proceso asociados con la línea de producción en estudio. Los tiempos de ida caracterizados en el capítulo 3 tendrán asociados un símbolo "+" para indicar que son tiempos de ida, en tanto, los tiempos de vuelta llevarán un signo "-" delante de la cantidad (de tiempo).

Los tiempos de regreso del Módulo de Punzonado están en función del tiempo de sincronización del Módulo de Soldadura-Enfriamiento, ya que éste último módulo es de máxima jerarquía y, por tanto, cada tiempo de regreso (T_{reg}) del MSE tiene como máxima restricción $T_{reg} < T_{pU}$.

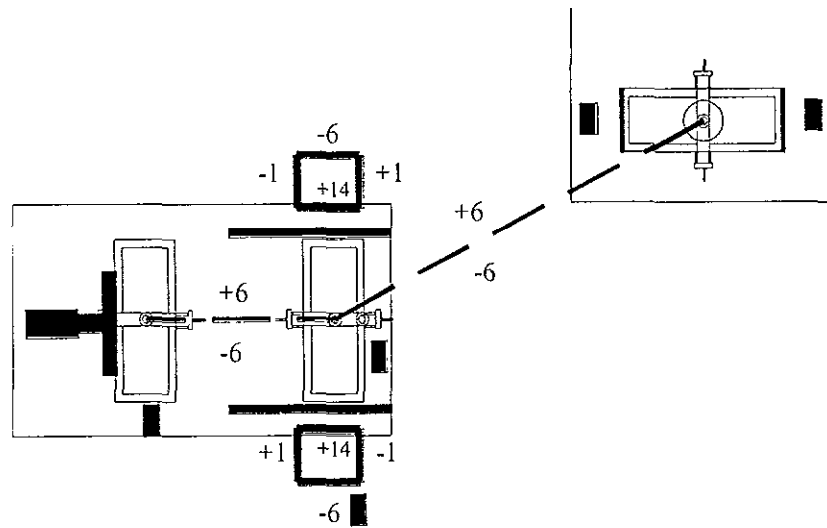
Una consideración importante relacionada con los tiempos de regreso es la de seleccionar un tiempo común o igual entre dos o más elementos de trabajo. Por ejemplo el tiempo de referencia "-6" esta asociado al regreso del robot R_3 (sin considerar el tiempo "-1" dado en los nodos c-d). Con estas ideas es posible asignar el valor de "-6" a los regresos del actuador Ac_2 y R_5 respectivamente. Cabe hacer notar que esta asignación no afecta el funcionamiento del módulo MSE, pues el TpU esta dado por el ciclo completo del robot R_5 , además, es claro que $T_{reg} < TpU$ se satisface.

Para el caso del Módulo de Punzonado, el tiempo de regreso del actuador Ac_1 es de "-4" o sea igual a su tiempo de ida. Para el robot R_2 el tiempo de regreso se determina por $TpU - (T_{ida})_{MP} = 22 - 14 = 6$, esto es: el regreso de R_2 es "-6". La idea de asignar tiempos de regreso iguales es en el sentido de utilizar las mismas trayectorias tanto de ida como de vuelta siempre y cuando la funcionalidad de la línea de producción no se vea afectada.

Cabe hacer notar que la asignación de tiempos hecha anteriormente no es única y, por tanto, cada asignación debe ser estudiada tomando en cuenta los parámetros cinemáticos y dinámicos de la maquinaria de trabajo. En la figura siguiente se muestran los tiempos de proceso de los Módulos de producción asociados a nuestro caso de estudio.



a)



b)

Figura 4.9. Los tiempos de proceso. a) Módulo de punzonado, b) Módulo de Soldadura - Enfriamiento.

4.6. Crónica de proceso global "ida"

Presentaremos en esta sección una crónica global de procesos de ida. En este caso al tiempo T_0 se inicia la operación del Módulo de Punzonado y la operación de todo el proceso termina al tiempo T_{44} según la suma de tiempos de ida. Esta crónica nos será de utilidad para construir una tabla de código binario de procesos en la sección posterior.

Crónica general de ida:

Una pieza de trabajo se localiza en la posición 1. El sensor S_1 envía una señal de activación al robot R_1 quién transporta la pieza de la posición 1 a la posición 2 en el intervalo T_0 - T_4 . En T_4 , el sensor S_2 localizado en la posición 2 envía una señal de activación al actuador A_{c1} quién realiza la operación de punzonado en T_5 . En T_6 el sensor secundario S_{s2} detecta el regreso del actuador y envía señal de salida al robot R_2 el cual realiza la operación de transporte de T_6 a T_{16} . En T_6 el sensor S_3 detecta presencia de la pieza en la posición 3 y envía la señal de activación al actuador A_{c2} ubicado sobre la mesa M_{02} de soldadura quién transporta la pieza de trabajo de la posición 4 en 6 segundos. En T_{22} y sobre 4, el sensor S_4 detecta

presencia de la pieza y envía una señal a los robots R_3 y R_4 quienes simultáneamente realizan la operación de soldadura en el intervalo de tiempo T_{22} - T_{38} . En T_{38} , el sensor S_{s1} detecta presencia del robot R_3 y envía una señal al robot R_5 el cual realiza la operación de transporte-enfriamiento de la posición 4 a la posición 5 en 6 segundos. En 5 el sensor S_5 detecta la llegada de la pieza manufacturada en T_{44} . Este último tiempo finaliza el proceso.

4.7. El código binario de proceso y las ecuaciones de estado

Presentaremos en esta sección una tabla que caracteriza en forma global los procesos asociados a nuestro modelo de manufactura. Utilizaremos para este propósito al conjunto binario $A_2 = \{1,0\}$ y los tiempos de proceso discretizados, así como los elementos de trabajo y los elementos de sensado. Una tabla con estas características es comúnmente conocida como el "Código Binario de Proceso" (CBP) [7] y [17].

Un código binario de procesos representa todas los eventos dados en la línea de producción. Del lado izquierdo de la tabla 4.3 se localizan los tiempos de proceso tanto de ida como de vuelta de los elementos de trabajo, así como los llamados tiempos críticos que en este caso se identifican por llevar un signo "-" ($-T_{16}$ por ejemplo). En la parte superior se localizan los elementos de trabajo ordenados según la crónica de procesos de ida. También en esta misma parte se localizan los elementos de señalización colocados en orden según su jerarquía. La totalidad de los tiempos de proceso se calcula mediante $T_{Tida} + T_{pU}$ incluyendo los tiempos críticos (los cuales se caracterizan de la crónica general de procesos de ida según los eventos de señalización). Notemos que para nuestro caso de estudio el último tiempo de proceso debe ser T_{66} y el último tiempo crítico debe ser $-T_{66}$ quien determinará la finalización de la segunda pieza de trabajo (pues la primera salió al tiempo T_{44}).

Por otro lado, el tiempo medido entre la primera y segunda pieza de trabajo es exactamente el T_{pU} con lo cual el proceso global esta sincronizado.

Para nuestro modelo de manufactura tendremos los datos y restricciones siguientes:

- a) Los elementos de trabajo son: $R_1, A_{c1}, R_2, A_{c2}, R_3, R_4$ y R_5 siguiendo el ciclo global de proceso.
- b) Los elementos de señalización son: $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_{s1}, S_{s2}$ y S_{B1} según la jerarquía.
- c) Los tiempos críticos serán caracterizados según los condicionantes.
- d) No incluiremos las bandas de transporte en el código binario.

La tabla siguiente muestra el código binario asociado con la línea de producción motivo de nuestro estudio.

Código binario de proceso

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
T/M	R_1	A_{c1}	R_2	A_{c2}	R_3	R_4	R_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_{s1}	S_{s2}	S_{B1}
$-T_0$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
T_1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_2	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_3	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_4	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
T_5	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_6	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
T_7	-1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_8	-1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_9	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{10}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{11}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{12}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{13}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{14}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{15}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{16}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
T_{17}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{18}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{19}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{20}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{21}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{22}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$-T_{22}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
T_{23}	+1	0	0	-1	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
T_{24}	+1	0	0	-1	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
T_{25}	+1	0	0	-1	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
T_{26}	+1	0	0	-1	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
$-T_{26}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
T_{27}	-1	+1	0	-1	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
T_{28}	-1	-1	0	-1	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
$-T_{28}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
T_{29}	-1	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{30}	-1	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{31}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{32}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{33}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{34}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{35}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{36}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{37}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{38}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$-T_{38}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
T_{39}	0	0	-1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{40}	0	0	-1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{41}	0	0	-1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{42}	0	0	-1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{43}	0	0	-1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{44}	0	0	-1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_{44}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
T_{45}	+1	0	0	-1	+1	+1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1
T_{46}	+1	0	0	-1	+1	+1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1
T_{47}	+1	0	0	-1	+1	+1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1
T_{48}	+1	0	0	-1	+1	+1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1
$-T_{48}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
T_{49}	-1	+1	0	-1	+1	+1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1
T_{50}	-1	-1	0	-1	+1	+1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1
$-T_{50}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
T_{51}	-1	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{52}	-1	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{53}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{54}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{55}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{56}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{57}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{58}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{59}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{60}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$-T_{60}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
T_{61}	0	0	-1	+1	-1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0

T_{62}	0	0	-1	+1	-1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{63}	0	0	-1	+1	-1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{64}	0	0	-1	+1	-1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{65}	0	0	-1	+1	-1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{66}	0	0	-1	+1	-1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_{66}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
T/M	R_1	A_{C1}	R_2	A_{C2}	R_3	R_4	R_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_{S1}	S_{S2}	S_{B1}

Tabla 4.3 El código binario de procesos.

