

01173
2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

"PLANEACION OPERACIONAL DE UNA
CELDA DE MANUFACTURA DIDACTICA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA MECANICA
P R E S E N T A :
ING. DANIEL ALFONSO GARCIA TORRES

ASESOR: M.I. EUSEBIO JIMENEZ LOPEZ
COASESOR: DR. LUIS REYES AVILA

CIUDAD UNIVERSITARIA,

2003.

TESIS CON
FALDA DE ORIGEN

A



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.

Agradecimientos

A Dios, por permitirme llegar a ver concluida esta meta.

A mi madre, por su apoyo y comprensión durante todos estos años.

A la memoria de mi padre.

A mis hermanas, por su apoyo incondicional.

Al M.I. Eusebio Jiménez López, por su apoyo y asesoría que hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

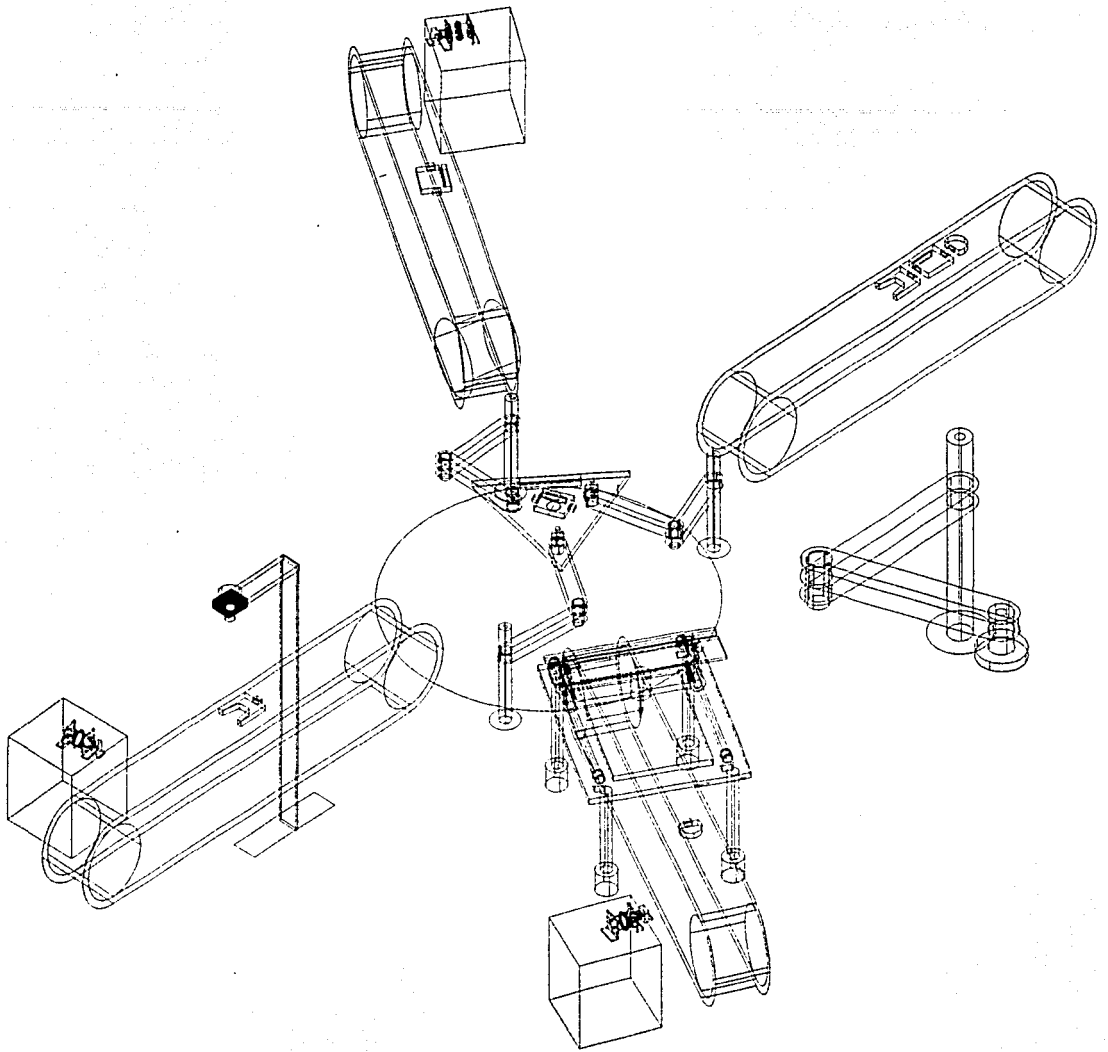
A la UNAM por ser mi Alma Mater y por permitirme formarme en sus aulas.

Al CONACYT, por el apoyo recibido para realizar mis estudios de maestría.

A mis profesores y compañeros, por compartir sus conocimientos y experiencias.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B

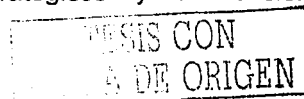


TRIPS CON
ORIGEN

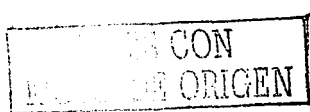


Índice

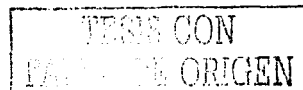
Prólogo	IV
Resumen	VI
Objetivos	VII
Introducción	VIII
Capítulo 1 Definición del problema y sus restricciones	1
1.1 Definición del caso de estudio	1
1.2 Restricciones del problema	4
1.3 Formulación del problema	6
1.4 Distribución de planta y descripción de los elementos de trabajo.	7
1.5 Crónica de flujo de operaciones	11
Capítulo 2 Algunas consideraciones sobre las trayectorias de operación	14
2.1 Consideraciones sobre los lugares geométricos operativos	14
2.2 Tiempos de proceso	21
2.3 Caracterización de ciclos operativos	23
Capítulo 3 Selección y distribución de elementos de sensado	30
3.1 El problema del control de procesos	30
3.2 Elementos de sensado	32
3.3 Caracterización por proceso de sensores	33
3.4 El orden de ida y distribución de sensores principales y secundarios sobre el sistema productivo	35
3.4.1 El orden de ida	35
3.4.2 Caracterización de lugares estratégicos y distribución de sensores	36



3.4.3	Crónica de proceso de ida, caracterización y distribución de sensores de completud	42
3.4.4	Crónica de recorrido de ida	46
Capítulo 4 Modularización y sincronización de operaciones		49
4.1	Modularización	49
4.2	Modularización del sistema productivo	52
4.3	Jerarquización de módulos funcionales para sincronización	54
4.4	Sincronización de procesos	55
4.4.1	Algunas consideraciones sobre la sincronización local	56
4.4.2	Sincronización local del módulo de impresión	57
4.4.3	Relación del vórtice con los tiempos de proceso y sincronización local por tiempos	62
4.4.4	Sincronización local del módulo de montaje	68
4.4.5	Sincronización local del modulo de corte	75
4.4.6	Sincronización global	79
4.4.6.1	Balaceo de la línea de producción y tiempo de ida	79
4.5	Distribución de sensores de sincronización y bandera sobre el sistema	83
Capítulo 5 Condicionales y ecuaciones de estado		85
5.1	El sistema de control	85
5.2	Condicionantes y ecuaciones de estado	88
5.2.1	Condicionantes de la sincronización global	93
5.3	Condicionantes para el sistema productivo	95
5.4	Análisis del condicional ordinario y bicondicional	98
5.5	Análisis de la ecuación de estado y modelos de control	100
5.6	Modelo de control para una máquina bajo diferentes condiciones	100
5.7	Modelos de control para la maquinaria	102



Capítulo 6 El código binario de procesos	108
6.1 El código binario de procesos	108
6.1.1 Matriz tiempo - sensado	109
6.1.2 Matriz tiempo-maquinaria	111
6.2 El código binario de procesos y su primera interpretación	114
6.3 Ventajas de un código binario de procesos y metodología para su construcción	117
6.4 El ciclo de arranque y el ciclo automático	119
6.5 Tiempos de vuelta	122
6.6 Construcción del binario operacional para el sistema productivo	123
6.7 Líneas principales del diagrama escalera	144
Conclusiones	168
Bibliografía	171
Apéndice A: Modelo del producto	175
Apéndice B: Planos de fabricación	182



Prólogo

Este trabajo de tesis tiene el propósito de generar conocimiento escrito para las futuras generaciones de la Maestría en Ingeniería Mecánica, interesadas en la planeación operacional de sistemas productivos.

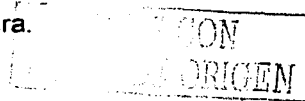
Las celdas de manufactura del tipo didáctico son usadas en las universidades o centros de capacitación para entrenar recursos humanos. Dichas celdas de manufactura no son aprovechadas en su máxima capacidad, pues, en general, se desconoce su uso sistemático y sus modos operacionales.

Gran parte de las celdas de manufactura están incompletas o con daños en su funcionamiento, lo que conlleva a mantenerlas parcialmente funcionando, o en el peor de los casos sin uso.

Es necesario generar celdas de manufactura en nuestro país, para que, por un lado, los costos de adquisición y mantenimiento sean menores y, por otro lado, se enseñe al recurso humano la importancia estratégica de generar tecnología. Asimismo, los estudiantes aprenderán a usar eficientemente las celdas de manufactura y, con esto, podrán aplicar el conocimiento adquirido para el diseño y la planificación de sistemas productivos reales.

En el laboratorio de Mecatrónica localizado en la Sección Mecánica de la DEPMI, UNAM se ha generado un proyecto direccionado al diseño y construcción de celdas de manufactura didácticas. Dicho proyecto está dividido de la siguiente manera:

- 1) Análisis y modelación de la información de un proceso didáctico.
- 2) Análisis y modelación de la distribución de planta.
- 3) Planificación de trayectorias continuas rectilíneas.
- 4) Planeación operacional de la celda de manufactura.



- 5) Modelación cinemática y dinámica de los elementos de trabajo que componen la celda didáctica.
- 6) Control y simulación del sistema.
- 7) Diseño y construcción del prototipo.

Este trabajo de tesis estudia la parte cuatro del proyecto mencionado anteriormente. Se analiza la planeación operacional del sistema productivo usando metodologías sistemáticas concernientes con la sincronización local y global de módulos de producción. El proceso estudiado consiste en el armado de una pieza didáctica; dicho proceso contiene operaciones de corte, impresión y ensamble.

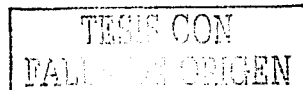
Este trabajo de tesis forma parte de la línea de investigación: simulación de sistemas de manufactura, desarrollada en la Sección Mecánica de la DEPMI, UNAM, y forma parte del acervo bibliográfico-científico del Laboratorio de Mecatrónica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Resumen

En este trabajo de tesis se estudia la planeación operacional de un sistema productivo didáctico. Se aplica el método del vórtice para sincronizar localmente módulos de producción. Para realizar la sincronización global fue usado un código binario de procesos. El sistema de manufactura consta de tres módulos: 1) corte, 2) impresión y 3) ensamble. La pieza estudiada es una figura humana de unisel, en la cual sus partes son manufacturadas en cada módulo de producción. El tiempo de producción unitario utilizado fue de 26 segundos. Fueron distribuidos a lo largo del sistema productivo sensores principales, de completud, sincronización y bandera. Finalmente, del código binario de procesos se interpretaron las líneas de control principales de un PLC..

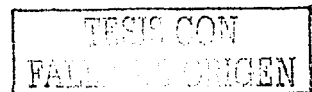
Palabras clave: Celda de manufactura didáctica, sincronización local, sensores, PLC, trayectoria, módulos de producción.



Objetivos

En este trabajo de tesis se pretende cumplir con los siguientes objetivos:

- Analizar las operaciones de manufactura de un sistema productivo totalmente automático.
- Proponer una distribución de sensores sobre las líneas de producción.
- Modularizar el sistema de manufactura.
- Utilizar el método de vórtice perfecto para sincronizar localmente los módulos de producción.
- Controlar, monitorear y sincronizar las operaciones de la maquinaria sobre la base de un código binario de proceso.
- Construir un código binario de procesos para sincronizar globalmente el sistema.
- Interpretar las ecuaciones de estado del código binario de procesos para programar los PLC's.



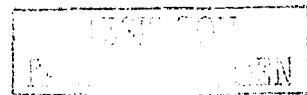
Introducción

Los procesos de manufactura para la producción de piezas o artículos en el mundo han venido evolucionando de tal manera que las relaciones entre los materiales, las máquinas, los procesos, los productos y el hombre con su entorno, han estado evolucionando constantemente, con varias finalidades relacionadas, unas con la productividad, otras con la calidad, otras con la mejora y automatización de los procesos para la obtención de productos cada vez más variados y complejos que satisfagan las especificaciones y deseos de los clientes, con bajos tiempos de entrega, de lotes variables y a precios adecuados.

Las celdas de manufactura son grupos de máquinas en las cuales intervienen robots, bandas, máquinas herramientas etc. las cuales involucran ciclos de secuencias de movimientos direccionados a la ejecución de un trabajo determinado [13].

Las celdas de manufactura integran varios componentes formando una estructura adecuada para la realización de diferentes tareas, permitiendo el procesamiento de los materiales, dependiendo del tipo de producto deseado. La flexibilidad de la celda, significa poder realizar trabajos dentro de una misma familia de piezas con ciertas limitaciones. Los componentes de las celdas están interconectados armónicamente por un sistema lógico de control que se puede reprogramar según el caso.

Todo sistema de manufactura debe maximizar el número de productos elaborados, utilizando eficientemente los recursos disponibles y minimizando el tiempo de producción. Para ello, es necesario tener previamente un plan de ejecución que permita especificar las tareas a realizar por cada parte del sistema, así como los recursos que se utilizarán y la duración de las mismas.



La planificación en una celda de manufactura flexible consiste en encontrar la solución a dos problemas: el ruteo (routing) y la calendarización (scheduling). El problema de "routing" consiste en seleccionar la secuencia de máquinas para manufacturar una pieza, mientras que el de "scheduling" trata de cuantificar el tiempo que estará la pieza en cada parte de la celda.

En [13] se define un plan como una secuencia total o parcialmente ordenada de acciones que sirve para satisfacer un objetivo a partir de una situación inicial dentro de un universo específico.