Obsérvese del código binario arriba presentado que el número de tiempos críticos es 13 y, por tanto, el número total de tiempos de procesos incluyendo los tiempos críticos es de 79. Para la interpretación del código binario de proceso se deben seguir los pasos siguientes: [17]

- 1) Los tiempos +1 significan tiempos de ida y -1 tiempos de vuelta.
- 2) Las casillas que integran en "0" en su interior, representan que un elemento de trabajo o sensor se encuentra en "home" o desactivado respectivamente.
- 3) Contabilice los tiempos críticos caracterizados por $-T_i$.
- 4) En las casillas asociadas con los tiempos críticos únicamente deben ser activados sensores. El hecho de que existe un "0" en las casillas de los elementos de trabajo no implica que estén en "home" o en su posición final de trabajo.
- 5) Cada tiempo crítico es una ecuación de estado.
- 6) Identifique la matriz de arranque inicial.
- 7) Identifique la matriz de ciclo automático.
- 8) Identifique los elementos de trabajo que operen:
 - a) A ciclo continuo.
 - b) A ciclo intermitente.
- 9) La ecuación de estado correspondiente al ciclo automático debe integrar la señal del último sensor asociado, con el final del proceso.
- 10) La ecuación de estado asociada con la salida de la primer pieza de trabajo debe ser igual a la segunda asociada con la segunda pieza de trabajo.

- 11) Del tiempo T_0 (inicial) al máximo tiempo de sincronización deben activarse todos los elementos de trabajo y sensado al menos una vez.
- 12) Mediante las ecuaciones de estado construya el diagrama escalera del PLC.
- 13) Si es necesario, por cada módulo de producción asocie un PLC.

Con estas ideas, a continuación conoceremos las ecuaciones de estado de nuestro sistema de producción esto es:

- a) Existen 13 tiempos críticos sobre la matriz de código binario. Estos son:
 - 1) $T_0, -T_4, -T_6, -T_{16}, -T_{22}, -T_{26}, -T_{28}, -T_{38}, -T_{44}, -T_{48}, -T_{50}, -T_{60}, -T_{66}$.
- b) Las ecuaciones de estado se construyen bajo el álgebra de Boole mencionada al inicio de este capítulo. Esto es:

1) $Y_1 = X_1$	para T_0 .	(4.9)
2) $Y_2 = X_2$	para $-T_4$.	
3) $Y_3 = X_3$	para $-T_6$.	
4) $Y_4 = X_4$	para $-T_{16}$.	
5) $Y_5 = X_1 \cdot (X_5 \cdot X_6)$	para $-T_{22}$.	
6) $Y_2' = X_2$	para $-T_{26}$.	
7) $Y_3' = X_3$	para $-T_{28}$.	
8) $Y_6 = X_7 \cdot X_4$	para $-T_{38}$.	
9) $Y_7 = (X_1 \cdot X_5) \cdot (X_8 \cdot X_6)$	para $-T_{44}$.	
10) $Y_2'' = X_2$	para $-T_{48}$.	
11) $Y_3'' = X_3$	para $-T_{50}$.	
12) $Y_6' = X_7 \cdot X_4$	para $-T_{60}$.	
13) $Y_7' = (X_1 \cdot X_5) \cdot (X_8 \cdot X_6)$	para $-T_{66}$.	

Aquí, $Y_1 \rightarrow R_1$, Y_2, Y_2' y $Y_2'' \rightarrow A_{c1}$, Y_3, Y_3' y $Y_3'' \rightarrow R_2$, $Y_4 \rightarrow A_{c2}$, $Y_5 \rightarrow R_2$, R_3 y R_4 , Y_6 y $Y_6' \rightarrow R_5$, A_{c2} , Y_7 y $Y_7' \rightarrow R_1$, R_3 y R_4 , A_{c2} . En tanto que: $S_1 \rightarrow X_1$, $S_2 \rightarrow X_2$, $S_{s2} \rightarrow X_3$, $S_3 \rightarrow X_4$, $S_4 \rightarrow X_5$, $S_{B1} \rightarrow X_6$, $S_{s1} \rightarrow X_7$, $S_5 \rightarrow X_8$.

Obsérvese de la descripción arriba señalada que al tiempo $-T_{44}$ y $-T_{66}$ las ecuaciones de estado son iguales. Además, la matriz de arranque se caracteriza del tiempo T_0 al tiempo $-T_{44}$. En tanto la matriz de ciclo automático se forma del tiempo $-T_{44}$ al tiempo $-T_{66}$.

Es claro que para caracterizar un ciclo de arranque es necesario que todos los elementos de trabajo y de sensado satisfagan el paso N^o 11. Por otro lado, el ciclo automático se caracteriza bajo la igualdad de las ecuaciones de estado en los tiempos de salida de la primera y segunda pieza del módulo de producción.

Notemos que las ecuaciones de estado integran la operación disyunción ($\bullet: X_{A2} \times X_{A2} \rightarrow X_{A2}$), esto es como consecuencia de que nuestro modelo tienen asociada una distribución de módulos de producción y maquinaria de forma lineal.

Finalmente, construiremos el diagrama de contactos relacionado con el PLC, quien controlará a nuestro sistema de manufactura. Esto es:



Figura 4.10. Diagrama de contactos de un PLC asociado con el modelo de control.

4.8. Algunas consideraciones sobre programación y simulación de resultados

Presentaremos en esta sección algunas consideraciones sobre la programación y simulación de los movimientos de los elementos de trabajo que integran la línea de producción estudiada anteriormente. Para nuestros propósitos, incluiremos solamente la programación del Módulo de Punzonado. También expondremos las salidas gráficas del Módulo de Soldadura-Enfriamiento[18] para lo cual se utiliza la plataforma de cálculo formal Mathematica[19].

Para generar la simulación computacional se debe tomar en cuenta los problemas cinemáticos inversos de la maquinaria de trabajo los cuales se pueden consultar en [20]. La simulación aquí propuesta tiene asociada las consideraciones siguientes:

- 1 Los tiempos son discretos
- 2 La simulación es de posicionamiento
- 3 No se incluyen los perfiles de velocidad y aceleración
- 4 Los eslabones de los robots son simulados en modo alambre
- 5 Las rotaciones son modeladas con el álgebra de Cuaterniones[20]
- 6 Los grados de libertad simulados son como máximo tres de posicionamiento
- 7 El robot R_1 es idealizado por una cadena cinemática abierta de 2 GDL
- 8 Los robots R_2 , R_3 , R_4 y R_5 son cadenas cinemáticas abiertas de 3GDL
- 9 Las transformaciones de la pieza de trabajo no son incluidas en la simulación
- 10 El código binario de proceso es respetado en la simulación

4.8.1. Programación y simulación computacional del Módulo de Marcaje

<i>Modelo cinemático de posicionamiento del elemento de trabajo R_1</i>	<i>Descripción del programa.</i>

<p>ClearAll[e1,m11,m12,p0,p1,p2,p3,p,q0,q1,q2,q3, q,P0,P1,P2,P3,P,Q0,Q1,Q2,Q3,Q,f1,f2,t1,t2,d1,d 2,b1,b2,r1,r2,n11,n12,b12,b22]</p> <p>Mpq[P_,Q_]={P[[1]] Q[[1]]-P[[2]] Q[[2]]-P[[3]] Q[[3]]- P[[4]] Q[[4]],P[[1]] Q[[2]]+P[[2]] Q[[1]]+P[[3]] Q[[4]]- P[[4]] Q[[3]],P[[1]] Q[[3]]-P[[2]] Q[[4]]+P[[3]] Q[[1]]+ P[[4]] Q[[2]],P[[1]] Q[[4]]+P[[2]] Q[[3]]-P[[3]] Q[[2]]+ P[[4]] Q[[1]]};</p> <p>Conj[P_]={P[[1]],-P[[2]],-P[[3]],-P[[4]]};</p> <p>Ropq[P_,Q_]=Mpq[P,Mpq[Q,Conj[P]]];</p> <p>e1={0,1,0,0},</p> <p>f1=0/2 Degree;f2=270/2 Degree;</p> <p>P0=N[Cos[f1]],P1=0;P2=0;P3=N[Sin[f1]],P={P0,0, 0,P3}, Q0=N[Cos[f2]];Q1=0;Q2=0;Q3=N[Sin[f2]],Q={Q0, 0,0,Q3};</p> <p>p={p0,0,0,p3}; q={q0,0,0,q3},</p> <p>m11=Ropq[P,e1],m12=Ropq[Q,m11];</p>	<p>Limpieza de variables.</p> <p>Operación de multiplicación de Quaterniones. $(a,b,c,d) * (\alpha,\beta,\gamma,\delta) = (a\alpha-b\beta-c\gamma-d\delta + b\alpha+c\delta - d\gamma, a\gamma-b\delta+c\alpha+d\beta, a\delta+b\gamma-c\beta+d\alpha)$</p> <p>Conjugado de un Quaternion P. $\bar{p} = (a, -b, -c, -d)$.</p> <p>Función de rotación. $\rho(p, q) = (p * q * \bar{p})$</p> <p>Base canónica en \mathcal{H}^4</p> <p>Desplazamientos angulares de la configuración no deformada(θ_1 y θ_2)</p> <p>Parámetros de los Quaterniones P y Q asociados a la configuración no deformada.</p> <p>Quaterniones de la configuración deformada</p> <p>Definición de las bases móviles en la configuración no deformada $\underline{e}'_1 = \rho(p, e_1) \equiv p * \underline{e}_1 * \bar{p}$ $\underline{e}''_1 = \rho(q, \rho(p, e_1)) \equiv (q * p) * \underline{e}_1 * (\overline{q * p})$</p> <p>Definición de las bases móviles en la</p>
--	--

n11=Ropq[p,m11];n12=Ropq[q,Ropq[Q,m11]];

d1=5;d2=5;

b1=d1*m11+(0,5,0,5.5);b2=d2*m12;

r1=b1+b2;

b11=d1*n11+(0,5,0,5.5);b21=d2*n12;

r2=b11+b21;

```
ClearAll[res,xp,yp,t,Vec1,p0,p3,q0,q3]
For[t=0,t<=4,t++,
xp=(5/4) t;
yp=5;
zp=5.5;
res[t]=FindRoot[{r2[[2]]==xp,r2[[3]]==yp,
p0^2+p3^2==1,q0^2+q3^2==1},{p0,0.9},{p3,0.1},{
q0,0.9},
{q3,0.1},MaxIterations->25];
Vec1[t]={p0,p3,q0,q3}/.res[t];
```

configuración deformada

$$\underline{a}'_1 = \rho(P, \underline{e}'_1) \equiv P * p * \underline{e}_1 * \overline{P * p}$$

$$\underline{a}''_1 = \rho(Q, \rho(P, \underline{e}''_1)) \equiv Q * P * q * p *$$

$$\underline{e}_1 * (\overline{Q * P * q * p})$$

Dimensiones de los eslabones l_1 y l_2

Ecuación de la configuración no deformada del robot R_1 y coordenadas de la base del robot

$$\underline{R}(p_{ot}) = l_1 \{ p * \underline{e}_1 * \overline{p} \} + l_2 \{ (q * p) * \underline{e}_1 * (\overline{q * p}) \}$$

Ecuación de la configuración deformada del robot R_1 .

$$\underline{R}(p_{ot}) = l_1 \{ P * p * \underline{e}_1 * \overline{P * p} \} + l_2 \{ Q * P * q * p * \underline{e}_1 * (\overline{Q * P * q * p}) \}$$

Bucle para la solución de la cinemática inversa del robot R_1

Trayectorias de R_1 (τ_{12} y τ_{21})

Tiempo de ida 4 seg. (tiempo de vuelta 4 seg)

Lugar geométrico de la trayectoria (recta)

Solución del problema cinemático inverso

$$\text{Normas : } P_0^2 + P_3^2 = 1, Q_0^2 + Q_3^2 = 1$$

Condiciones iniciales

Guardado de las soluciones

Limpieza de variables.

<p>Modelo cinemático de posicionamiento del elemento de trabajo R_2</p> <p>ClearAll[F0,F3,G0,G1,H0,H1,f0,f3,g0,g1,h0,h1,v1,v2,v3,e1,e2,e3,F,G,H,f,g,h,e11,e21,e31,e21,e22,e32,e31,e32,e33]</p> <p>Mpq[P_,Q_]:={P[[1]] Q[[1]]-P[[2]] Q[[2]]-P[[3]]Q[[3]]-P[[4]] Q[[4]],P[[1]] Q[[2]]+P[[2]] Q[[1]]+P[[3]] Q[[4]]-P[[4]] Q[[3]],P[[1]] Q[[3]]-P[[2]] Q[[4]]+P[[3]] Q[[1]]+P[[4]] Q[[2]],P[[1]] Q[[4]]+P[[2]] Q[[3]]-P[[3]] Q[[2]]+P[[4]] Q[[1]]};</p> <p>Conj[P_]:= {P[[1]],-P[[2]],-P[[3]],-P[[4]]};</p> <p>Ropq[P_,Q_]:=Mpq[P,Mpq[Q,Conj[P]]];</p> <p>e1={0,1,0,0};e2={0,0,1,0};e3={0,0,0,1};</p> <p>v1=90,v2=0,v3=-90;</p> <p>F0=Cos[(v1/2)*Degree]/N,F1=0;F2=0,F3=Sin[(v1/2)*Degree]/N;</p> <p>G0=Cos[(v2/2)*Degree]/N;G1=Sin[(v2/2)*Degree]/N;G2=0;G3=0;</p> <p>H0=Cos[(v3/2)*Degree]/N;H3=0;H2=0;H1=Sin[(v3/2)*Degree]/N;</p> <p>F={F0,0,0,F3}; G={G0,G1,0,0}; H={H0,H1,0,0};</p> <p>f={f0,0,0,f3}; g={g0,g1,0,0}; h={h0,h1,0,0};</p>	<p>Operación de multiplicación de Quaterniones.</p> $(a,b,c,d) * (\alpha,\beta,\gamma,\delta) = (a\alpha-b\beta-c\gamma-d\delta, a\beta+b\alpha+c\delta-d\gamma, a\gamma-b\delta+c\alpha+d\beta, a\delta+b\gamma-c\beta+d\alpha)$ <p>Conjugado de un Quaternion P.</p> $\bar{p} = (a, -b, -c, -d).$ <p>Función de rotación.</p> $\rho(p, q) = (p*q*\bar{p})$ <p>Base canónica en \mathcal{H}^4</p> <p>Desplazamientos angulares de la configuración no deformada (θ_1, θ_2 y θ_3)</p> <p>Parámetros de los Quaterniones P, Q y R asociados a la configuración no deformada.</p> <p>Quaterniones de la configuración no deformada y definición de los ejes de rotación</p> <p>Quaterniones de la configuración deformada y definición de los ejes de rotación</p> <p>Dimensionamiento de los eslabones</p> <p>Definición de las bases móviles en la</p>
---	--

d1=10;d2=5;d3=4;

k1=Mpq[f,F];k2=Mpq[g,G];k3=Mpq[h,H];

e11=Ropq[k1,e1];

e21=Ropq[k1,e2];

e31=Ropq[k1,e3];

b1=d1*e31;

k4=Mpq[k1,k2];

e22=Ropq[k4,e2];

b2=d2*e22;

k5=Mpq[k4,k3];

e23=Ropq[k5,e2];

b3=d3*e23;

rp=Simplify[{0,10,5,0}+b1+b2+b3];

rpp={0,10,5,0}+b1+b2;

rppp={0,10,5,0}+b1;

ClearAll[Sol,Vec,f0,f3,g0,g1,h0,h1]

For[i=0,i<=10,i++,

t=j;

x=(5/10)*t+5;

configuración no deformada y vectores de posición asociados con los eslabones

$$\underline{e}_3^I = \rho(p, \underline{e}_1) \equiv p * \underline{e}_3 * \bar{p}$$

$$\underline{e}_2^{II} = \rho(q, \rho(p, \underline{e}_2)) \equiv (q * p) * \underline{e}_2 * (\bar{q} * \bar{p})$$

$$\underline{e}_3^{III} = \rho(r, \rho(q, \rho(p, \underline{e}_3))) \equiv (r * q * p) * \underline{e}_3 * (\bar{r} * \bar{q} * \bar{p})$$

Definición de las bases móviles en la configuración deformada y vectores de posición asociados con los eslabones

$$\underline{d}_3^I = \rho(P, \underline{e}_3^I) \equiv P * p * \underline{e}_3 * \bar{P} * \bar{p}$$

$$\underline{d}_2^{II} = \rho(Q, \rho(P, \underline{e}_2^{II})) \equiv Q * P * q * p * \underline{e}_2 * (\bar{Q} * \bar{P} * \bar{q} * \bar{p})$$

$$\underline{d}_3^{III} = \rho(R, \rho(Q, \rho(P, \underline{e}_3^{III}))) \equiv R * Q * P * r * q * p * \underline{e}_3 * (\bar{R} * \bar{Q} * \bar{P} * \bar{r} * \bar{q} * \bar{p})$$

Construcción de la ecuación de la posición deformada de R₂ y coordenadas de la base del robot

$$\underline{R}(\rho_{ot})''' = I_1 \{ P * p * \underline{e}_3 * \bar{P} * \bar{p} \} + I_2 \{ Q * P * q * p * \underline{e}_2 * (\bar{Q} * \bar{P} * \bar{q} * \bar{p}) \} + I_2 \{ R * Q * P * r * q * p * \underline{e}_3 * (\bar{R} * \bar{Q} * \bar{P} * \bar{r} * \bar{q} * \bar{p}) \}$$

Bucle para la solución de la cinemática inversa del robot R₂

Trayectorias de R₂ (τ₂₃)

Tiempo de ida 10 seg.

Lugar geométrico de la trayectoria (recta)

Solución del problema cinemático inverso

$$\text{Normas: } P_0^2 + P_3^2 = 1, Q_0^2 + Q_3^2 = 1$$

$$R_0^2 + R_1^2 = 1$$

<pre> y=(7.53/10)*t+5; z=(7.53/10)*t+6; Sol[i]=FindRoot[{rp[[2]]==x,rp[[3]]==y,rp[[4]]==z,f0 ^2+f3^2==1, g0^2+g1^2==1,h0^2+h1^2==1},{f0,0.9},{g0,0.9},{ h0,0.9},{f3,-0.2},{g1,0.1},{h1,0.1},MaxIterations- >30]; Vec[i]={f0,g0,h0,f3,g1,h1}/Sol[i]; ClearAll[Col,Bec,f0,f3,g0,g1,h0,h1] For[i=0,i<=6,i++, t=i; x=(5/6)*t+5; y=(7.53/6)*t+5; z=(7.53/6)*t+6; Col[i]=FindRoot[{rp[[2]]==x,rp[[3]]==y,rp[[4]]==z,f0 ^2+f3^2==1, g0^2+g1^2==1,h0^2+h1^2==1},{f0,0.9},{g0,0.9},{ h0,0.9},{f3,-0.2},{g1,0.1},{h1,0.1},MaxIterations- >30]; Bec[i]={f0,g0,h0,f3,g1,h1}/Col[i]; A1=Graphics3D[Polygon[{{4.76,6.12,2.61},{5.26, 6.12,2.61},{5.26,6.12,2.11},{4.76,6.12,2.11}}]], B1=Graphics3D[Polygon[{{4.76,5.12,2.61},{5.26, 5.12,2.61},{5.26,5.12,2.11},{4.76,5.12,2.11}}]]; Almacén1=Graphics3D[Cuboid[{-21.97,-1.08,0},{- 9.81,11.08,5.6}]]; MesaM1=Graphics3D[Cuboid[{-9.82,2.74,0},{- 1.97,7.25,2}]]; MesaM2=Graphics3D[Cuboid[{- 1.97,3.87,0},{1.97,6.12,2}]]; MesaM3=Graphics3D[Cuboid[3.03,3.87,0},{6.98, 8.37,2}]]; Linea1=Graphics3D[{AbsoluteThickness[15],RG BColor[1,0,1], Line[{{5,0,0},{5,0,5.5}}]]; Mesa2=Graphics3D[Cuboid[15.25,14.03,8.53},{2 </pre>	<p>Condiciones iniciales</p> <p>Guardado de las soluciones</p> <p>Bucle para la solución de la cinemática inversa del robot R_2</p> <p>Trayectorias de R_2 (τ_{32})</p> <p>Tiempo de ida 6 seg.</p> <p>Lugar geométrico de la trayectoria (recta)</p> <p>Solución del problema cinemático inverso</p> <p>Normas: $P_0^2 + P_3^2 = 1$, $Q_0^2 + Q_3^2 = 1$</p> <p>$R_0^2 + R_1^2 = 1$</p> <p>Condiciones iniciales</p> <p>Guardado de las soluciones</p> <p>Bucle de graficación de los elementos de apoyo:</p> <p>Mesa de operación M_{o1}</p> <p>Mesa de operación M_{o2}</p> <p>Almacén A_1</p> <p>Base de apoyo del robot R_1</p> <p>Banda B_1</p> <p>Trayectorias de ida y vuelta de los robots R_1 y R_2</p>
--	---