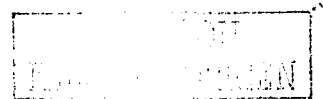
La planeación operacional de sistemas de manufactura es una colección de actividades relacionadas al análisis operativo de la maquinaria de trabajo. La planificación de trayectorias y el diseño del control de procesos forman parte de la planeación operacional [1].

El correcto funcionamiento de la maquinaria instalada sobre líneas de producción se basa principalmente en dos puntos:

- 1) Los rangos operativos propios de cada máquina.
- 2) Los procedimientos de control utilizados para satisfacer el volumen de producción estimado.

Por otro lado, el volumen de producción es una variable que determina los parámetros de operación de la maquinaria, así como los niveles de flexibilidad de los sistemas productivos. El incremento o decremento de los volúmenes de producción implica modificaciones del tipo cinemático y dinámico en cada elemento de trabajo integrado a un sistema productivo.

Para cumplir con un determinado volumen de producción, la maquinaria debe ser sincronizada a través de un sistema de control de operaciones.^{1,2,3} Para ello, se requiere analizar concretamente los tiempos de proceso y los ciclos operativos de cada máquina.

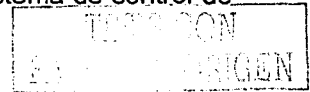


El control de procesos es en realidad un control de señales emitidas por sensores distribuidas sistemáticamente sobre las líneas de producción. Dichas señales son procesadas a través de un dispositivo (un PLC, por ejemplo) y, posteriormente emitidas hacia los elementos de mando de la maquinaria. La sincronización de operaciones es una tarea de gran dificultad, pues para realizarla, es necesario integrar dos actividades de la planeación operacional: 1) La planificación de trayectorias [2] y 2) el control de procesos [3].

Un sistema productivo se dice "sincronizado funcionalmente" si:

- 1) La coordinación control, monitoreo y sincronización de operaciones satisface el tiempo de producción unitaria (TpU).
- 2) Las operaciones de cada máquina satisfacen los rangos operativos admisibles.

Para sincronizar un sistema de manufactura de tal forma que se satisfagan los dos puntos anteriormente señalados, es necesario sistematizar la planeación operacional, principalmente la planeación de trayectorias y el sistema de control de procesos [1]



Cabe mencionar que en diversos trabajos se ha estudiado la sincronización de operaciones. Por ejemplo, en [4] se propone un método basado en las reglas de Petri para diseñar el sistema de control de una celda de manufactura flexible didáctica. En [5,6], se utiliza Inteligencia artificial para planear automáticamente el sistema de control de operaciones de un sistema de manufactura. En [7] se utilizan redes neuronales para diseñar un sistema modular de control de procesos. En [8] se utiliza una computadora personal para imitar el comportamiento de un PLC. En [9] se analizan las ventajas entre un PLC y un DSC (sistema de control distribuido) en el diseño de control de procesos de sistemas de manufactura.

En esta tesis se analiza el sistema de control de un sistema de manufactura didáctico totalmente automático. Se propone un método sistemático para caracterizar y distribuir sensores sobre la línea de producción. La sincronización de

operaciones es realizada usando un método denominado "vórtice perfecto" [29]. La sincronización está basada sobre la caracterización de la máquina de máxima jerarquía integrada a un módulo de producción.

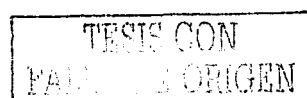
El sistema está compuesto de tres módulos : 1) corte, 2) impresión y 3) montaje. El segundo de estos módulos se denomina "módulo de máxima jerarquía". La sincronización por vórtice perfecto se realiza en términos locales sobre cada módulo [29]. Por otro lado, la sincronización global es analizada tomando en cuenta criterios de balanceo de piezas de trabajo sobre la línea de producción, así como la restricción del TpU. Es propuesto un esquema operativo denominado "código binario de procesos" [1], [3] y [20] en el cual, es posible observar los ciclos operativos de la maquinaria y el funcionamiento total del sistema productivo. Dicho código está compuesto de dos matrices: 1) matriz tiempo-sensado y 2) matriz tiempo maquinaria. La interpretación correcta del código permite caracterizar las ecuaciones de estado asociadas a un PLC. Finalmente, para diseñar el sistema de control de operaciones se utilizará el álgebra de Boole [10] y la teoría algebraica de autómatas [11].

Este trabajo de tesis está compuesto por seis capítulos y un apéndice los cuales se resumen a continuación:

En el capítulo uno se define el caso de estudio y sus restricciones. Se propone una distribución de maquinaria del sistema productivo.

En el capítulo dos son estudiadas, en términos generales, las trayectorias de operación de la maquinaria de trabajo, así como los tiempos de proceso.

En el capítulo tres se caracterizan los elementos de sensado y su distribución a lo largo del recorrido de ida del sistema productivo. Se generan crónicas de procesos con el propósito de distribuir sensores.

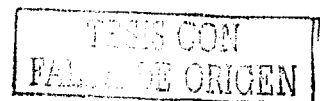


En el capítulo cuatro se modulariza el sistema de manufactura. Es utilizando el método del vórtice perfecto para sincronizar localmente los módulos. Se balancea la línea de producción.

En el capítulo cinco se utiliza al álgebra de Boole para caracterizar ecuaciones de estado. El condicional ordinario, el bicondicional, así como la relación de igualdad son usados para generar los modelos de control de la maquinaria.

En el capítulo seis se propone un marco metodológico para construir sistemáticamente un esquema operativo denominado "código binario de procesos". Las activaciones de sensores y los ciclos de operación de la maquinaria son representados en dicho código.

Finalmente se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo de tesis así como dos apéndices. En el apéndice A se muestra la ecuación de forma asociada al componente motivo de estudio y el apéndice B muestra los planos de fabricación de las partes.



Capítulo 1

Definición del problema y sus restricciones

Introducción. Se presentan en este capítulo las características del sistema de manufactura, el cual será objeto de estudio en este trabajo. Se define el problema por solucionar y sus restricciones. Posteriormente, se propone la distribución de planta compuesta de tres robots didácticos, cuatro actuadores neumáticos, cuatro bandas de las cuales, dos se utilizarán como mesas de operación. Para cada elemento de trabajo se presenta una breve descripción de las operaciones que realiza, así como sus trayectorias de operación. Se propone la distribución de planta asociada con el sistema de manufactura didáctico motivo de estudio. Finalmente, se definen nomenclaturas adecuadas para cada variable en cuestión o elemento de trabajo caracterizado.

1.1 Definición del caso de estudio

"Se requiere diseñar un sistema de control para una celda de manufactura didáctica la cual fabricará el producto mostrado en la figura 1.1. Se dispone de un área de trabajo y almacenes fijos dentro de la cual, se deberán distribuir los elementos de trabajo seleccionados. El sistema de manufactura debe operar en forma totalmente automática con niveles de flexibilidad adecuados."

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

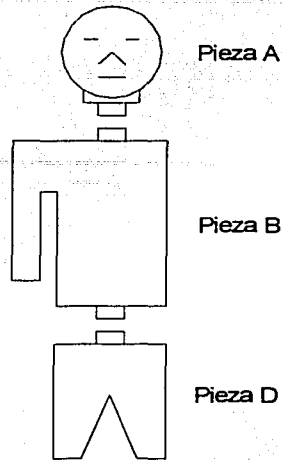


Figura 1.1 Pieza de trabajo

La pieza de trabajo está compuesta de 3 partes según se muestra en la figura 1.1. La descripción de las operaciones principales de manufactura se detalla a continuación (ver apéndice A):

- **Impresión:** Se requiere imprimir o dibujar las facciones de la cara de la pieza A (ver figura 1.1). La materia prima deberá ser preparada para su posterior manufactura, en el almacén de materias primas.
- **Corte:** Sobre la pieza G (ver figura 1.2) se realizará una operación de corte.
- **Ensamble:** Una vez realizadas las operaciones de impresión y corte, la pieza A será ensamblada junto con la pieza B y D, respectivamente.

TRABAJE CON
PALETA DE ORIGEN

La figura 1.2 muestra la descomposición del producto terminado en sus formas primitivas.

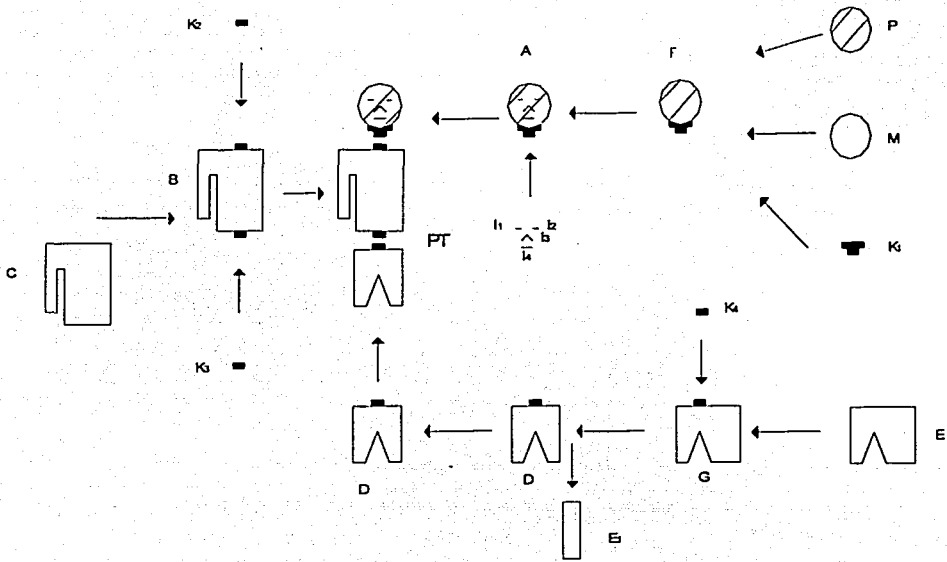


Figura 1.2. Descomposición del producto en estudio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La tabla 1.1 describe los componentes mostrados en la figura 1.2.

Parte	Componente	Descripción
1	C	Cuerpo de nieve seca.
2	K ₂	Imán permanente.
3	K ₃	Imán permanente.
4	B	Unión de (C, K ₂ , K ₃).
5	E	Piernas de nieve seca.
6	K ₄	Imán permanente.
7	G	Unión de (K ₄ , E).
7	E ₁	Material excedente.
8	D	Pieza dimensionada con un corte.
9	P	Papel de impresión.
10	M	Madera.
11	K ₁	Imán permanente.
12	F	Unión de (P, M, K ₃)
13	I ₁ , I ₂ , I ₃ , I ₄	Cuerpo de la tinta.
14	A	Union de (P, M, K ₁ , I ₁ , I ₂ , I ₃ , I ₄).
15	PT	Producto terminado unión de (A, B, D).

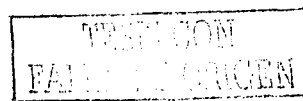
Tabla 1.1. Descripción general de los componentes

1.2 Restricciones del problema

En esta sección se definen las restricciones de control y proceso asociadas con el caso de estudio definido en la sección anterior.

- Restricciones de planta (RP)

1) El área de trabajo (A_T) y la distribución de almacenes es fija y conocida.



- 2) Los almacenes (A_1), (A_2) y (A_3) están relacionados con las materias primas según se muestra en la figura 1.3. El producto terminado (PT) saldrá de A_T por el punto "X" mostrado en la figura 1.3.

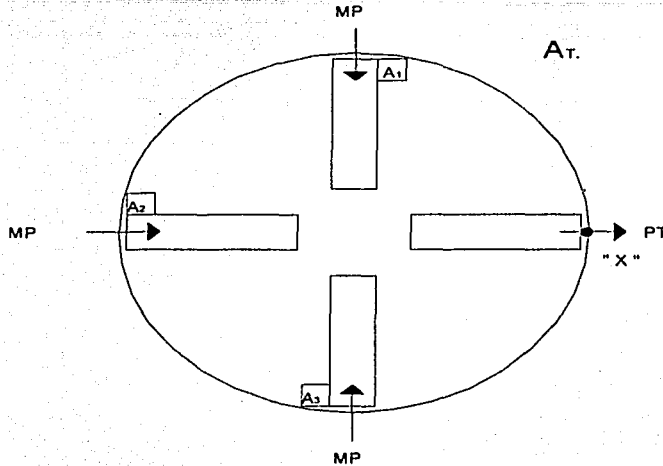
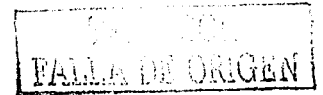


Figura 1.3 Área de trabajo y distribución de almacenes.

- Restricciones de proceso (RP_i)



- 1) El volumen de producción es de 800000 piezas anuales.
- 2) El volumen de producción es "perfecto".
- 3) Las especificaciones (E_s) de la pieza son mostradas en el apéndice A.
- 4) La jornada de trabajo (J_T) es de 16 horas / diarias.
- 5) Se debe evaluar la flexibilidad operativa del sistema.

- Restricciones generales (RG)

- 1) Se considera satisfecho el estimado de costos.
- 2) No se realizan estudios de optimación de procesos.
- 3) La selección de maquinaria y herramientas es propuesta de acuerdo con los robots didácticos y herramientas disponibles.

- Restricciones de control (RC)

- 1) El sistema debe operar en forma totalmente automática.
- 2) Los tiempos de proceso se consideran discretos.
- 3) Sin paros de emergencia.
- 4) Sensores de presencia de materiales a lo largo de la línea de producción.
- 5) El sistema productivo es no serial.

1.3 Formulación del problema

En esta sección es formulado en términos generales el problema a resolver en esta tesis , esto es:

“Dados: V_p , E_s , J_T , A_T , D_P y $PE = \hat{P}E$,

encuentre:

- 1) La planeación táctica.
- 2) La planeación operacional (PO).

tal que:

- 1) $RP = \hat{R}P$
- 2) $RPr = \hat{R}Pr$
- 3) $RG = \hat{R}G$
- 4) $RC = \hat{R}C$

sean satisfechas”

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Aquí, D_p es la distribución de planta, $PE = \hat{P}E$ significa que la planeación estratégica (estimado de costos) es conocida y satisfecha.

Cabe señalar que la planeación táctica es la encargada de establecer la distribución de maquinaria. En esta tesis se estudiará la planeación operacional (PO) direccionada al diseño del sistema de control de operaciones. El problema de la PO será formulado más adelante.