<pre>.75,11.03,10.55}}], Linea1a=Graphics3D[{AbsoluteThickness[7],RGB BColor[0,1,0],Line[{{5.11,12.53,10.55},{5.11,12.5 3.0}}]}; Linea2a=Graphics3D[{AbsoluteThickness[7],RGB BColor[0,0,1],Line[{{12.25,12.53,10.55},{12.25,12 .53,0}}]}; Lt=Graphics3D[{RGBColor[1,0,1],Line[{{0,5,3.5},{ 5,5,3.5}}]};</pre>	
--	--

Programación y simulación del módulo de marcaje incluyendo los condicionantes del código binario de proceso

<pre>j=0, For[i=0,i<=4,i++, p0=Vec1[i][1];p3=Vec1[i][2];q0=Vec1[i][3];q3=Vec1[i][4]; f0=Vec0[i][1];f3=Vec0[i][4];g0=Vec0[i][2]; g1=Vec0[i][5];h0=Vec0[i][3];h1=Vec0[i][6]; If[i==0,Pieza1=Graphics3D[Cuboid[{- 0.75,4.25,2},{0.75,5.75,3.5}], Pieza1=Graphics3D[Point[{0,0,0}]]; Show[Lt,Mesa2,Linea1a,Linea2a,Linea1,Pieza1,Almacén1, MesaM1,MesaM2,MesaM3,A1,B[j++]]=Graphics3D[{Polygon[{{-25,-5,-5},{16,-5,-5},{16,15,-5},{-25,15,-5}}], {PointSize[0.01],Point[{0,0,0}], {Cuboid[5.26,7.5,2.11},{4.76,6,2.61}], {PointSize[0.01],Point[{5,0,5.5}], {RGBColor[0,0,1],Line[{{0,5,5.5},{5,5,5.5}}]}, {RGBColor[0,1,0],Line[{{5,0,5.5},{b11[[2]],b11[[3]],5.5},{r2[[2]],r2[[3]],5.5}}]}, {PointSize[0.01],Point[{10,5,0}], {RGBColor[1,0,1],Line[{{5,5,6},{10,12.53,13.53}}]}, {RGBColor[1,0,0],Line[{{10,5,0},{rppp[[2]],rppp[[3]],r</pre>	<p>Subciclo de ida del robot $R_1(\tau_{12})$</p> <p>Datos de la solución de la cinemática inversa del robot R_1</p> <p>Datos del robot R_2 en la posición "home"</p> <p>Graficación de la pieza de trabajo sobre la posición 1</p> <p>Bucle de graficación de los elementos que componen el módulo de punzonado de T_1 a T_4</p>
--	--

```

ppp[[4]],{rpp[[2]],rpp[[3]],rpp[[4]]},{rp[[2]],rp[[3]],rp[[4]]}
}}}}}.
PlotRange->{{-25,16},{-5,15},{-5,15}},AxesLabel-
>{"x","y","z"},
Axes->True,ViewPoint->{1.300,-2.400,2.000},Ticks-
>None,RenderAll->False,
BoxStyle->Dashing[{0.03,0.03}],AxesStyle-
>Thickness[0.007]]]

```

T/M	R ₁	A _{C1}	R ₂	A _{C2}	R ₃	R ₄	R ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S _{s1}	S _{s2}	S _{B1}
T ₀	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
T ₁	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₂	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₃	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₄	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-T ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

```

For[i=5,i<6,i++,
p0=Vec1[8-i][[1]],p3=Vec1[8-i][[2]];q0=Vec1[8-
i][[3]];q3=Vec1[8-i][[4]];
f0=Vec[0][[1]],f3=Vec[0][[4]];g0=Vec[0][[2]];
g1=Vec[0][[5]];h0=Vec[0][[3]];h1=Vec[0][[6]];
If[i==5,Pieza2=Graphics3D[Cuboid[{4.25,4.25,2},{5.
73,5.73,3.5}]],
Pieza2=Graphics3D[Point[{0,0,0}]]];
Show[Lt,Mesa2,Linea1a,Linea2a,Linea1,Pieza2,Al
macén1,
MesaM1,MesaM2,MesaM3,B1,B[j++]]=Graphics3D[{
{Polygon[{{-25,-5,-5},{16,-5,-5},{16,15,-5},{-25,15,-
5}]}],
{PointSize[0.01],Point[{0,0,0}]},
{Cuboid[{5.26,7.5,2.11},{4.76,6,2.61}]},
{PointSize[0.01],Point[{5,0,5.5}]},
{RGBColor[0,0,1],Line[{{0,5,5.5},{5,5,5.5}]}],
{RGBColor[0,1,0],Line[{{5,0,5.5},{b11[[2]],b11[[3]],5.
5},{r2[[2]],r2[[3]],5.5}]}],
{PointSize[0.01],Point[{10,5,0}]},
{RGBColor[1,0,1],Line[{{5,5,6},{10,12.53,13.53}]}]}.

```

Subciclo de vuelta del robot $R_1(\tau_{21})$ en T_5

Datos de la solución de la cinemática inversa del robot R_1

Datos del robot R_2 en la posición "home"

Graficación de la pieza de trabajo sobre la posición 2

Salida del actuador $A_{C1}(\tau_{2ab})$ operación de puzonado

Bucle de graficación de los elementos que componen el módulo de punzonado en T_5

```
{RGBColor[1,0,0],Line[{{10,5,0},{rppp[[2]],rppp[[3]],rppp[[4]]},{rpp[[2]],rpp[[3]],rpp[[4]]},{rp[[2]],rp[[3]],rp[[4]]}}]}}].
PlotRange->{{-25,16},{-5,15},{-5,15}},AxesLabel->{"x","y","z"},
Axes->True,ViewPoint->{1.300,-2.400,2.000},Ticks->None,RenderAll->False,
BoxStyle->Dashing[{0.03,0.03}],AxesStyle->Thickness[0.007]
}];
```

T_5	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-------	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

```
For[i=6,i<=7,i++,
p0=Vec1[8-i][[1]];p3=Vec1[8-i][[2]];q0=Vec1[8-i][[3]];q3=Vec1[8-i][[4]];
f0=Vec[i-5][[1]];f3=Vec[i-5][[4]];g0=Vec[i-5][[2]];
g1=Vec[i-5][[5]];h0=Vec[i-5][[3]];h1=Vec[i-5][[6]];
Show[Lt,Mesa2,Linea1a,Linea2a,Linea1,Almacén1,
MesaM1,MesaM2,MesaM3,A1,B[j++]]=Graphics3D[
{Polygon[{{-25,-5,-5},{16,-5,-5},{16,15,-5},{-25,15,-5}}]}}].
{PointSize[0.01],Point[{0,0,0}]},
{Cuboid[{5,26,7,5,2.11},{4,76,6,2.61}]},
{PointSize[0.01],Point[{5,0,5.5}]},
{RGBColor[0,0,1],Line[{{0,5,5.5},{5,5,5.5}}]},
{RGBColor[0,1,0],Line[{{5,0,5.5},{b11[[2]],b11[[3]],5.5},{r2[[2]],r2[[3]],5.5}]},
{PointSize[0.01],Point[{10,5,0}]},
{RGBColor[1,0,1],Line[{{5,5,6},{10,12.53,13.53}}]},
{RGBColor[1,0,0],Line[{{10,5,0},{rppp[[2]],rppp[[3]],rppp[[4]]},{rpp[[2]],rpp[[3]],rpp[[4]]},{rp[[2]],rp[[3]],rp[[4]]}}]}}].
PlotRange->{{-25,16},{-5,15},{-5,15}},AxesLabel->{"x","y","z"},
Axes->True,ViewPoint->{1.300,-2.400,2.000},Ticks->None,RenderAll->False,
```

Subciclo de vuelta del robot R_1 (τ_{21}) en T_5 a T_8
 Datos de la solución de la cinemática inversa del robot R_1
 Subciclo de ida del robot R_2 (τ_{23}) en T_6 a T_8
 Vuelta del actuador Ac_1 (τ_{2ba})
 Bucle de graficación de los elementos que componen el módulo de punzonado de T_6 a T_8

```
BoxStyle->Dashing[{0.03,0.03}],AxesStyle->Thickness[0.007]
]];

```

T_6	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
T_7	-1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_8	-1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

```
For[i=8,i<=15,i++,
p0=Vec1[0][[1]];p3=Vec1[0][[2]];q0=Vec1[0][[3]];q3=
Vec1[0][[4]];
f0=Vec[i-5][[1]];f3=Vec[i-5][[4]];g0=Vec[i-5][[2]];
g1=Vec[i-5][[5]];h0=Vec[i-5][[3]];h1=Vec[i-5][[6]];
Show[Lt,Mesa2,Linea1a,Linea2a,Linea1,Almacén1,
MesaM1,
MesaM2,MesaM3,A1,B[j++]]=Graphics3D[{
{Polygon[{{-25,-5,-5},{16,-5,-5},{16,15,-5},{-25,15,-
5}}]},
{PointSize[0.01],Point{{0,0,0}}},
{Cuboid{{5.26,7.5,2.11},{4.76,6,2.61}}},
{PointSize[0.01],Point{{5,0,5.5}}},
{RGBColor[0,0,1],Line[{{0,5,5.5},{5,5,5.5}}]},
{RGBColor[0,1,0],Line[{{5,0,5.5},{b11[[2]],b11[[3]],5.
5},{r2[[2]],r2[[3]],5.5}}]},
{PointSize[0.01],Point{{10,5,0}}},
{RGBColor[1,0,1],Line[{{5,5,6},{10,12.53,13.53}}]},
{RGBColor[1,0,0],Line[{{10,5,0},{rppp[[2]],rppp[[3]],r
ppp[[4]]},{rpp[[2]],rpp[[3]],rpp[[4]]},{rp[[2]],rp[[3]],rp[[4]
}}]}]}.
PlotRange->{{-25,16},{-5,15},{-5,15}},AxesLabel-
->{"x","y","z"},
Axes->True,ViewPoint->{1.300,-2.400,2.000},Ticks-
->None,RenderAll->False,
BoxStyle->Dashing[{0.03,0.03}],AxesStyle-
->Thickness[0.007]
}];

```

Robot R_1 en "home"

Subciclo de ida del robot R_2 (τ_{23}) en T_9 a T_{16}

Bucle de graficación de los elementos que componen el módulo de punzonado de T_9 a T_{16}

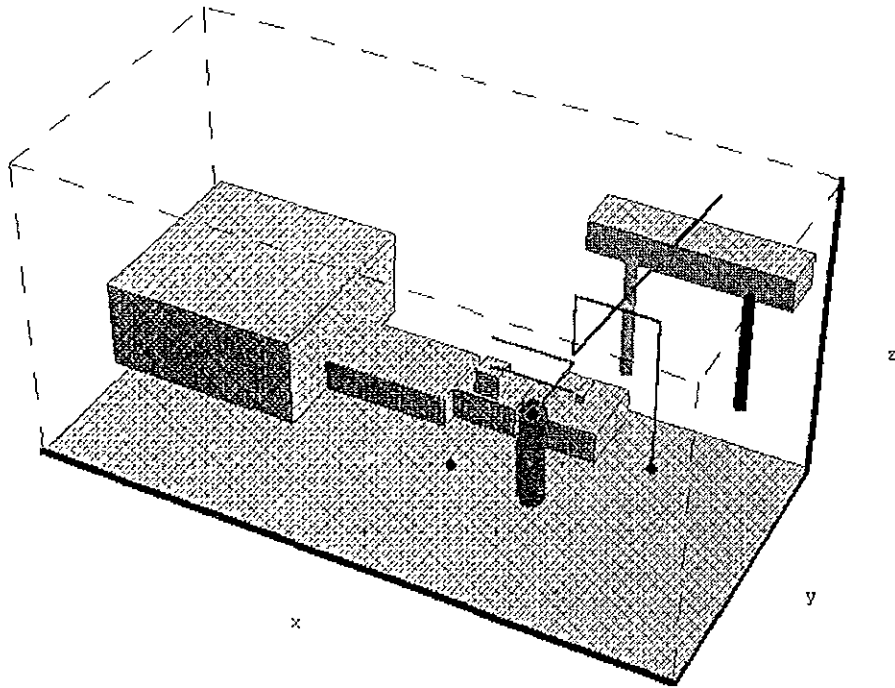
T_9	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{10}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{11}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{12}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{13}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{14}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{15}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{16}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

<pre> For[i=5,i>=0,i--, p0=Vec1[0][[1]];p3=Vec1[0][[2]];q0=Vec1[0][[3]];q3= Vec1[0][[4]]; f0=Bec[i][[1]];f3=Bec[i][[4]];g0=Bec[i][[2]]; g1=Bec[i][[5]];h0=Bec[i][[3]];h1=Bec[i][[6]]; Show[Lt,Mesa2,Linea1a,Linea2a,Linea1,Almacén1, MesaM1, MesaM2,MesaM3,A1,B[++] =Graphics3D[{Polygon[{{-25,-5,-5},{16,-5,-5},{16,15,-5},{-25,15,- 5}}]}, {PointSize[0.01],Point{{0,0,0}}}, {Cuboid{{5,26,7.5,2,11},{4.76,6,2.61}}}, {PointSize[0.01],Point{{5,0,5.5}}}, {RGBColor[0,0,1],Line[{{0,5,5.5},{5,5,5.5}}]}, {RGBColor[0,1,0],Line[{{5,0,5.5},{b11[[2]],b11[[3]],5. 5},{r2[[2]],r2[[3]],5.5}}]}, {PointSize[0.01],Point{{10,5,0}}}, {RGBColor[1,0,1],Line[{{5,5,6},{10,12.53,13.53}}]}, {RGBColor[1,0,0],Line[{{10,5,0},{rppp[[2]],rppp[[3]],r ppp[[4]]}}, {rpp[[2]],rpp[[3]],rpp[[4]]},{rp[[2]],rp[[3]],rp[[4]]}}]}, PlotRange->{{-25,16},{-5,15},{-5,15}},AxesLabel- ->{"x","y","z"}, Axes->True,ViewPoint->{1,300,-2.400,2.000},Ticks- ->None,RenderAll->False, BoxStyle->Dashing[{0.03,0.03}],AxesStyle- ->Thickness[0.007]]], </pre>	<p>Robot R_1 en "home"</p> <p>Subciclo de regreso del robot R_2 (τ_{32}) en T_{17} a T_{22}</p> <p>Bucle de graficación de los elementos que componen el módulo de punzonado de T_{17} a T_{22}</p>
--	---

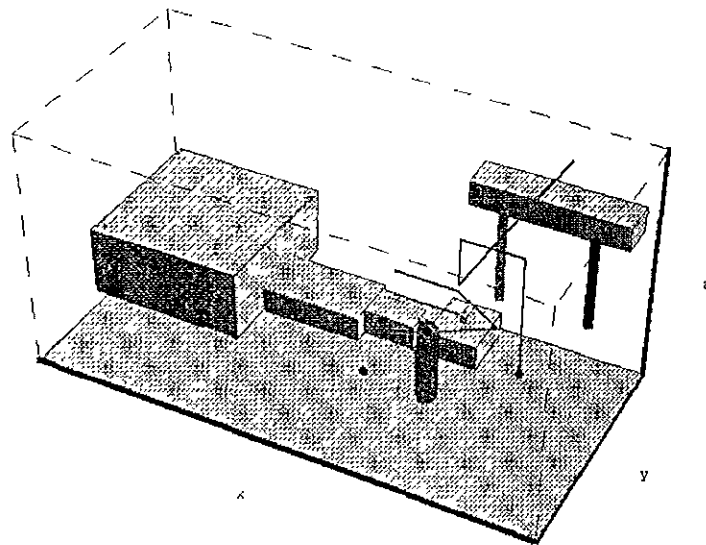
T_{17}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{18}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

T_{19}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{20}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{21}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{22}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_{22}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1

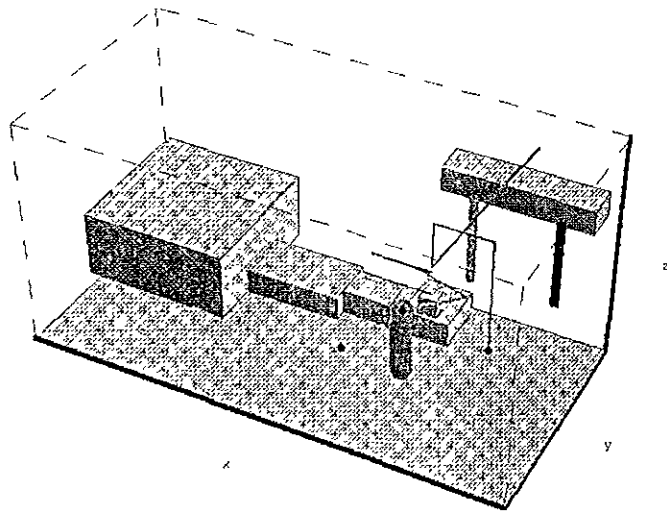
Salida gráficas del módulo de marcaje



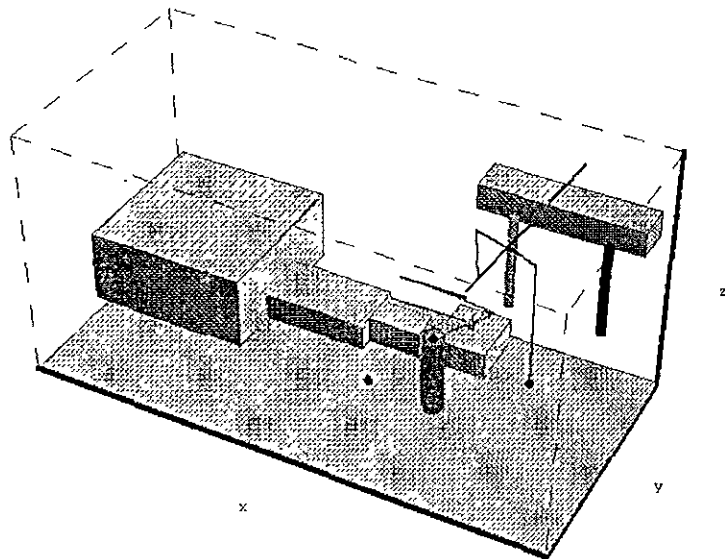
T/M	R_1	A_{C1}	R_2	A_{C2}	R_3	R_4	R_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_{S1}	S_{S2}	S_{B1}
T_0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0



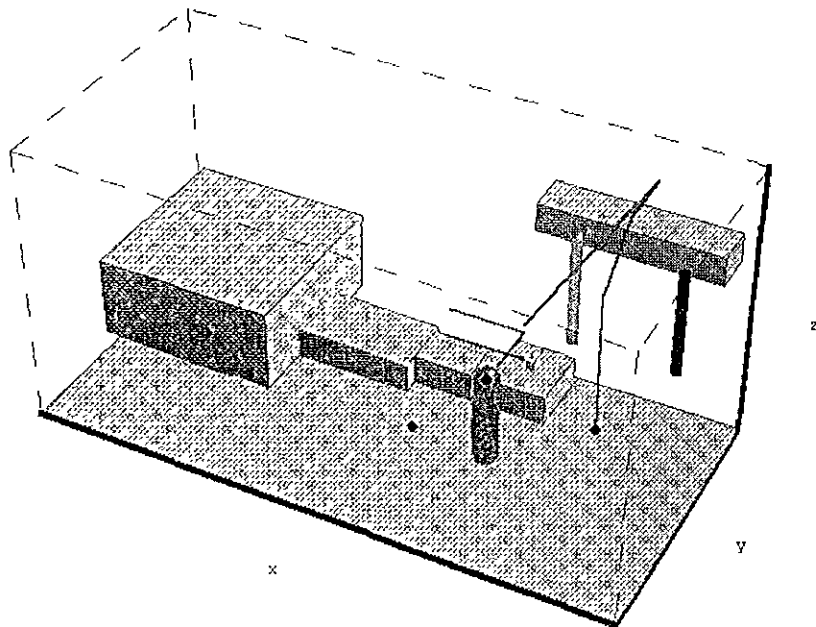
T_4	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0