1.4 Distribución de planta y descripción de los elementos de trabajo

En esta sección se presenta la solución parcial al problema definido en la sección anterior, en este caso, se ha resuelto la planeación táctica (PT).

En general la PT consiste en generar un plan detallado de procesos y operaciones con el propósito de utilizarlo para seleccionar la maquinaria de proceso y sus herramientas, así como su distribución. Una metodología apropiada para sistematizar la PT es presentada por [1].

La distribución de planta asociada con el sistema productivo motivo de estudio se muestra en la figura 1.4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

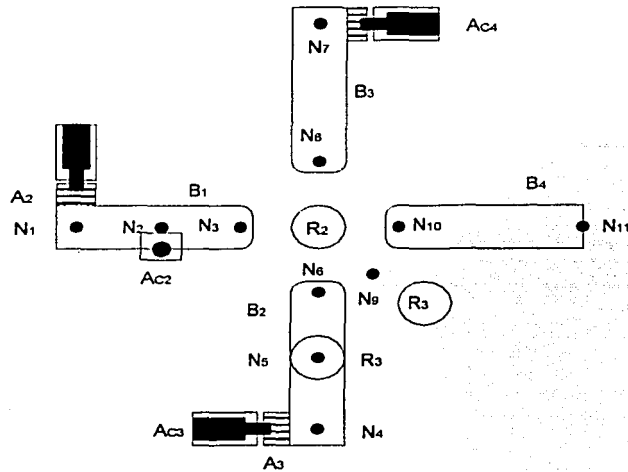


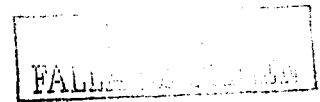
Figura 1.4. Distribución de planta y maquinaria del sistema productivo

La descripción de los elementos de trabajo que componen la línea de producción mostrada en la figura 1.4 es la siguiente:

- **bandas:**

Banda (B₁) : Con este dispositivo se transporta la parte G la cual sale por medio del pistón A_{c1} del almacén A₂, al lugar N₁. Dicha parte es transportada hasta el punto N₂ donde la banda deja de accionarse y, en ese lugar, el actuador A_{c2} realiza un proceso de corte, del cual se obtiene la subparte D al finalizar el proceso, la banda transporta la pieza D hasta N₃ en donde se realizará, posteriormente el ensamble de la pieza.

Banda (B₂): En esta banda se transporta la subparte F la cual saldrá desde el almacén A₃ mediante el pistón A_{c3}, al punto N₄. Una vez localizada la pieza, se acciona la banda B₂ y la pieza es transportada al punto N₅ en el cual la banda

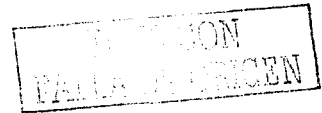


dejará de accionarse y el robot R_2 realizará el proceso de impresión. Una vez finalizado este proceso, se obtendrá la parte A, y la banda B_2 se acciona y transporta la pieza A al punto N_6 , en el cual se detendrá la banda B_2 y será ensamblada posteriormente por el robot R_2 .

Banda (B_3): En este dispositivo se transportará la pieza B, la cual saldrá del almacén A_1 mediante el pistón A_{c4} , hasta el punto N_7 . Una vez localizada la pieza en ese punto, la banda se accionará y transportará la pieza hasta el punto N_8 , en el cual una vez localizada la pieza, la banda se detendrá.

Banda (B_4): Una vez finalizado el proceso de ensamble, el robot R_3 transportará el producto final, hasta el punto N_{10} . Una vez localizada la pieza en ese punto, la banda se accionará y transportará el producto final hasta un almacén de producto terminado.

En el laboratorio de mecatrónica del departamento de mecánica de la DEPMI, UNAM; se desarrolló un prototipo de estas bandas.



- **Robots:**

Robot (R_1). El robot (R_1), es un robot cartesiano didáctico de movimiento en el plano desarrollado en el laboratorio de mecatrónica del departamento de mecánica de la DEPMI, UNAM. "El robot R_1 realiza la operación de impresión de la cara sobre la parte F en el punto N_5 obteniéndose la parte A".

Robot (R_2): Es un robot paralelo experimental tipo RRR de movimiento en el plano. Este robot fue desarrollado en el laboratorio de mecatrónica del departamento de mecánica de la DEPMI, UNAM.

"El robot R_2 realizará el montaje del producto. Una vez que las piezas A, B y D están en posición de ensamble, el robot se accionará desde su home, y llegará al punto N_8 , en donde tomará la pieza B, realizado esto, el robot se accionará y se

transportará al punto N_3 , en este punto realizará el montaje de la pieza B y D, posteriormente, el robot se transportará hasta el punto N_6 en donde realizará el montaje de la última pieza; es decir, la pieza A. Una vez realizado el montaje de las tres piezas, se obtendrá el producto terminado PT. Cuando el producto ha sido terminado, el robot pasa por N_9 que es el home de R_3 , y finalizado esto el robot regresa a home".

Robot (R_3). Robot tipo RR de 2 grados de libertad. Este robot fue desarrollado en el laboratorio de mecatrónica, del departamento de mecánica de la DEPMI, UNAM.

"Una vez que el robot R_2 ha realizado el montaje del producto terminado, el robot R_3 se accionará en el punto N_9 , en donde tomará el producto terminado PT y lo transportará hasta el punto N_{10} de la banda B_4 , una vez localizado el PT en dicho punto, la banda se accionará".

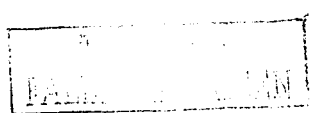
• **Actuadores:**

Actuador neumático (A_{c1}): Este actuador es de simple efecto con herramienta adaptada en la cabeza, este actuador transportará la pieza G desde el almacén A_2 , hasta el punto N_1 sobre la banda B_1 .

Actuador neumático (A_{c2}): Este actuador es de doble efecto, con herramienta de corte adaptada en la cabeza. Dicho actuador realizará una operación de corte sobre la pieza G en el punto N_2 .

Actuador neumático (A_{c3}): El actuador A_{c3} es de simple efecto con herramienta adaptada en la cabeza, este actuador transportará la pieza F desde el almacén A_3 , hasta el punto N_4 sobre la banda B_2 .

Actuador neumático (A_{c4}): El actuador A_{c4} es de simple efecto con herramienta adaptada en la cabeza, este actuador transportará la pieza B desde el almacén A_1 , hasta el punto N_9 sobre la banda B_3 .



1.5 Crónica de flujo de operaciones

En esta sección se realiza una crónica de operaciones, la cual permitirá entender las tareas efectuadas por la maquinaria de trabajo, así como la ubicación de los materiales en la línea de producción. Para lograr una identificación apropiada de dichos materiales se define la siguiente nomenclatura (ver apéndice A):

$$1) \quad B_{PP2} = \left(\left(M \overset{\text{Pr}}{\cup} P \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} K_1 \right) = F. \quad \text{Producto preparado.}$$

$$2) \quad A = B_{SUB4} = \left(\left(\left(\left(\left(M \overset{\text{Pr}}{\cup} P \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} K_1 \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} I_1 \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} I_2 \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} I_3 \right).$$

Subparte generada por el proceso de impresión.

$$3) \quad B_{PP5} = B = \left(\left(C \overset{\text{Pr}}{\cup} K_2 \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} K_3 \right). \quad \text{Producto preparado.}$$

$$4) \quad G = B_{PP3} = E \overset{\text{Pr}}{\cup} K_4. \quad \text{Producto preparado.}$$

$$5) \quad D = B_{SUB5} = \left(\left(E \overset{\text{Pr}}{\cup} K_4 \right)^C - E_1 \right). \quad \text{Subparte generada por el proceso de corte.}$$

$$6) \quad B_{PP6} = B_{PP5} \overset{\text{Pr}}{\cup} D. \quad \text{Producto preparado.}$$

$$7) \quad B_{SUB6} = B_{PP6} \overset{M}{\cup} D. \quad \text{Subparte generada por el montaje.}$$

$$8) \quad B_{PP7} = B_{SUB6} \overset{\text{Pr}}{\cup} A. \quad \text{Producto preparado.}$$

$$9) \quad B_{SUB7} = B_{PP7} \overset{M}{\cup} A = \text{PT.} \quad \text{Producto terminado generado por el proceso de montaje.}$$

Aquí, " $\overset{\text{Pr}}{\cup}$ " es un operador que caracteriza la unión por preparación, " $\overset{c}{-}$ " es la diferencia de corte, E_1 es la porción extraída por el corte, " $\overset{i}{\cup}$ " es la unión de la impresión y I_1, I_2, I_3 e I_4 , son los cordones de tinta de la impresión y " $\overset{M}{\cup}$ " es la unión de montaje [10] y [30].

La siguiente crónica de proceso caracteriza las operaciones de la maquinaria y el flujo de materiales sobre la distribución de planta mostrada en la figura 1.4

"La pieza $B_{PP3}=G$ es preparada en el almacén A_2 . Dicha pieza es transportada del interior del almacén al punto N_1 por medio del Actuador A_{C1} . Posteriormente, el producto B_{PP3} es transportado por la banda B_1 al punto N_2 , una vez localizada la pieza en el punto N_2 . La banda B_1 se desactiva, y una vez desactivada, el actuador A_{C2} inicia su recorrido realizando la operación de corte, generándose un subproducto; es decir, la subparte $B_{SUB5} = D$, una vez realizada la operación de corte el pistón regresa y la banda B_1 se activa, transportando la subparte $B_{SUB5} = D$ al Punto N_3 . Una vez que la subparte $B_{SUB5} = D$ se encuentra en N_3 , la banda B_1 se desactiva y la parte $B_{PP2}=F$ preparada en el almacén A_3 , es transportada por el actuador A_{C3} sobre la banda B_2 , al punto N_4 la banda B_2 es activada y la pieza es transportada hasta el punto N_5 . Una vez desactivada la banda el robot R_1 se activa y realiza la operación de impresión, generando con esto, la subparte $A = B_{SUB4}$. Una vez finalizado el proceso el robot R_1 regresa a home, y entonces la banda B_2 se activa nuevamente y transporta la pieza al punto N_6 , en donde la pieza está preparada para su montaje; $B_{PP7} = B_{SUB6} \overset{\text{Pr}}{\cup} A$. La pieza $B=B_{PP5}$ preparada en el almacén A_1 es transportada por el actuador A_{C4} al punto N_7 . Posteriormente; la banda B_3 se activa y transporta la pieza hasta el punto N_8 . Una vez localizada en ese punto la banda B_3 se desactiva, generándose un preparación para montaje $B_{PP6} = B_{PP5} \overset{\text{Pr}}{\cup} D$. El robot R_2 es activado y se dirige hacia el nodo N_8 , en donde toma la parte $B_{PP6} = B_{PP5} \overset{\text{Pr}}{\cup} D$, para posteriormente dirigirse al punto N_3 en donde

se realizara la operación de montaje. Cuando se realiza el montaje se genera la subparte $B_{SUB6} = B_{PP6} \overset{M}{\cup} D$. El robot R_2 se dirige ahora, hacia el punto N_6 transportando la pieza $B_{SUB6} = B_{PP6} \overset{M}{\cup} D$. Una vez alcanzado este punto se realiza la operación de montaje obteniendo como resultado el producto final, $B_{SUB7} = B_{PP7} \overset{M}{\cup} A = PT$. Realizado el montaje del producto el robot se dirige a su home, pasando por el punto N_9 , en el cual se detiene y el robot R_3 , se activa y toma el producto terminado, transportándolo hasta el punto N_{10} . Alcanzado este punto, el robot deposita al producto terminado en dicho punto, posteriormente una vez localizado el PT, en dicho sitio, la banda B_4 se activa transportando el producto hacia su salida en el punto N_{11} , finalizando con esto el proceso.

La ecuación de forma [27] y [30] asociada al componente en estudio, es la siguiente:

$$PT = \left(\left(\left(\left(E \overset{Pr}{\cup} K_4 \right)^C E_1 \right) \overset{Pr}{\cup} \left(\left(C \overset{Pr}{\cup} K_2 \right) \overset{Pr}{\cup} K_3 \right) \overset{M}{\cup} \left(E \overset{Pr}{\cup} K_4 \right)^C E_1 \right) \right) \overset{Pr}{\cup} \left(\left(\left(\left(\left(M \overset{Pr}{\cup} P \right) \overset{Pr}{\cup} K_1 \right) \overset{Pr}{\cup} I_1 \right) \overset{Pr}{\cup} I_2 \right) \overset{Pr}{\cup} I_3 \right) \overset{Pr}{\cup} I_4 \right) \overset{Pr}{\cup} K_3 \right) \overset{M}{\cup} \left(\left(\left(\left(\left(M \overset{Pr}{\cup} P \right) \overset{Pr}{\cup} K_1 \right) \overset{Pr}{\cup} I_1 \right) \overset{Pr}{\cup} I_2 \right) \overset{Pr}{\cup} I_3 \right) \overset{Pr}{\cup} I_4 \right)$$

Capítulo 2

Algunas consideraciones sobre las trayectorias de operación

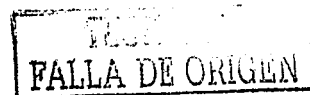
Introducción. Se presentan en este capítulo algunas consideraciones asociadas con la planeación operacional direccionadas con la caracterización de trayectorias de operación de la maquinaria [2]. Se estudian los llamados ciclos operativos de los elementos de trabajo relacionados con el sistema productivo analizado en este trabajo de tesis. Se identifican las trayectorias de “ida” y “vuelta” de cada máquina o dispositivo de trabajo, así como los tiempos de proceso. Son caracterizados los tiempos fijos y los tiempos secundarios [1]. Estos últimos serán integrados a las trayectorias de forma arbitraria. Finalmente, el estudio correspondiente con la sistematización de los perfiles de trayectoria no es considerado en esta tesis.

2.1 Consideraciones sobre los lugares geométricos operativos

El interés en esta sección es definir algunos conceptos importantes relacionados con los ciclos operativos de la maquinaria de trabajo asociada con el sistema productivo motivo de estudio.

Los siguientes conceptos serán de utilidad para los objetivos de esta investigación [2]:

- “Una trayectoria de operación es una pareja (L_G, P_T) formada por un conjunto de lugares geométricos (L_G) definidos en espacio-tiempo, y un conjunto (P_T) de funciones temporales denominadas perfiles de trayectoria”.