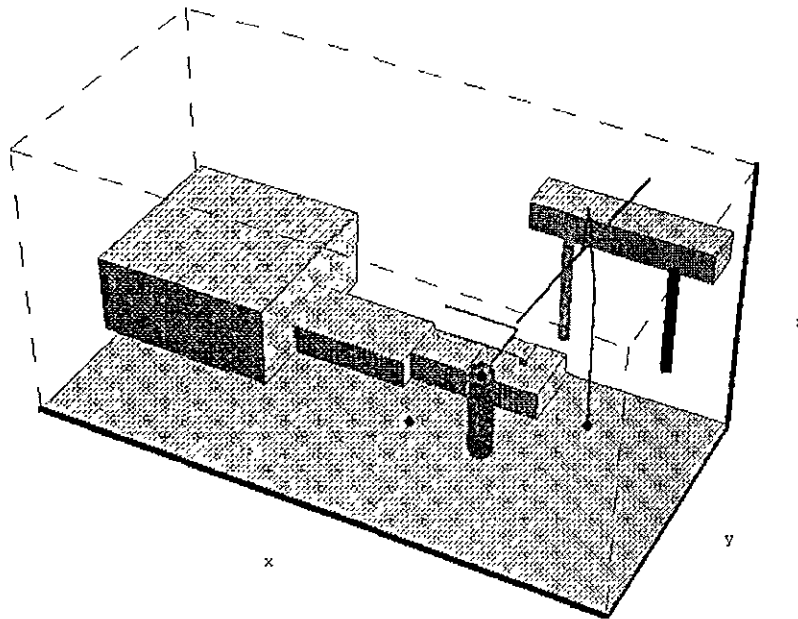
T_5	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_6	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0



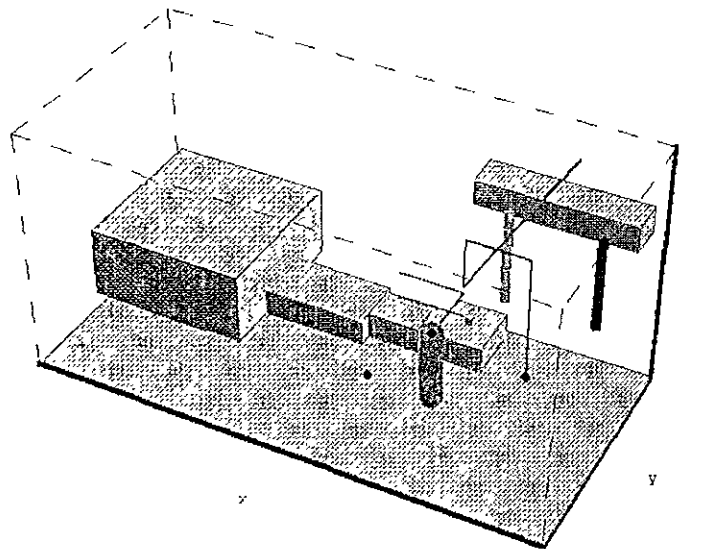
$-T_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
T_7	-1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_8	-1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



T_{16}	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

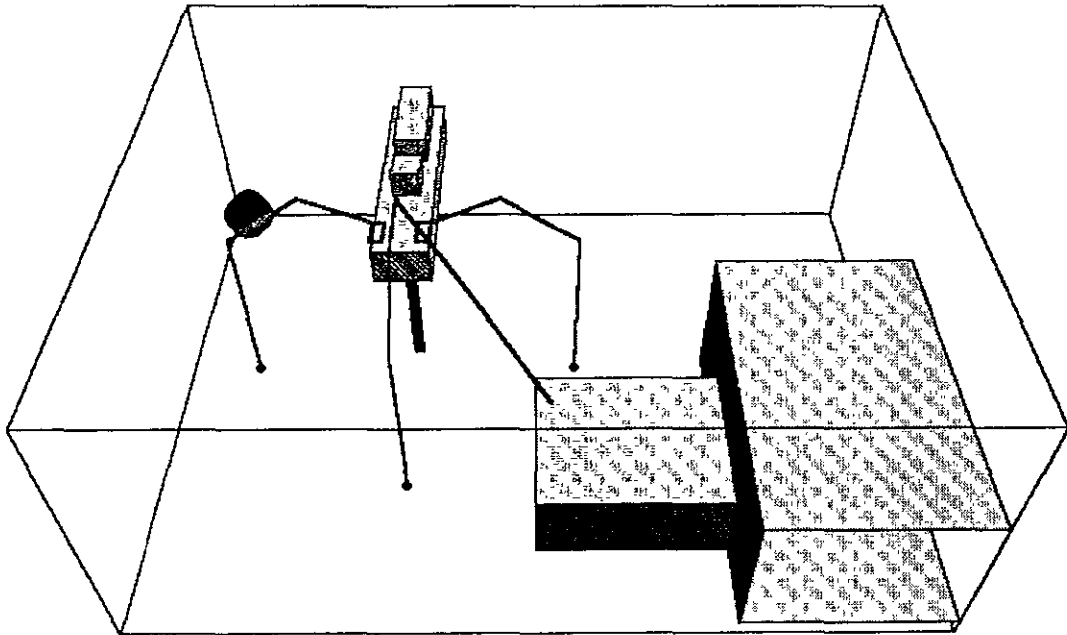


$-T_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T_{17}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{18}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_{19}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

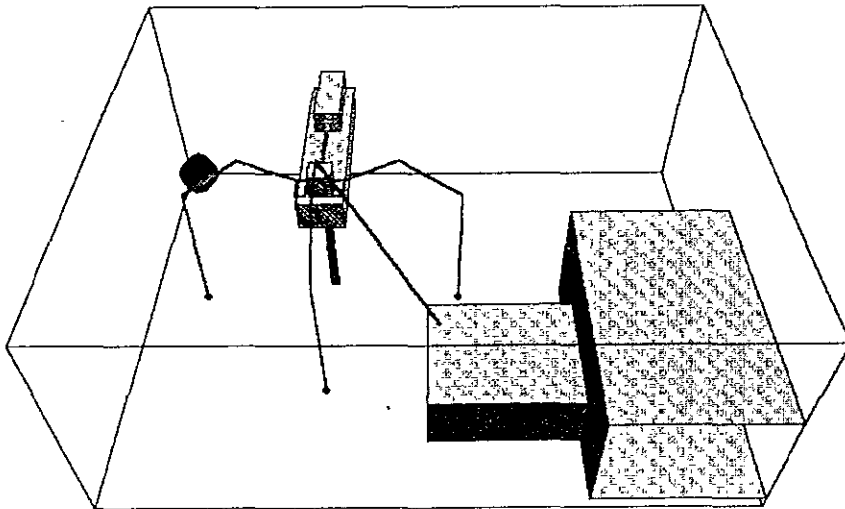


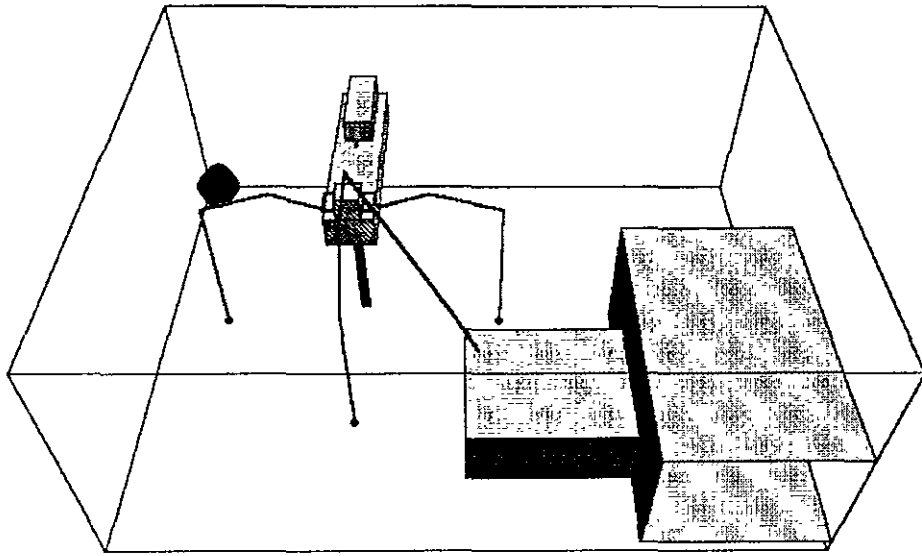
T_{22}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_{22}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1

4.8.3. Salidas gráficas del Módulo de Soldadura-Enfriamiento

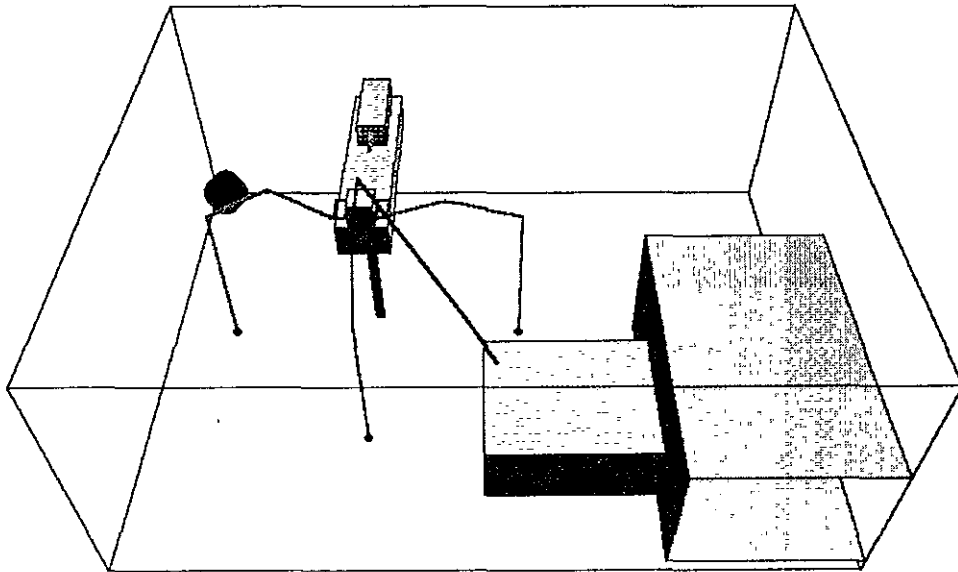


T/M	R_1	A_{C1}	R_2	A_{C2}	R_3	R_4	R_5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_{S1}	S_{S2}	S_{B1}
$-T_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
T_{17}	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