- “Los lugares geométricos asociados con la operatividad de una máquina de un sistema de manufactura se caracterizan por dos tipos:
 - 1) Lugares geométricos de ida y
 - 2) lugares geométricos de vuelta”.

- “Un ciclo operativo de una máquina integrada a una línea de producción se dice funcional si están bien definidas las trayectorias de ida y de vuelta”.

- “Una trayectoria de operación está bien definida si los lugares geométricos y los perfiles de trayectoria satisfacen los requerimientos de proceso de un sistema de manufactura”.

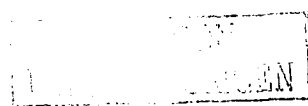
- “Los lugares geométricos de ida se caracterizan de la manera siguiente:
 - 1) Lugar geométrico de acercamiento.
 - 2) Lugar geométrico de operación principal”.

- “Los lugares geométricos de vuelta son aquellas rutas sobre las cuales la herramienta de una máquina retorna al punto de partida una vez finalizada una operación principal”.

- “El tiempo de proceso asociado con un lugar geométrico de acercamiento o con un lugar geométrico de vuelta es ajustable o modificable de acuerdo con los requerimiento de procesos”.

- “El tiempo de proceso relacionado con un lugar geométrico de operación principal es fijo”.

- “La caracterización de las trayectorias de ida y vuelta depender de la localización del home (punto de partida de la herramienta) de la máquina y de la dirección del movimiento”.



Una vez establecida el área de trabajo y la distribución de maquinaria, se caracterizaran las trayectorias de los elementos de trabajo. A continuación se muestra de manera total la distribución de trayectorias del sistema (lugares geométricos).

Para lograr los objetivos de este capítulo, se considerarán los símbolos siguientes:

- + : ida
- : regreso.

Nota: La numeración indica la sucesión de operaciones.

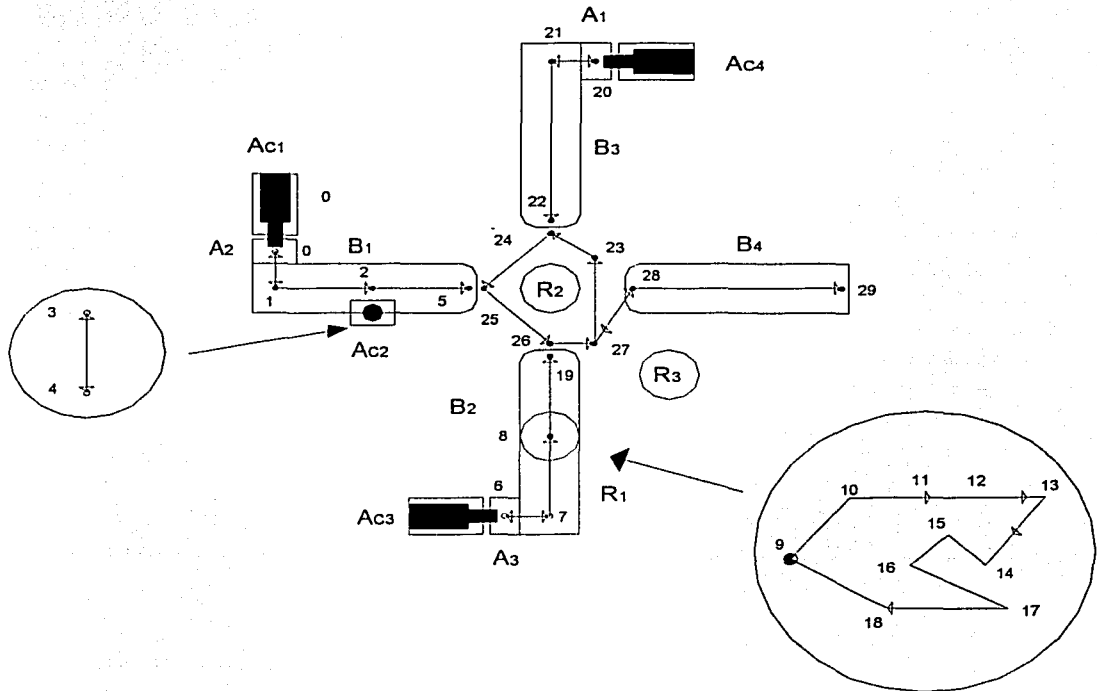
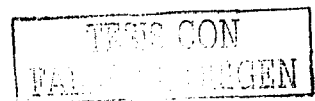


Figura 2.1. Distribución de trayectorias



A continuación se analizarán los ciclos operativos de cada máquina. Considérese ahora que los lugares geométricos mostrados en la figura 2.1 están asociados con el ciclo operativo del robot R_1 .

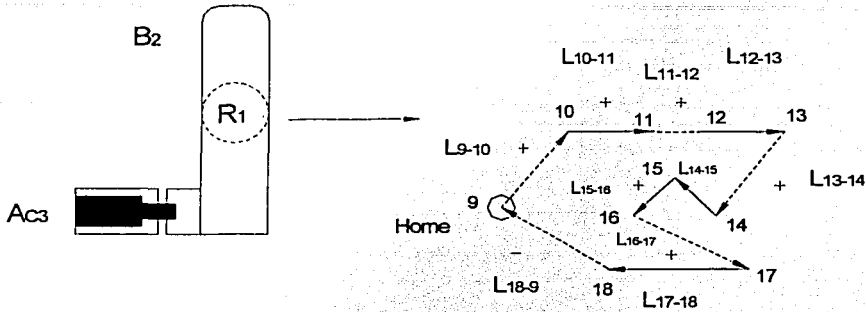
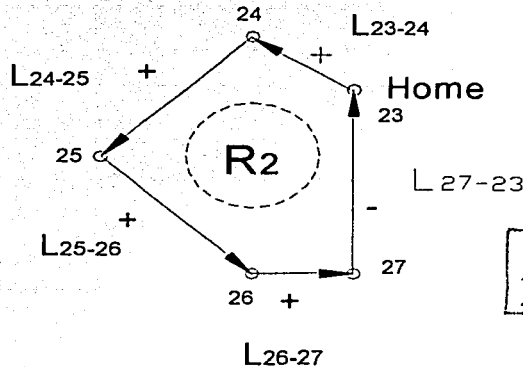


Figura 2.2. Lugares geométricos de operación del robot R_1

De acuerdo con la figura anterior, L_{9-10} , L_{11-12} , L_{13-14} y L_{16-17} , son lugares geométricos de acercamiento, L_{10-11} , L_{12-13} , L_{14-15} , L_{15-16} y L_{17-18} son los lugares geométricos de operación principal; en este caso impresión; y L_{18-9} es la ruta de regreso.

Por otro lado, los lugares geométricos mostrados en la figura 2.3 están asociados con el ciclo operativo del robot R_2 .



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.3. Lugares geométricos de operación del robot R_2

De acuerdo con la figura anterior, L_{23-24} , L_{24-25} , L_{25-26} , y L_{26-27} son los lugares geométricos de operación principal, en este caso impresión; y L_{27-23} es la ruta de regreso.

Los lugares geométricos mostrados en la figura 2.4 están asociados con el ciclo operativo del robot R_3 .

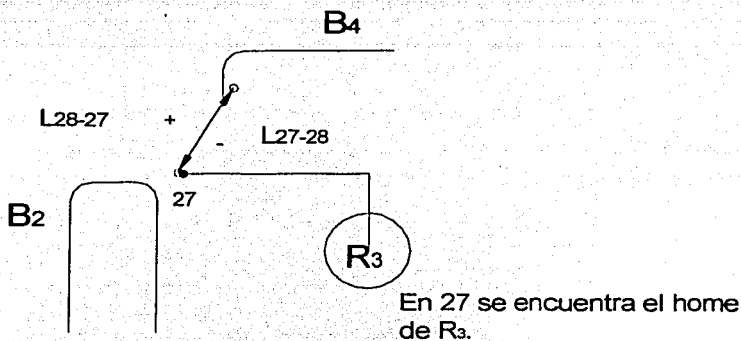


Figura 2.4. Lugares geométricos de operación del robot R_3

Note en la figura 2.4 que L_{27-28} , es el lugar geométrico de transporte; y L_{28-27} es la ruta de regreso.

Por otra parte los lugares geométricos mostrados en la figura 2.5 están relacionados con el ciclo operativo del actuador A_{c1} .

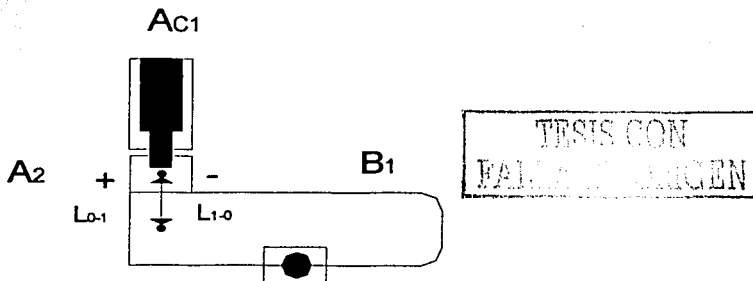


Figura 2.5. Lugares geométricos de operación del actuador A_{c1}

De acuerdo con la figura 2.5, L_{0-1} es el lugar geométrico de ida ; y L_{1-0} es la ruta de regreso.

En la figura 2.6 se muestran los ciclos operativos del actuador A_{c2} .

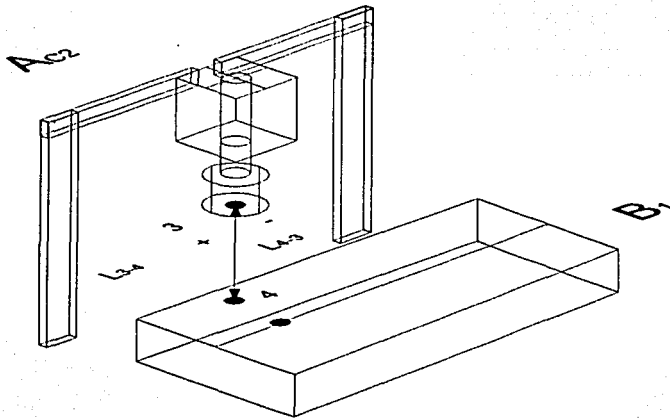


Figura 2.6. Lugares geométricos de operación del actuador A_{c2}

De la figura 2.6 se tiene que, L_{3-4} es el lugar geométrico de operación principal, en este caso de corte, y L_{4-3} es la ruta de regreso.

Ahora considérese que los lugares geométricos mostrados en la figura 2.7 están asociados con el ciclo operativo del actuador A_{c3} .

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN

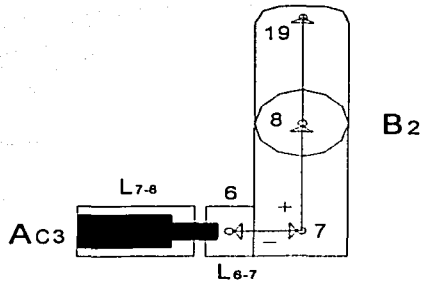


Figura 2.7. Lugares geométricos de operación del actuador A_{c3}

De la figura 2.7, L_{6-7} es el lugar geométrico de ida, es decir, de salida del pistón ; y L_{7-6} es el lugar geométrico de la ruta de regreso.

Ahora, los lugares geométricos mostrados en la figura 2.8 están relacionados con el ciclo operativo del actuador A_{c4} .

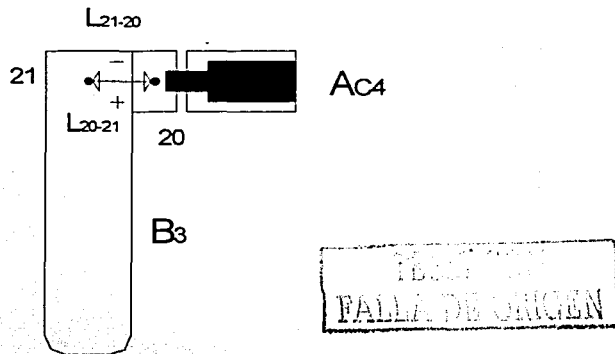


Figura 2.8. Lugares geométricos de operación del actuador A_{c4}

Obsérvese en la figura 2.8 que , L_{20-21} es el lugar geométrico de ida es decir de salida del pistón y L_{21-20} es el lugar geométrico de la ruta de regreso.

Finalmente los lugares geométricos mostrados en la figura 2.9 están asociados con los ciclos operativos de las cuatro bandas.

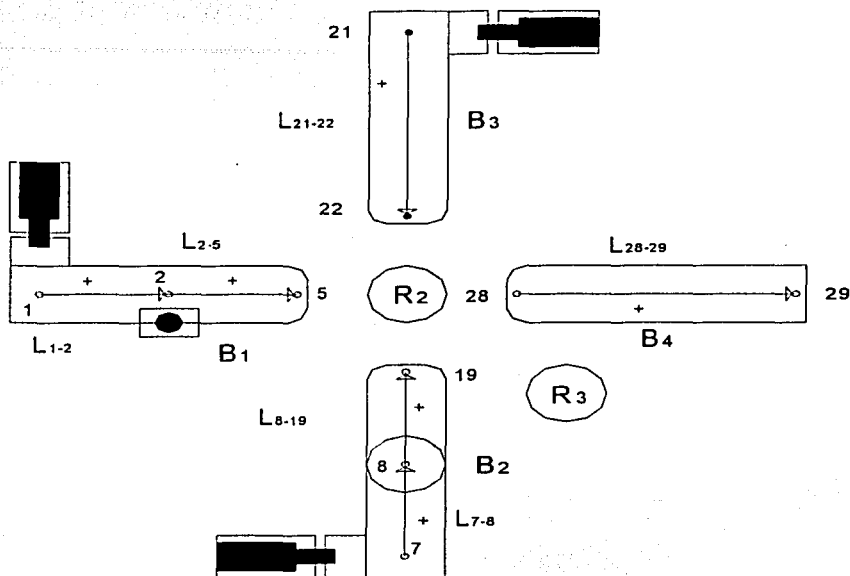


Figura 2.9. Lugares geométricos de operación de las cuatro bandas

De acuerdo con la figura anterior, L₁₋₂, L₂₋₅, L₇₋₈, L₈₋₁₉, L₂₁₋₂₂ y L₂₈₋₂₉ son los lugares geométricos de ida de la banda; como las bandas solo se accionan en una sola dirección no operan en regreso, es decir operan en una sola dirección.