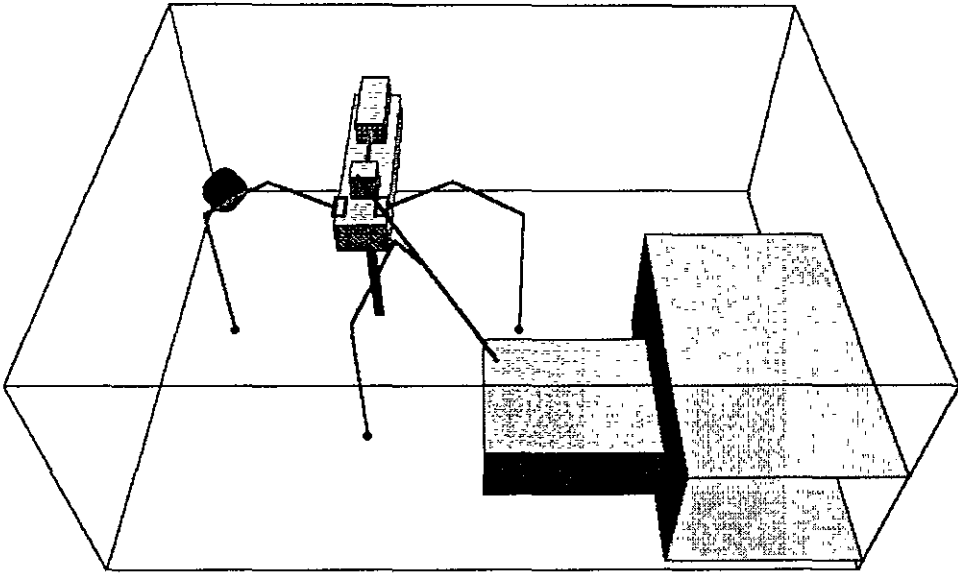




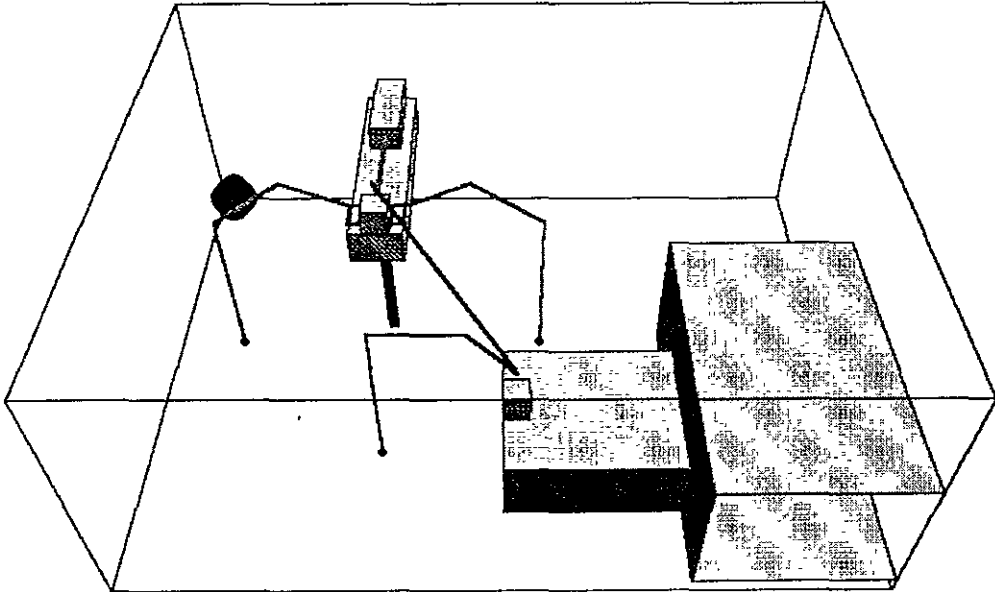
T_{37}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
----------	---	---	----	---	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---



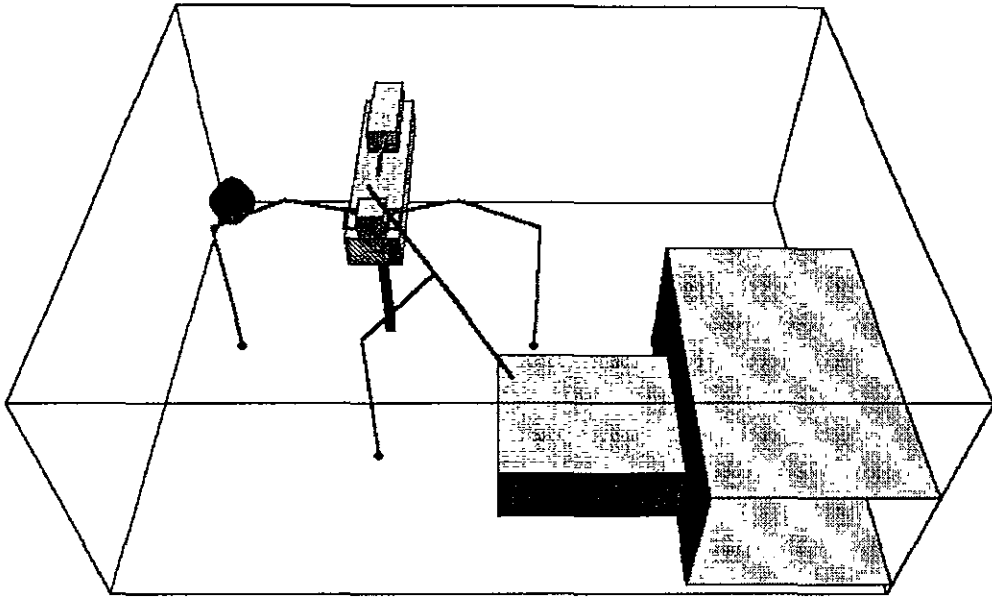
T_{38}	0	0	+1	0	+1	+1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$-T_{38}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0



T_{40}	0	0	-1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
----------	---	---	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---



T_{44}	0	0	-1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-T_{44}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1



T_{46}	+1	0	0	-1	+1	+1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1
----------	----	---	---	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---

5 . CONCLUSIONES

En este trabajo se ha utilizado un marco metodológico relacionado con la Planeación Táctica para construir un modelo idealizado de una línea de producción secuencial. También se ha incluido un estudio preliminar asociado con la Planeación Operacional con el cual se generó el sistema de control de procesos, así como la simulación computacional de los movimientos de los elementos de trabajo. Las conclusiones de esta tesis se exponen en los puntos siguientes:

- 1 La metodología empleada para generar el modelo de manufactura resultó ser más eficiente y sistemática que las presentadas en [1] y [3].
- 2 El concepto de Ecuación de Forma permitió generar un modelo abstracto de las transformaciones de materias primas en productos terminados de una manera clara y concisa con la mínima información de manufactura.
- 3 Los modelos de trayectoria integrados con los modelos cinemáticos de los elementos de trabajo pueden ser utilizados para simular modelos reales de manufactura.
- 4 El uso de álgebra de Boole permitió generar las Ecuaciones de Forma y las Ecuaciones de Estado asociadas al un PLC de una manera clara y sistemática

Futuros trabajos relacionados con esta investigación son:

- Modelado cinemático y dinámico de celdas de producción
- Estudio formal de la Planeación Estratégica
- Análisis global de la Planeación de Procesos

- [1] Spyros g. Tzafestas. "Computer- Assisted Management and Control of Manufacturing System". Springer-Verlang. Berlin 1997.
- [2] Huang, Yean-Jenq. "integrated computer aided extrusion process simulation, die design/manufacturing/management planning system". Light Metal Age. Vol. 56. Number 5-6. Junio 1998. pp. 76-81.
- [3] Allan Carrie. Simulation of manufacturing system John Wiley & Sons Ltd Great Britain 1988.
- [4] Alan C. Lin, Ching-Lung Wei. "Automated selection of cutting tools based on solid models". Journal of Materials Processing Technology. Vol.72. 1997. pp. 317-329.
- [5] Heflin, Deborah L., Herrell, Charles R. "Simulation modeling and optimization using ProModel". Winter Simulation Conference Proceedings. Vol. 1 . 1998. IEEE. Piscataway, NJ USA, 98CB36274. pp. 191-197.
- [6] Mukhopadhyay, S. K., Singh, M.K. Srivastava, R. "FMS machine loading: A simulated annealing aproach ". International Journal of Production Research. Vol. 36 . Number 6. Jun 1998. pp. 1539-1547.
- [7] Jiménez, E., Reyes,L. ." Primera metodología para la construcción de simuladores de sistemas de manufactura". Reporte de investigación doctoral N_o 3. DEPMI UNAM. Febrero del 2000
- [8] Jiménez, E., Reyes. "Modelos de manufactura, análisis, desarrollo y simulación". Próximo a salir. DEPMI UNAM. Mayo del 2000
- [9] Jiménez, E., Reyes.L. "Las ecuaciones de forma. Reporte de investigación No. 46. (M01 DEPMI. 04699). UNAM. México, 1999. (Inédito).