2.2 Tiempos de proceso

Para asociar los tiempos de proceso [29] con cada lugar geométrico relacionado con los ciclos operativos de la maquinaria de trabajo, es necesario caracterizarlos de la manera siguiente:



- 1) Tiempo de producción unitaria (T_{pU}): variable obtenida por la relación,

$$T_{pU} = \frac{J_T(\text{segundos / anuales})}{\text{No de pieza / anuales}}$$

- 2) Tiempo fijo (T_F): variable generada por las características de proceso asociadas con un componente.

- 3) Tiempo secundario: tiempo asociado a las operaciones de acercamiento y vuelta de una máquina. Los tiempos secundarios no son calculados, es decir, se asignan y se ajustan de acuerdo con los requerimientos de proceso.

Para que un proceso sea admisible operativamente bajo "producción perfecta" se debe satisfacer la siguiente relación:

$$T_{pU} \geq \sum T_F$$

así como las siguientes condiciones:

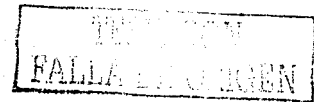
- Si $T_{pU} > \sum T_F$, entonces $T_{pU} = \sum T_F + I_{TS}$.

Aquí, I_{TS} es un intervalo de tiempo secundario.

- Si $T_{pU} = \sum T_F$, entonces $I_{TS} = 0$.

De acuerdo con el proceso estudiado en esta tesis, los tiempos de proceso son:

- 1) $T_{pU} = 20736000 \text{ Segundos} / 8000000 \text{ Piezas} = 26 \text{ S/pza.}$
- 2) $T_{F1} = 10 \text{ S}$ (tiempo asociado con la operación de impresión).
- 3) $T_{F2} = 2 \text{ S}$ (tiempo fijo requerido para la operación de corte).
- 4) $T_{F3} = 3 \text{ S}$ (tiempo fijo requerido para el montaje, es decir son tres puntos donde el robot R2 toca las piezas. (Para cada punto se requiere un segundo).
- 5) $I_{TS} = 26 \text{ S} - 15 \text{ S} = 11 \text{ S.}$



Aquí cabe aclarar que los tiempos fijos y secundarios son propuestos, ya que no se tienen las características cinemáticas, de las máquinas, ni el dimensionamiento real de el sistema de manufactura.

Para un proceso real en donde se tienen las características cinemáticas de la maquinaria así como las especificaciones de las operaciones, los tiempos fijos y secundarios requieren de un análisis detallado.

2.3 Caracterización de ciclos operativos

En esta sección se presentan las características geométricas de los ciclos operativos relacionados con la maquinaria del sistema productivo motivo de estudio. La siguiente afirmación es fundamental para los objetivos de esta tesis:

“Todo ciclo operativo de una máquina integra una línea de producción, la cual realiza una operación principal, tiene asociados cuando menos un tiempo fijo y un tiempo secundario”.

Es necesario precisar que una operación principal es aquella que transforma una materia prima en un subproducto o producto terminado y, como tal, integra un tiempo fijo (las operaciones de impresión, corte y montaje son principales y las de transporte se denominan secundarias) cabe aquí señalar que, los tiempos secundarios son preliminares. La figura siguiente muestra la distribución de tiempos fijos y secundarios sobre el ciclo operativo del robot R_1 .



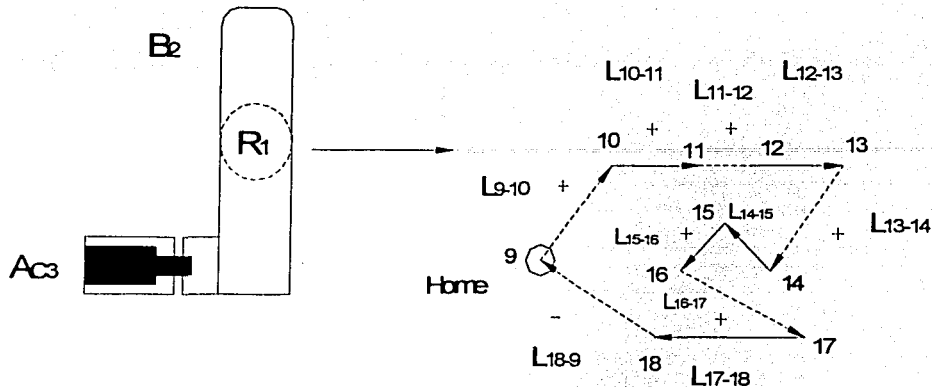


Figura 2.10. Tiempos de proceso asociados al ciclo de operación de R_1

Se asociarán a continuación los tiempos fijos y secundarios con cada lugar geométrico de operación del robot R_1 . Esto es:

- 1) $L_{9-10} \rightarrow T_{S1} = 2$
- 2) $L_{10-11} \rightarrow T_{F1} = 2$
- 3) $L_{11-12} \rightarrow T_{S2} = 1$
- 4) $L_{12-13} \rightarrow T_{F2} = 2$
- 5) $L_{13-14} \rightarrow T_{S3} = 2$
- 6) $L_{14-15} \rightarrow T_{F3} = 1$
- 7) $L_{15-16} \rightarrow T_{F4} = 1$
- 8) $L_{16-17} \rightarrow T_{S4} = 2$
- 9) $L_{17-18} \rightarrow T_{F5} = 4$
- 10) $L_{18-19} \rightarrow T_{S5} = - 2$

Cabe señalar que los tiempo secundarios T_{S1} , T_{S2} , T_{S3} , T_{S4} y T_{S5} han sido asignados, y, en los capítulos posteriores, dichos tiempos serán evaluados o fijados de acuerdo con la sincronización de procesos. De acuerdo con la figura 2.10, el tiempo total de ciclo de operación asociado al robot R_1 es de 19 S.



La figura 2.11 muestra los tiempos asignados al ciclo operativo del robot R_2 .

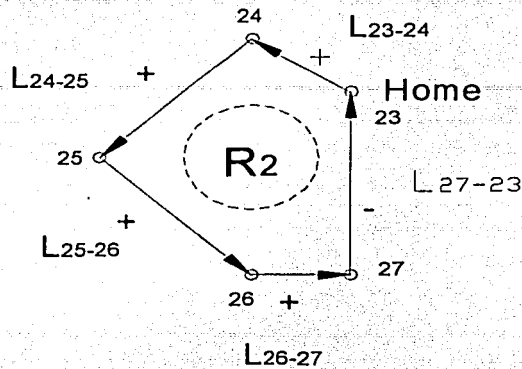


Figura 2.11. Tiempos de proceso asociados al ciclo de operación de R_2

De acuerdo con la figura anterior los tiempos del ciclo para R_2 , son:

- 1) $P_{24} \rightarrow T_{F6} = 1$
- 2) $P_{25} \rightarrow T_{F7} = 1$
- 3) $P_{26} \rightarrow T_{F8} = 1$
- 4) $L_{23-24} \rightarrow T_{S6} = 3$
- 5) $L_{24-25} \rightarrow T_{S7} = 4$
- 6) $L_{25-26} \rightarrow T_{S8} = 4$
- 7) $L_{26-27} \rightarrow T_{S9} = 2$
- 8) $L_{27-23} \rightarrow T_{S10} = 5$

En la figura 2.12 se muestran los tiempos asignados al robot R_3 .

ESTACION
 FALLA DE ORIGEN

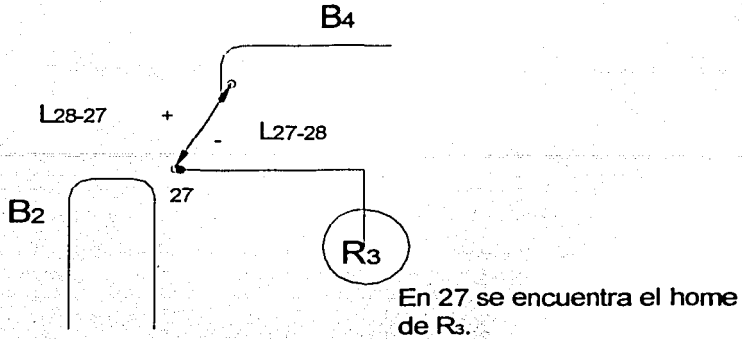


Figura 2.12. Tiempos de proceso asociados al ciclo de operación de R_3

- 1) $L_{27-28} \rightarrow T_{S11} = 3$
- 2) $L_{24-25} \rightarrow T_{S12} = -3$

Por otro lado, los tiempos de ciclo del actuador A_{c1} se muestran en la figura 2.13

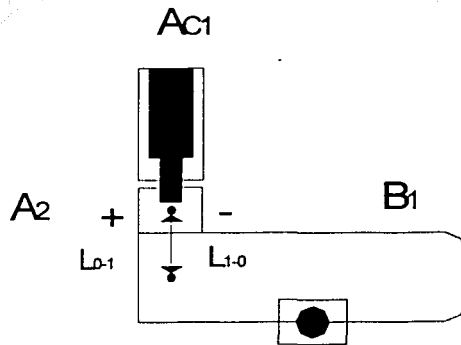


Figura 2.13. Tiempos de proceso asociados al ciclo de operación de A_{c1}

- 1) $L_{0-1} \rightarrow T_{S13} = 1$
- 2) $L_{1-0} \rightarrow T_{S14} = -1$

TESTEADO
FALLA EN ORIGEN

Para el caso del actuador A_{c2} , los tiempos de ciclo se muestran en la figura 2.14.

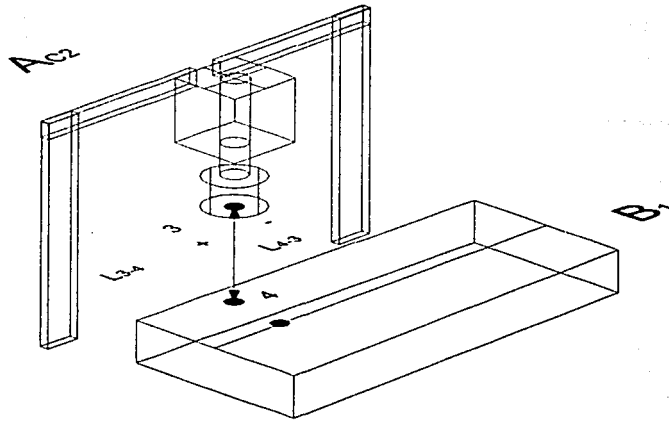


Figura 2.14. Tiempos de proceso asociados al ciclo de operación de A_{c2}

- 1) $L_{3-4} \rightarrow T_{F9} = 3$
- 2) $L_{4-3} \rightarrow T_{S15} = -1$

En la figura 2.15, se muestran los tiempos de ciclo asociados con el actuador A_{c3} .

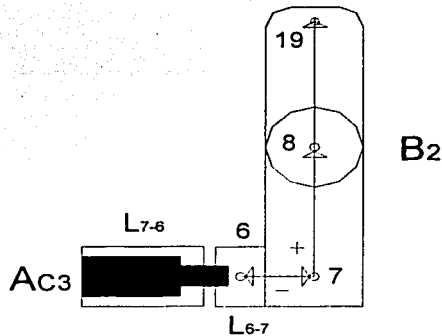
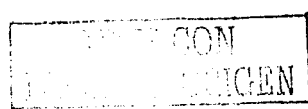


Figura 2.15. Tiempos de proceso asociados al ciclo de operación de A_{c3}

$$L_{6-7} \rightarrow T_{S16} = 1$$



$$L_{7.6} \rightarrow T_{S17} = -1$$

La figura 2.16 muestra los tiempos de ciclo de A_{C4} .

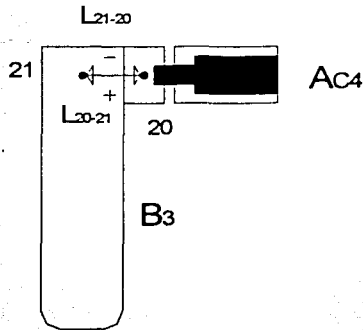


Figura 2.16. Tiempos de proceso asociados al ciclo de operación de A_{C4}

- 1) $L_{20-21} \rightarrow T_{S18} = 1$
- 2) $L_{21-20} \rightarrow T_{S19} = -1$

Por otro lado, la figura 2.17, muestra los tiempos relacionados con el sistema de bandas.

TEXIS CON
FOLIO DE ORIGEN

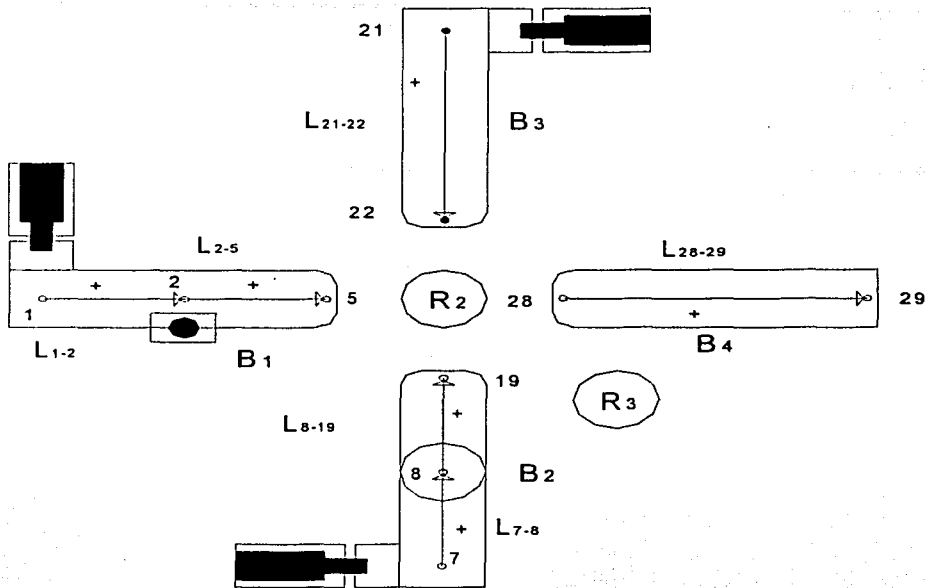


Figura 2.17. Tiempos de proceso asociados a los ciclos de operación del sistema de bandas.

- 1) $L_{1-2} \rightarrow T_{S20} = 2$
- 2) $L_{2-3} \rightarrow T_{S21} = 2$
- 3) $L_{7-8} \rightarrow T_{S22} = 2$
- 4) $L_{8-19} \rightarrow T_{S23} = 2$
- 5) $L_{28-29} \rightarrow T_{S24} = 4$
- 6) $L_{21-22} \rightarrow T_{S25} = 4$

Observe en las figuras anteriores que se ha colocado el símbolo "+" a los tiempo de ida y, el símbolo, "-" para los tiempos de vuelta. Por otro lado, las bandas síncronas también se caracterizan por operar a través de ciclos. En el caso de las bandas B1 y B2, B3 y B4 asociadas con el sistema productivo motivo de estudio solo se considera lugar geométrico de "ida pura".

Capítulo 3

Selección y distribución de elementos de sensado

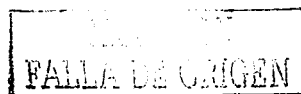
Introducción. En este capítulo se presenta el problema de control de procesos asociado al sistema productivo motivo de estudio . Se propone una caracterización apropiada de sensores y su distribución a lo largo del sistema de manufactura. Son definidos dos tipos de órdenes bajo las cuales se fundamenta al distribución de sensores: 1) el orden de "ida" y 2) el orden "TpU". Es caracterizado el llamado "recorrido inicial de ida" de una pieza de trabajo tomando en cuenta la asignación de tiempos secundarios realizada en el capítulo anterior.

3.1 El problema del control de procesos

Una de las tareas fundamentales del diseño y la planificación de sistemas productivos es el diseño del sistema de control de procesos. La coordinación y sincronización de movimientos y operaciones de la maquinaria de trabajo de tal forma que el volumen de producción (V_p) sea satisfecho, son actividades del control de procesos.

Para poder diseñar el sistema de control de procesos de un sistema de manufactura se requiere conocer la distribución de planta (D_p) y, los ciclos operativos de maquinaria (C_{OM}), los tiempos fijos (T_F), el tiempo de producción unitaria (T_{pU}) y una asignación preliminar de los tiempos secundarios.

Los objetivos de un sistema de control de procesos se pueden resumir en los puntos siguientes :



- Coordinar, controlar, sincronizar y monitorear las operaciones de la maquinaria de tal forma que el sistema productivo sea funcional y satisfaga el volumen de producción.
- Determinar correctamente los tiempos secundarios en los lugares geométricos de ida y vuelta de los ciclos operativos de la maquinaria de trabajo.

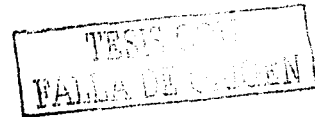
Se puede plantear el problema del control de procesos, en términos generales, de la manera siguiente:

"Dadas D_P , C_{OM} , T_{pU} , T_{Fi} , T_{SAP} , encuentre:

un sistema de control (S_C) funcional tal que :

$$1) V_P = \hat{V}_P$$

$$2) R_C = \hat{R}_C$$



sean satisfechas."

Aquí, T_{SAP} son los tiempos secundarios asignados preliminarmente y R_C son las restricciones de control definidas en el capítulo 1 de esta tesis. Cabe señalar que la determinación correcta de los tiempos secundarios es una tarea fundamental integrada al sistema de control.

Por otro lado, el término "funcional" relacionado al S_C implica dos consideraciones:

- 1) Transición correcta de materiales sobre la línea de producción.
- 2) Balanceo cinemático apropiado en cada elemento de trabajo.

En este trabajo solo se estudiará la primera consideración, puesto que la segunda está relacionada con la sistematización de perfiles de trayectoria.

Para finalizar esta sección es necesario aclarar los pasos a seguir para encontrar el S_C apropiado, el cual permita al sistema de manufactura operar funcionalmente. En las siguientes secciones y en los capítulos 4 y 5 se realizarán las siguientes actividades direccionadas a encontrar S_C :

- 1) Selección y distribución de sensores.
- 2) Análisis de recorrido de ida.
- 3) Modularización.
- 4) Sincronización modular y total.
- 5) Caracterización de las ecuaciones de estado de un PLC.
- 6) Diseño de un esquema operativo para control de operaciones.
- 7) Representación en diagrama escalera de las ecuaciones de estado.

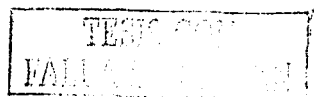
3.2 Elementos de sensado

Para controlar y sincronizar una línea de producción es necesario generar señales, para posteriormente procesarlas y enviarlas a los diferentes mandos de control que incluyen máquinas y dispositivos de trabajo. Un sensor es generalmente el dispositivo encargado de emitir señales. Dichas señales se procesan en un PLC y luego son enviadas a la maquinaria de trabajo.

Existen diversos tipos de sensores; ópticos, inductivos, capacitivos, entre otros. En este informe de investigación se utilizarán sensores genéricos, es decir, se usará un símbolo para denotar a un sensor específico sin interesar su característica. Lo importante es la generación de señales y no la forma operativa de los sensores.

Para que una señal sea generada se requiere de una relación entre un sensor y las entidades de manufactura (piezas en transición y máquinas). Considere los conjuntos siguientes:

- a) S conjunto de sensores.
- b) E_T conjunto de elementos de trabajo.



- c) B conjunto del dominio de manufactura (materias primas, subproductos, etc.).

Las funciones,

$$1) R_{SP} : S \times B \rightarrow C = \{1,0\}$$

$$2) R_{SS} : S \times E_T \rightarrow C = \{1,0\}$$

definidas por:

$$1) R_{SP}(s_1, B_{sub}) = 1 \quad \text{si } s_1 \cap B_{sub} \neq \phi \quad ; \forall s_1 \in S, B_{sub} \in B$$

$$2) R_{SP}(s_1, B_{sub}) = 0 \quad \text{si } s_1 \cap B_{sub} = \phi \quad ; \forall s_1 \in S, B_{sub} \in B$$

$$3) R_{SS}(s_1, R_4) = 1 \quad \text{si } s_1 \cap R_4 \neq \phi \quad ; \forall s_1 \in S, R_4 \in E_T$$

$$4) R_{SS}(s_1, R_4) = 0 \quad \text{si } s_1 \cap R_4 = \phi \quad ; \forall s_1 \in S, R_4 \in E_T$$

son llamadas relación de sensado primario (R_{SP}) y relación de sensado secundario (R_{SS}), respectivamente. Aquí, el código "1" significa que s_1 ha detectado una entidad de manufactura y, por tanto, genera una señal, y el código "0" significa que s_1 no ha detectado alguna entidad y, por consiguiente, envía una señal.

3.3 Caracterización por proceso de sensores

Los sensores pueden ser caracterizados de acuerdo a la entidad de manufactura que sensan o por la forma de distribución sobre las líneas de producción. Por ejemplo, se denominan sensores primarios aquellos elementos que sensan piezas (o algún elemento del dominio de manufactura). Los sensores secundarios están asociados a la generación de señales sensando elementos o dispositivos de trabajo.



Para diseñar el sistema de control de un sistema de manufactura se debe considerar, como primer paso, la caracterización de sensores, su número y la distribución de los mismos.

La siguiente caracterización de sensores es de fundamental importancia en este trabajo de tesis [20] y [29]:

- 1) Sensores principales.
- 2) Sensores de completud.
- 3) sensores de sincronización.
- 4) Sensores bandera.

Los sensores principales están relacionados con la generación de señales exclusivamente de materiales y productos o más precisamente, con los elementos del conjunto B, siguiendo el flujo de procesos. Dichos sensores son los primeros en distribuirse a lo largo de la línea de producción incluyendo la salida y entrada de materias primas y productos terminados en los almacenes. El número de sensores principales depende del número de posiciones estratégicas fijas de los elementos de B sobre la línea de producción.

Los sensores de completud sensan únicamente máquinas y como su nombre lo indica, completan la emisión de señales necesarias para que todos los elementos de trabajo sean activados y recorran las trayectorias, de tal manera que una pieza de trabajo pueda recorrer toda la línea de producción desde el almacén de materias primas hasta el almacén de productos terminados.

Para encontrar el número de sensores de completud, es necesario generar una crónica de procesos de ida incluyendo a los sensores principales. Posteriormente, se detectan los elementos de trabajo que no fueron activados por los sensores principales. El número de sensores de completud será igual al número de elementos de trabajo no activados sobre el recorrido de ida. Dichos sensores se distribuyen después de los sensores principales.

Los sensores de sincronización se caracterizan por ordenar el flujo de materiales y operaciones de los elementos de trabajo de tal forma que el volumen de producción sea satisfecho. Los sensores de sincronización pueden ser principales, de completud o nuevos sensores. La importancia de los sensores de sincronización radica en garantizar el TpU entre la primera pieza de trabajo que recorre la línea de producción y su sucesora. El número de sensores de este tipo no puede encontrarse por alguna relación.

Los sensores bandera están relacionados con los sistemas de seguridad operativos de la maquinaria y de los recursos humanos. También se caracterizan por emitir señales intermedias necesarias para un control rígido. Por ejemplo, la verificación de que un elemento de trabajo ha completado su ciclo operativo. El número de sensores bandera no puede ser determinado por alguna relación.

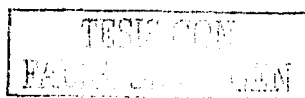
3.4. El orden de ida y distribución de sensores principales y secundarios sobre el sistema productivo

En esta sección se define el concepto de "orden de ida" relacionado con el tránsito de materiales sobre la línea de producción para generar el primer producto. Posteriormente, se distribuyen los sensores principales localizando posiciones estratégicas fijas de los materiales en la línea de producción. Se realiza una crónica de procesos de ida para determinar la ubicación de los sensores de completud. Finalmente, una vez distribuidos éstos últimos sensores, se genera otra crónica de procesos integrando los tiempos de ida.

3.4.1. El orden de ida

Las señales emitidas por los sensores en una línea de producción automática deben ser ordenadas. Existen dos tipos de ordenamientos:

- 1) El orden de ida.
- 2) El orden TpU.



El primer tipo está relacionado con la transición de la primer pieza de trabajo sobre la línea de producción. Por otro lado, el orden TpU, analizado a profundidad en el capítulo siguiente, está relacionado con el sensado de piezas del primer producto y el segundo, del segundo con el tercero, etc., de tal forma que el volumen de producción se satisfaga.

El orden de ida, motivo de estudio es esta sección, es usado para el diseño del control de procesos, pues de él depende el orden TpU o más precisamente la sincronización de las operaciones.

Considere ahora la siguiente proposición:

"Si la primer pieza de trabajo ha recorrido una línea de producción de tal forma que se localice en el almacén de productos terminados, entonces todos los elementos de trabajo han recorrido cuando menos sus trayectorias de ida"

De acuerdo a la proposición anterior el orden de ida se define de la manera siguiente:

"El orden de ida es la distribución ordenada de sensores principales y de completud de tal forma que todos los elementos de trabajo que componen una línea de producción sean activados (en sus trayectorias de ida) por el paso de la primer pieza de trabajo".

3.4.2. Caracterización de lugares estratégicos y distribución de sensores principales

Los lugares estratégicos fijos sobre los cuales se localizan materiales incluyendo al producto terminado, son fundamentales para caracterizar y distribuir sensores principales. En líneas de producción automáticas los lugares estratégicos se determinan en función del número de elementos de transporte.



Un lugar estratégico es una región fija sobre la cual se localiza una parte de la pieza de trabajo. La transición de una parte o pieza de un lugar geométrico a otro es realizada generalmente por los elementos de transporte.

Por otro lado, las trayectorias de ida de la maquinaria de trabajo, en especial, las asociadas a los transportes, juegan un papel fundamental para identificar los lugares estratégicos.

Considere ahora la siguiente afirmación:

“Existen cuando menos dos lugares estratégicos fijos relacionados con un elemento de transporte, uno al inicio o división de la trayectoria de ida y otro al final de la misma”.

El término “división de la trayectoria de ida” se refiere al punto en común que caracteriza al lugar geométrico de acercamiento y al lugar geométrico de operación efectiva de transporte u otra operación.

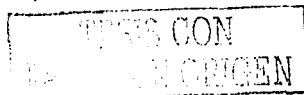
Para encontrar el número de lugares estratégicos se considera la siguiente proposición:

“Si en una línea de producción existen dos o más operaciones de transporte relacionadas entre sí, entonces el número de lugares estratégicos (N_{LE}) satisface la siguiente relación:

$$N_{LE} = \eta_T + 1$$

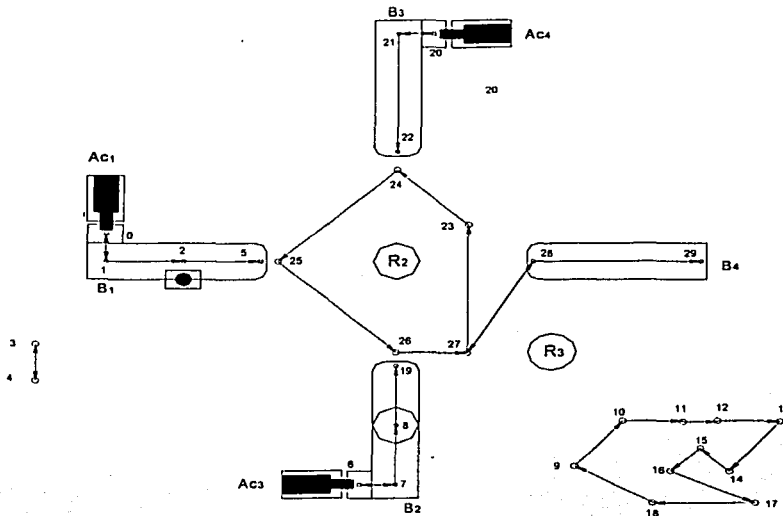
Aquí, η_T es el número de operaciones de transporte.

Una vez establecidas las consideraciones para caracterizar los lugares estratégicos el siguiente paso en esta sección, es analizar el proceso productivo motivo de estudio, de acuerdo con la última proposición, esto es:



$$N_{LE} = (3+1) + (3+1) + (2+1) + (2+1) = 14$$

Las localizaciones de los lugares estratégicos (L_{Gi}) relacionados con el sistema de manufactura estudiado en este informe se muestran en la figura siguiente:



Lugares estratégicos: 0, 1, 2, 5, 6, 7, 8, 19, 20, 21, 22, 27, 28, y 29.