- [10] Jiménez, E. Reyes.L. "Parametrización de la imagen virtual de sólidos regularizados". Reporte de investigación No. 44. (M01 DEPMI 04499). UNAM. México, 1999. (Inédito).
- [11] Jiménez, E, Reyes. L. "Las Ecuaciones de Volúmenes Modificadas". Reporte de investigación No. 45. (M01 DEPMI 04500). UNAM. México, 2000. (Inédito).
- [12] Ficha Técnica del Robot Industrial IRB 2400/16 ABB. Y IRB AWG. ABB Sistemas S.A. Suiza 1998.
- [13] Flores, I. "Apuntes de Robótica" Facultad de Ingeniería UNAM. Febrero 1998
- [14] Flores, I. "1^{er} Reporte de investigación Doctoral" Facultad de Ingeniería UNAM. Febrero 1997
- [15] Moscosa,Santillán M. Bondoux, C. Porte. "Development of a hybrid PLC-based control system applied to a monitored fermentation process". Laboratory Robotics & Automation. VII n4 1999 , p. 197-206.
- [16] F. Gécseg and I. Peák. "Algebraic Theory of Automata". Akadémiai kiado. Budapest, 1972.
- [17] Jiménez, E, Reyes.L. " El código binario de procesos". Reporte de investigación No. 70. (M01 DEPMI 07000). UNAM. México, 2000. (Inédito).
- [18] Jiménez L. Reyes I. Martínez M. Roberto. " El sistema CHEVOTRONIC IV". Automatización Global de una Fábrica Futurista de Ensamble y Soldadura. Parte 2: El Módulo de Soldadura. Reporte de investigación No 9 DEPMI-UNAM. México D.F., 1997.
- [19] Stephen Wolfram. "Mathematica , A system For Doing Mathematics by Computer". Addison – Weley,. Publishing Company, Inc. USA. 1990.
- [20] Reyes L. Quaternions: Une Representation Parametrique Systematique Des Rotations Finies. Partie 1: Le Cadre Theorique. Rapport de Recherche INRIA Rocquencourt, France 1990.
- [21] Jiménez, E. "Simulación de un proceso de producción con obstáculos en la línea de producción". Tesis de Grado de Maestría. DEPMI UNAM 1998

Technical specifications

Design: VMC II—made in Sweden by: Westerdals Media Truck AB Västerås, 1989

ROBOT SYSTEM		
Performance	IRB 1400AWI	IRB 2400AWI/ IRB 240LAWI
Handling capacity	5 kg	10 kg/7 kg
Positional repeatability	±0.08 mm	±0.1 mm/±0.1 mm
Axis movements		
Working Range		
Axis 1, C Rotation	340°	360°/360°
Axis 2, B Arm	140°	210°/200°
Axis 3, A Arm	135°	120°/125°
Axis 4, D Wrist	300°	400°/370°
Axis 5, E Bend	230°	240°/240°
Axis 6, P Turn	600°	600°
Max. Speed		
Axis 1, C Rotation	120°/s	115°/s/135°/s
Axis 2, B Arm	120°/s	115°/s/135°/s
Axis 3, A Arm	120°/s	115°/s/135°/s
Axis 4, D Wrist	280°/s	280°/s/310°/s
Axis 5, E Bend	280°/s	300°/s/310°/s
Axis 6, P Turn	280°/s	300°/s/310°/s
Physical		
Dimensions		
Robot base, mm	620x450	755x600/720x560
Cabinet, H x W x D	1700 x 800 x 530 mm	
Weight		
Robot Unit	245 kg	370 kg/400 kg
Cabinet		
400V	350 kg	350 kg
Other voltage	380 kg	380 kg

Safety equipment		
IRB 1400AWI	IRB 2400AWI/ IRB 240LAWI	
Integrated components fulfilling both national and international safety regulations		

WELDING EQUIPMENT	
Physical	
Power source mounting	In separate cabinet below robot controller
Environment	
Cooling of power source	Forced air cooling
Degree of protection, cabinet	IP 21
Ambient temperature	5–40°C
Relative humidity	Max.95%
Noise level, power source	Less than 70 dB (A)
Emission	EMC shielded
Electrical connection	
Supply voltage	200–600 V ±10%, 50/60 Hz
Power consumption at welding	Max 16 kW
Power consumption at idling	0.3 kW
Power factor	0.88

Power source	
Permissible load at 60% duty cycle	400 A/34 V
Permissible load at 100% duty cycle	315 A/30 V
Open circuit voltage	65 V
Communication with robot controller	CAN-bus
Process	
Type	Gas Metal Arc Welding
Process methods	MIG/MAG and Pulsed Arc
Weld data setting	Synergic/Manual
Number of pre-programmed gas and wire combinations	90 pcs
Memory size for welding parameters	98 schedules
Example of some process functions	Material heating and cooling Crater filling Slope at crater filling Final pinch off pulse Restart Restrike Tuning of parameters during welding
Monitoring	
Operator interface	Programming unit
Type of communication	Plain language
Measured values	Welding speed (velocity) Welding voltage Welding current
Diagnostics	Total 38 types for the power source, selective with explanations
Communication with robot controller	CAN-bus
Wire feed system	
Wire feed speed	3–30 m/min
Number of driven rollers	4
Speed regulator	With tachometer
Communication with power source	CAN-bus
Torch set, wire size	
PKI 500	0.8–1.6 mm
PSF 315R	0.8–1.2 mm
Examples of peripherals	
Work piece positioners	The IRBP-series, type C, L, R and K
Torch cleaner	
Cleaning	inside and outside of gas cowl
Bull's eye	
Tool calibration centering device	
Smartac weld joint detection	
Search speed	20–50 mm/s
Accuracy	±0.6 mm

ABB Flexible Automation is certified in accordance with ISO 9001
In accordance with ABB policy to make continual improvements,
design and specifications are subject to change without notice
and without any obligation on the part of the manufacturer
RAPIDARC™ is a registered trademark of AGA AB



Flexible Automation Centers
 Argentina ABB Brown Boven S.A. 017654104 Australia ABB Industrial Pty Ltd, Lilydale 0397357222 Austria ABB Industrie GmbH Wien 01601093894 Benelux ASEA Brown Boven N.V. Zaventem 027165311 Brazil ASEA Brown Boven Ltda Osasco-SP 0117049111 Canada ASEA Brown Boven Inc Burlington 09056810565 China ABB Flexible Automation Ltd Shanghai 02164855648 Denmark ABB Energi & Industri A/S Odense 066147008 Finland ABB Signal OY Helsinki 0050691 France ABB Flexible Automation St Ouen L'Aumône 0134402525 Preciflex Systems Beauchamp 013304700 Germany ABB Flexible Automation GmbH Dietzenbach 060748390 Friedberg-Hessen 06031850 Langenfeld 0217379010 India ASEA Brown Boveri Ltd Bangalore 0808395181 Italy ABB Flexible Automation SpA Corsico MI 024502275 Japan ABB Gadelius Industry KK Kobe 0789914505 Korea ASEA Brown Boveri Ltd Seoul 025283070 Mexico ABB Sistemas Mexico 05381400 Norway ABB Flexible Automation AS Bryne 051489000 Portugal ABB Electrica Amadora 014169200 Spain ABB Flexible Automation SA Sant Quirze del Valls 037288700 Sweden ABB Flexible Automation AB Västerås 021344500 ABB I-R Robotized Waterjet AB Ronneby 045734500 ABB Welding Systems AB Laxå 058482000 ABB Robotics Products AB Västerås 021314222 Switzerland ABB Flexible Automation AG Zurich 014356555 Taiwan Asea Brown Boveri Ltd, Linkou Hsieng 026015025 Thailand ABB Industry Ltd, Bangkok 022497272 United Kingdom ABB Flexible Automation Ltd Milton Keynes 01908350300 USA ABB Flexible Automation Inc New Berlin 04147853400 Auburn Hills 08103919000 Fort Collins 99702257602

501 043-902

Cilindros de simple efecto en diámetros de 2,5 hasta 100 mm

Cilindros de carrera estandar y especiales

Eje	Tipo	Ancho Eje mm	Presión de trabajo MPa	Fuerza de empuje kg	Fuerza de tracción kg	Aco- plado mm	Rosca del vástago	Carrera normales mm											Carrera especiales mm							
								2	4	5	10	20	25	30	40	50	70	80		100						
2.5	EG	7	17	0.6	PK-2	M2.5x0.45																				
4	EG	7	6	1.5	PK-2	M2x0.4																				
	EG	7	14	2.0	PK-3	M3x0.5																				
6	EG	8	12	1.6	M5																					de 1 a 25
8	AV AVL C. Corta	8	26	2	M5																					
12	AV AVL C. Corta	8	58	3	M5																					
	EG	8	48	6	G 1/2																					de 1 a 80
	EFK	8	50	7	PK-4	M6																				
	EFKL	8	50	7	PK-4	M6																				
16	EG	8	80	15	G 1/2	M8																				de 1 a 80
	EFK	8	90	7	PK-4	M6																				
	EFKL	8	90	7	PK-4	M6																				
20	AV AVL C. Corta	8	170	6	G 1/2	M5 interior																				
	EFK	8	150	13.5	PK-4	M8																				
	EFKL	8	150	13.5	PK-4	M8																				
25	EV	6	200	-	M5																					
	AG	8	220	13	G 1/2																					
	AH	8	220	13	G 1/2																					
	AV	8	220	13	G 1/2																					
	EG	8	225	16	G 1/2	M10																				de 1 a 80
	EGS	8	225	18.5	G 1/2	M10																				de 1 a 80
32	AV AVL C. Corta	8	440	17	G 1/2	M6 interior																				
35	EV	6	350	-	M5																					
	AV de membrana	8	420	-	G 1/2																					
	AG	8	480	27	G 1/2																					
	AH	8	480	27	G 1/2																					
	AV	8	480	27	G 1/2																					
	EC	12	430	62	G 1/2	M10																				de 1 a 70
50	EV	6	600	-	M5																					
	AV AVL C. Corta	8	1080	35	G 1/2	M8 interior																				
	AG	8	1020	27	G 1/2																					
	AH	8	1020	27	G 1/2																					
	AV	8	1020	27	G 1/2																					
	EC	12	1030	62	G 1/2	M10																				de 1 a 70
60	EV	6	1080	-	M5																					
	AV de membrana	8	850	-	G 1/2																					
63	AV AVL C. Corta	8	1720	42	G 1/2	M8 interior																				
70	EV	6	1550	-	M5																					
	AG	8	1990	50	G 1/2																					
	AH	8	1990	50	G 1/2																					
	AV	8	1990	50	G 1/2																					
	EC	12	2050	96	G 1/2	M12																				de 1 a 70
80	AVL	8	2870	84.5	G 1/2	M10																				
	AVL	8	4420	140	G 1/2	M12																				
100	AG	8	4050	130	G 1/2																					
	AH	8	4050	130	G 1/2																					
	AV	8	4050	130	G 1/2																					
	EC	12	4080	162	G 1/2	M16																				de 1 a 70

Carreteras estandar suministrables

N = M20 x 1

10 N = 1 Programa Lanza