Figura 3.1 Localización de los lugares estratégicos

Cabe señalar que en cada lugar estratégico la pieza de trabajo debe estar inmóvil cuando menos en un intervalo de tiempo predeterminado.

El interés es centrado ahora sobre la caracterización y distribución de sensores principales sobre la línea de producción. Para ello considere la siguiente proposición:

SEÑAL CON
FALSA DE ORIGEN

"Por cada lugar estratégico existe al menos un sensor principal, el cual sensará elementos del dominio de manufactura B siempre fijos a lo largo de la línea de producción"

La proposición anterior es equivalente a decir que el número de sensores principales coincide con el número de lugares estratégicos si y solo si existe un solo sensor principal en un lugar estratégico.

Es pertinente aclarar que los sensores localizados en las posiciones 23, 24, 25 y 26 serán considerados como de completud, ya que en lugar de detectar elementos del dominio de manufactura detectaran al robot R_2 .

Considere ahora que $S_{sp} \subseteq S$ es el conjunto que contiene los sensores principales.

La cardinalidad de dicho conjunto, o sea, el número de sensores contenidos en él, se determina a través de la siguiente relación:

$$\#(S_{sp}) = \eta_{ET} + 1 + k$$

Aquí, $k \geq 0$ es un factor que depende del número de elementos de trabajo que realicen operaciones híbridas de transporte y procesos al mismo tiempo.

Para el caso del sistema productivo motivo de estudio $k=0$ y, por tanto, el número de sensores principales (S_i) es igual a 14. Dichos sensores y los elementos del dominio B a los cuales sensan, se muestran en la figura siguiente:

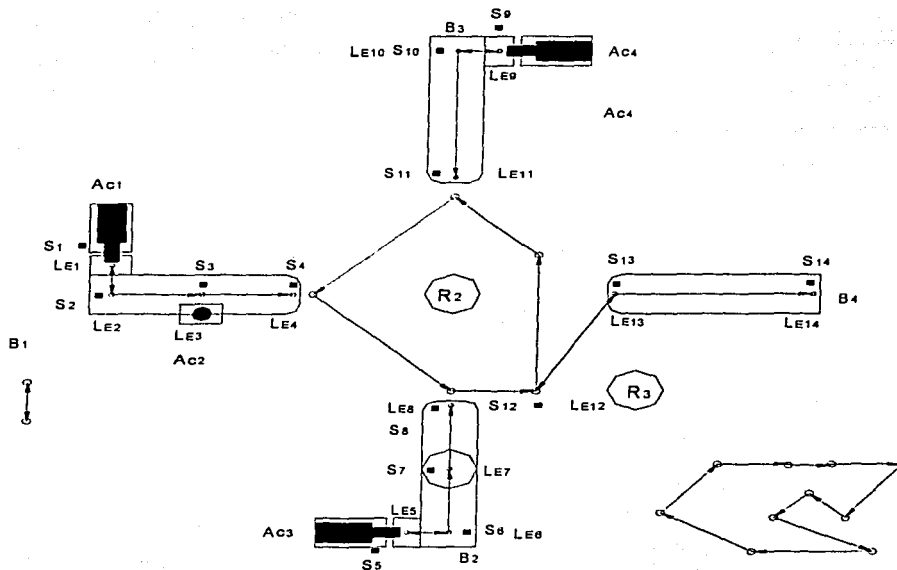


Figura 3.2. Distribución de sensores principales

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

Para finalizar esta sección es necesario establecer una relación entre los sensores principales y la activación de los elementos de trabajo. Para ello considere las siguientes definiciones:

- "Orden de operación de la maquinaria de operación principal: En una línea de producción serial o secuenciada el orden de operación de la maquinaria principal satisface la secuencia de operaciones asociada a la ecuación de forma [1], [27]. En el caso de líneas de producción no seriales, como en este caso, el orden de operación puede o no satisfacer la secuencia de operaciones asociada a la ecuación de forma."
- "Orden de operación de la maquinaria de transporte: En una línea de producción secuenciada el orden de operación de los elementos de

transporte satisfacen el flujo de materiales. En el caso de líneas de producción no seriales, el orden de operación de la maquinaria de transporte puede o no satisfacerse, pero si se satisface el flujo de materiales.”

- “El orden de operación total de ida (O_{OTI}). Si entre dos transportes sucesivos existen una o varias operaciones principales (de manufactura), entonces el orden de operación de maquinaria de una línea de producción secuencial es el siguiente:

- 1) Primer transporte (suministro de componentes).
- 2) Maquinaria principal siguiendo su orden de operación.
- 3) Segundo transporte (retiro de componentes procesados”).

Considere ahora el siguiente conjunto de índices: $I=\{A, D\}$ donde A representa la proposición “activado” y D significa “desactivado”.

La función,

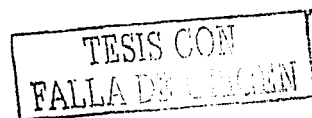
$$R_A : I \times E_T \rightarrow C = \{1,0\}$$

definida por:

$$1) R_A(A, E_{T1}) = 1 \Leftrightarrow E_{T1}^A ; A \in I \text{ y } \forall E_{T1} \in E_T$$

$$2) R_A(D, E_{T1}) = 0 \Leftrightarrow E_{T1}^D ; D \in I \text{ y } \forall E_{T1} \in E_T$$

es llamada relación de activación de la maquinaria de trabajo. Aquí, E_{T1}^A representa una activación del elemento E_{T1} y E_{T1}^D significa que dicho elemento está desactivado.



La proposición "activado" implica que el elemento de trabajo inicia el recorrido sobre las trayectorias de ida, y la proposición "desactivado" implica que el elemento de trabajo no ha iniciado su operación.

Sea $S_{sp} \subseteq S$ el conjunto de sensores principales, entonces:

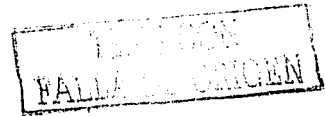
- 1) Si $R_{sp}(S_i, PT) = 1 \Rightarrow E_{Ti}^A; \forall S_i \in S; PT \in B.$
- 2) Si $R_{sp}(S_i, PT) = 0 \Rightarrow E_{Ti}^D; \forall S_i \in S; PT \in B.$

Para el recorrido de ida se debe satisfacer la siguiente ordenación de señales:

"El orden de emisión de señales del tipo $R_{sp}(S_i, PT) = 1$ satisface el orden O_{OTI} ".

Cabe señalar que la relación de sensado primario " R_{sp} " definida anteriormente, permite eslabonar tres elementos fundamentales en el control de procesos:

- 1) El sensor principal.
- 2) La pieza de trabajo.
- 3) La máquina actuante.



La siguiente restricción es fundamental en este trabajo:

"Un sensor primario no puede activar más de un elemento de trabajo en la caracterización del recorrido de ida".

3.4.3. Crónica de proceso de ida, caracterización y distribución de sensores de completud

En esta sección se presenta una crónica de proceso de ida integrando las posiciones estratégicas y los sensores principales. El objetivo con dicha crónica, es

encontrar elementos de trabajo no activados por los sensores principales y, con ello, caracterizar y distribuir los sensores de completud.

La siguiente crónica de procesos está relacionada con las figuras 1.2 y 3.2:

"El componente G se localiza sobre el lugar estratégico L_{E1} . En dicho lugar se encuentra el sensor S_1 el cual activa al actuador A_{C1} transportando a G de L_{E1} a L_{E2} . En L_{E2} el sensor S_2 detecta a G y activa la banda B_1 la cual transporta a G de L_{E2} a L_{E3} . El sensor S_3 detecta a G y activa al actuador A_{C2} . Dicho actuador realiza la operación de corte en G produciendo la subparte $B_{sub5} = D$. Posteriormente, la banda B_1 se activa y transporta la subparte B_{sub5} de L_{E3} a L_{E4} . El sensor S_4 ubicado en L_{E4} detecta a la pieza (B_{sub5}) y envía señal de activación al actuador A_{C3} (aquí para que el actuador se active, se debe presentar la condición de que el sensor S_5 a detectado presencia de la pieza B_{PP2}). El componente B_{PP2} esta situado sobre el lugar estratégico L_{E5} , en dicho lugar se localiza el sensor S_5 , el cual activa al actuador A_{C3} . Dicho actuador desplaza a B_{PP2} de L_{E5} a L_{E6} . En L_{E6} se localiza el sensor S_6 el cual detecta a B_{PP2} y activa a la banda B_2 , transportando a B_{PP2} de L_{E6} a L_{E7} . En L_{E7} se localiza el sensor S_7 , el cual detecta la parte B_{PP2} , y activa al robot R_1 , el cual realiza la operación de impresión, generando la parte A. Posteriormente es transportada la parte A de L_{E7} a L_{E8} . En L_{E8} se localiza el sensor S_8 y manda señal de activación a A_{C4} (aquí para que el actuador se active, se debe presentar se debe presentar la condición de que el sensor S_9 ha detectado la presencia de la pieza B). La parte B se localiza en el lugar estratégico L_{E9} , en el cual el sensor S_9 detecta a la parte B y manda señal de activación a A_{C4} , transportando a B de L_{E9} a L_{E10} . En L_{E10} el sensor S_{10} detecta a B y activa ala banda B_3 la cual transporta a B de L_{E10} a L_{E11} . El sensor S_{11} detecta a B y manda señal de activación al robot R_2 , y este se activa y realiza la trayectoria de operación de montaje de la primera pieza. El sensor S_{12} detecta el producto terminado PT en el lugar estratégico L_{E12} , y manda señal de activación del Robot R_3 , el cual se activa desde su home, hasta el lugar estratégico L_{E12} , en el cual toma a PT y lo transporta desde L_{E12} , a L_{E13} , y deposita a PT sobre el lugar estratégico L_{E13} , en donde se localiza S_{13} , una vez depositado PT, S_{13} detecta a PT y manda señal de



activación a B_4 , y PT será transportado de L_{E13} a L_{E14} , en L_{E14} se localiza el sensor S_{14} , el cual detecta a PT, y concluye el proceso".

De acuerdo con la crónica anterior, existen algunos elementos de trabajo que no están relacionados con un sensor principal, estos son:

- 1) La banda B_1 .
- 2) La banda B_2 .
- 3) El robot R_2 después de su primera operación.

El principal motivo por el cual dichas bandas y el actuador carecen de una señal de activación, es la falta de sensado de terminación en las operaciones de manufactura, puesto que los sensores principales solo detectan componentes.

El sensor de completud debe cumplir con dos tareas: 1) indicar la finalización de una operación principal y 2) enviar señal de activación al elemento de trabajo sucesor.

El número de sensores de completud se determina, para este caso, por el número de operaciones principales. La localización de dicho sensor es sobre las trayectorias de vuelta del elemento del trabajo asociado a la operación de manufactura o en su caso, en un lugar específico que permita sensar a la máquina una vez finalizada una operación principal.

Para el caso del sistema productivo motivo de estudio se requieren cinco sensores de completud los cuales serán llamados S_{c1} , S_{c2} , S_{c3} , S_{c4} y S_{c5} , respectivamente. Las ubicaciones de dichos sensores se muestran en la figura 3.3.

TESTS CON
FALLA DE ORIGEN

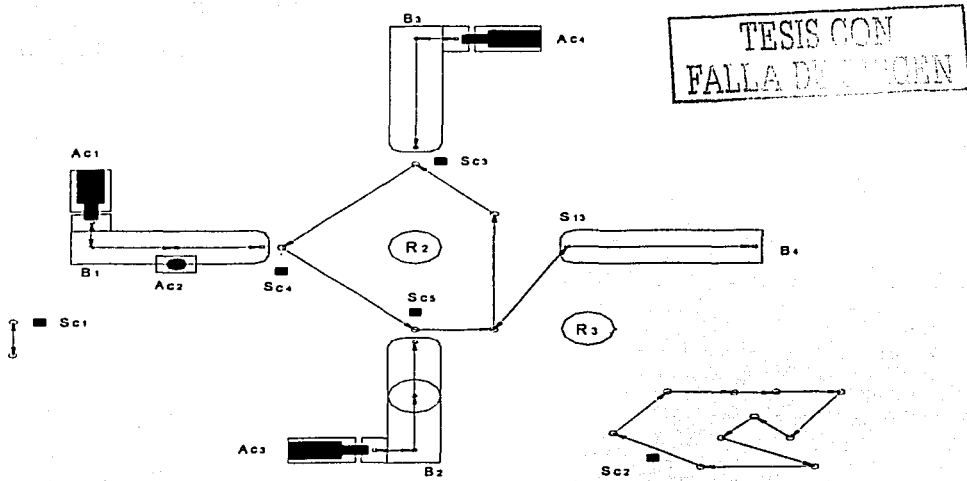


Figura 3.3 localización de sensores de completud

Observe en la figura 3.3 que el sensor Sc_1 ha sido colocado sobre la trayectoria de vuelta del actuador Ac_2 . Además, la activación de Sc_1 indica que la operación de corte ha sido realizada y, al mismo tiempo, envía señal a la banda B1 para transportar la subparte B_{sub5} .

De acuerdo con la figura 3.3, el sensor Sc_2 se ha ubicado sobre la trayectoria de vuelta del robot R_1 . Dicho sensor indica finalización de la operación de impresión y envía señal de activación a la banda B_2 .

Por otro lado, el sensor Sc_3 se ha ubicado sobre la trayectoria de trabajo del robot R_2 . Dicho sensor indica finalización de la primera operación de montaje.

El sensor Sc_4 se ha ubicado sobre la trayectoria de trabajo del robot R_2 . Dicho sensor indica finalización de la segunda operación de montaje.

Finalmente, el sensor Sc_5 se ha ubicado sobre la trayectoria de trabajo del robot R_2 . Dicho sensor indica finalización de la tercera operación de montaje.

3.4.4 Crónica de recorrido de ida

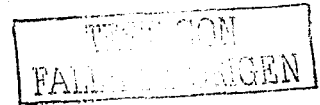
El interés en esta sección es generar una nueva crónica de procesos integrando los sensores de completud y los tiempos de ida caracterizados en el capítulo dos. Antes de proceder a describir la crónica, es necesario fijar un tiempo de partida sobre el primer lugar estratégico y, partir de dicho tiempo, sumar los tiempos de ida con el propósito de determinar el tiempo total de recorrido de ida.

Considere que el tiempo " T_0 " (inicial) está asociado al lugar estratégico L_{E1} , entonces el tiempo total de recorrido de ida (T_{TRI}) se determina por la siguiente expresión:

$$T_{TRI} = \sum_{j=1}^n T_{IDAJ} + T_{SCI}$$

Aquí, T_{IDAJ} son los j -ésimos tiempos de ida de la maquinaria de trabajo y T_{SCI} es el i -ésimo tiempo comprendido entre la finalización de las operaciones de manufactura y la activación de los sensores de completud.

- Crónica preliminar de recorrido de ida -

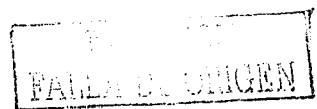


" En el tiempo T_0 el componente B_{PP3} se localiza en L_{E1} (dentro de A_1). El sensor S_1 detecta a B_{PP3} y activa al actuador A_{C1} . En t_1 la pieza B_{PP3} se ubica en L_{E2} . El sensor S_2 detecta a B_{PP3} y envía señal de activación a B_1 . En t_3 el componente B_{PP3} se localiza sobre L_{E3} . El sensor S_3 detecta a B_{PP3} y da salida a A_{C2} . En t_6 el actuador A_{C2} ha realizado la operación de corte sobre B_{PP3} produciendo $B_{sub5}=D$. En t_7 el actuador A_{C2} ha regresado a su punto de partida. En dicho punto se localiza el sensor S_{C1} el cual detecta el retorno de A_{C2} y envía señal de activación a la banda B_1 . En t_9 el componente B_{sub5} se localiza en L_{E4} . El sensor S_4 detecta llegada de B_{sub5} y envía señal de activación al actuador A_{C3} , en L_{E5} se localiza la parte B_{PP2} (Aquí para que el actuador se active, se debe dar la condición de que el sensor S_5 a detectado presencia de la pieza B_{PP2}). En t_{10} la subparte B_{PP2} se ubica

en L_{E6} . El sensor S_6 detecta a B_{PP5} y activa a la banda B_2 . En T_{12} la subparte B_{PP2} se localiza en L_{E7} . el sensor S_7 detecta a B_{PP5} y activa al robot R_1 . En t_{29} el robot R_1 ha realizado la operación de impresión sobre B_{PP5} produciendo $B_{SUB4}=A$. El sensor S_{C2} detecta el regreso de R_1 y envía señal de activación a B_2 . En t_{31} la subparte B_{SUB4} se localiza en L_{E8} . El sensor S_8 detecta a B_{SUB4} y envía señal de activación a A_{C4} (Aquí para que el actuador A_{C4} se active, se debe dar la condición de que el sensor S_9 a detectado presencia de la pieza B_{PP5} en el lugar L_{E9}). En t_{32} B_{PP5} se ubica en L_{E10} y el sensor S_{10} detecta a B_{PP5} y activa a la banda B_3 . En t_{36} B_{PP5} se ubica en L_{E11} y el sensor S_{11} detecta a B_{PP5} y manda señal de activación a el robot R_2 . En t_{40} el sensor de completud S_{C3} ha detectado a el robot R_2 y manda señal de activacion del robot, R_2 , ya ha realizando la operación de preparación de montaje $B_{PP6} = B_{PP5} \cup^{Pr} D$. En t_{45} el sensor S_{C4} detecta al robot R_2 mandando señal de activacion del mismo, produciendo previamente la parte $B_{SUB6} = B_{PP6} \cup^M D$. En t_{49} el sensor S_{C5} detecta al robot R_2 mandando señal de activación del mismo, habiendo producido la parte $B_{SUB7} = B_{PP7} \cup^M A = PT$. En t_{51} el producto terminado PT se localiza en L_{E12} , el sensor S_{12} detecta a PT y manda señal de activación a R_3 . En t_{54} el producto terminado PT se localiza en L_{E13} , El sensor S_{13} detecta a PT y manda señal de activación a la banda B_1 . En t_{58} el producto terminado PT se localiza en L_{E14} , el sensor S_{14} detecta a PT y aquí finaliza el proceso".

Cabe hacer notar que los tiempos no han sido modificados, de acuerdo a la asignación en el capítulo dos, y que son prelimanares.

La figura siguiente muestra la distribución de sensores principales y de completud.



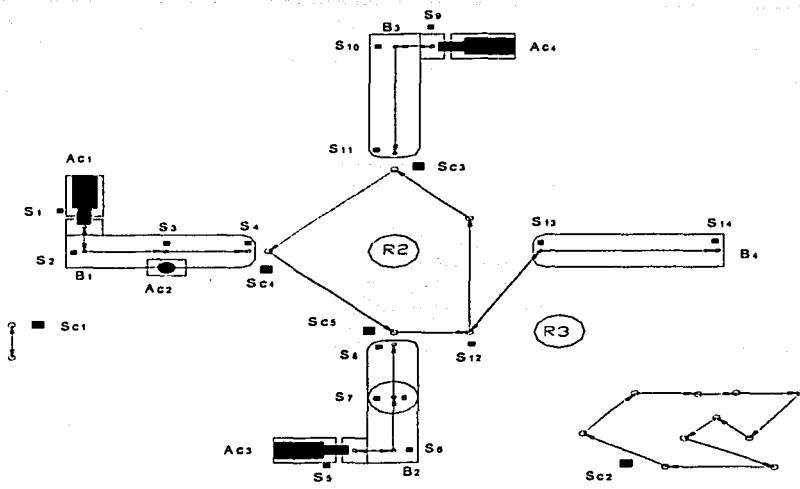


Figura 3.4. Distribución de sensores sobre el recorrido de ida

Cabe mencionar que el tiempo de recorrido de ida caracterizado en la crónica preliminar de procesos tienen gran importancia para el control de procesos precisamente por ser preliminares. En los siguientes capítulos se determinará con exactitud el tiempo final de recorrido de ida.

TECNOLOGIA
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 4

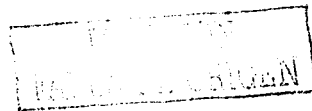
Modularización y sincronización de operaciones

Introducción. En este capítulo se presenta la sincronización local de operaciones del sistema productivo motivo de estudio. Para lograr los objetivos de este capítulo, se propone una modularización adecuada de la línea de producción mostrada en la figura 3.4. Posteriormente, se sincroniza cada módulo sobre la base de una técnica llamada "vórtice perfecto" [20] y [29]. Son caracterizados sensores de sincronización en cada módulo con el propósito de satisfacer el orden TpU. Se genera la sincronización global del sistema productivo y el balanceo de piezas sobre la línea de producción de tal forma que el TpU entre la primera y segunda pieza sea satisfecho.

4.1 Modularización

En esta sección se presenta una partición del sistema de manufactura motivo de estudio. Dicha partición se realiza con el propósito de facilitar la sincronización de operaciones. Cada partición funcional se llamará "módulo de producción". De acuerdo con [1] un sistema productivo se puede particionar en:

- 1) Unitario.
- 2) Grupal.
- 3) Por proceso u operación principal.
- 4) Por línea de producción.
- 5) Total.



El tipo unitario consiste en aislar cada elemento de trabajo, sus sensores de mando y el componente a procesar o a transportar. La partición grupal es una colección aislada de al menos dos particiones unitarias.

Por otro lado, la partición por proceso u operación principal está formada por un tipo grupal que satisface:

- 1) Contiene al menos tres particiones unitarias
- 2) Una de las particiones unitarias debe ser de operación principal.
- 3) Si P_{TR1} y P_{TR2} son particiones unitarias de transporte y P_{OP} por operación, entonces:

$$P_{TR1} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TR2}$$

- 4) Si existen más de dos P_{OP} y más de tres P_{TR1} , entonces:

a) $P_{TR1} \rightarrow P_{OP1} \rightarrow \dots P_{OPi} \rightarrow P_{TR2}$

b) $P_{TR1} \rightarrow P_{OP1} \rightarrow P_{TRi+1} \rightarrow P_{OP2} \dots \rightarrow P_{TRK}$

Aquí, P_{TR1} o P_{TRi} ($i=1$) es una partición unitaria inicial de transporte y P_{TR2} o P_{TRK} representan particiones unitarias finales (de transporte).

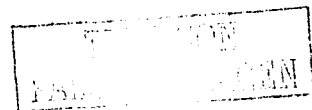
Cabe señalar que el símbolo " \rightarrow " indica un orden de operación de ida.

La partición por línea de producción consiste de dos o más particiones grupales que satisfacen:

- 1) La unión de las particiones grupales es toda la línea de producción.
- 2) La transición de materias primas sobre la línea de producción satisface el recorrido de ida (generación de un producto).

Finalmente, la partición total consiste de una o varias particiones por líneas de producción.

Una de las particiones más usadas para el diseño de control de procesos es la tipo "por operación principal". Las siguientes definiciones son fundamentales para el desarrollo de este trabajo:



- “Una partición por proceso u operación se dice “módulo de producción unitario” si existen exactamente dos operaciones de transporte y una operación principal en dicha partición”.

- “Un módulo de producción se dice compuesto si:
 - 1) Existen más de dos módulos anteriores y/o.
 - 2) Existe una o más operaciones de transporte que convergen a una operación principal y/o.
 - 3) El módulo admite una o más operaciones de transporte secuenciadas sin operación principal intermedia.

- “Un módulo de producción se dice funcional para el control de procesos si:
 - 1) El módulo es compuesto
 - 2) La entrada y salida del módulo están sensadas por dos sensores principales.

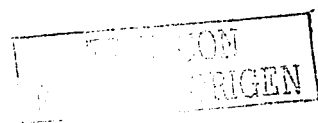
- “Un módulo funcional es inicial si integra operaciones del almacén de materias primas. Es final, si integra operaciones del almacén de productos terminados”.

- “Una línea de producción está compuesta de por lo menos un módulo funcional”.

- “La interacción entre dos o más módulos funcionales contiene únicamente sensores principales”.

- “La salida de un módulo funcional debe ser la entrada de otro módulo”.

Con estas ideas en la sección siguiente se modulariza el sistema productivo motivo de estudio.



4.2 Modularización del sistema productivo

Considere ahora que la partición del sistema de manufactura en estudio es por proceso u operación principal. La modularización funcional del sistema es la siguiente:

- 1) Módulo de corte.
- 2) Módulo de impresión.
- 3) Módulo de montaje.

Puesto que existen exactamente tres módulos y, de acuerdo, a la distribución de planta mostrada en la figura 3.4; el módulo de corte es inicial, el de impresión es un módulo intermedio y el módulo de montaje es el final. La figura siguiente muestra la modularización del sistema de manufactura en estudio:

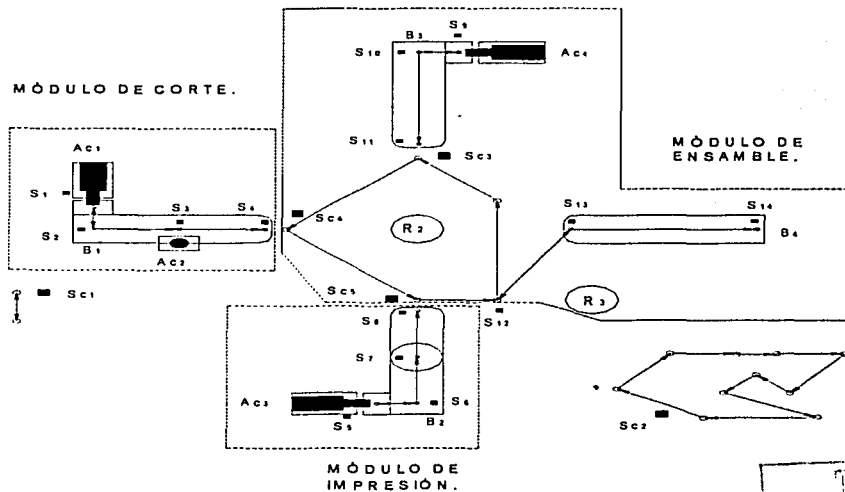


Figura 4.1 Modularización del sistema productivo

Note en la figura anterior que los sensores principales S₄, S₈, SC₄ y SC₅ representa la intersección de los módulos de producción de corte-montaje e, impresión-

montaje al mismo tiempo, S_4 caracteriza salida del módulo de corte e inicio del modulo de impresión y S_8 salida del modulo de impresión e inicio del módulo de montaje. Por otro lado, cada módulo integra las siguientes particiones:

- 1) Módulo de corte : tres particiones unitarias de transporte y una de operación principal.
- 2) Módulo de impresion: tres particiones unitarias de transporte y una operación principal.
- 3) Modulo de Montaje: cinco particiones unitarias de transporte y tres de operación principal.

En la tabla siguiente se muestran los elementos de cada módulo en estudio:

Módulo	Partición unitaria	Descripción de operación
corte	$(S_1, A_{C1}, B_{PP3}, S_2)$	Transporte
corte	(S_2, B_1, B_{PP3}, S_3)	Transporte
corte	$(S_3, A_{C2}, B_{sub5}, S_{C1})$	Principal
corte	$(S_{C1}, B_1, B_{sub5}, S_4)$	Transporte
impresion	$(S_5, A_{C3}, B_{PP2}, S_6)$	Transporte
impresion	(S_6, B_2, B_{PP2}, S_7)	transporte
impresion	$(S_7, R_1, B_{sub4}, S_{C2})$	Principal
impresion	$(S_{C2}, B_2, B_{sub4}, S_8)$	Transporte
montaje	$(S_9, A_{C4}, B_{PP5}, S_{10})$	Transporte
montaje	$(S_{10}, B_3, B_{PP5}, S_{11})$	Transporte
montaje	$(S_{11}, R_2, B_{PP6}, S_{c3})$	Principal
montaje	$(S_{c3}, R_2, B_{SUB6}, S_{c4})$	Principal
montaje	$(S_{c4}, R_2, B_{PP7}, S_{c5})$	Principal
montaje	$(S_{c5}, R_2, B_{SUB7}, S_{12})$	Transporte
montaje	$(S_{12}, R_3, PT, S_{13})$	transporte
montaje	$(S_{13}, B_4, PT, S_{14})$	transporte

Tabla 4.1 Particiones unitarias del sistema productivo

4.3 Jerarquización de módulos funcionales para sincronización

En esta sección se presentan algunas consideraciones relacionadas con la jerarquización de módulos para sincronización de operaciones. El principal objetivo es determinar el módulo sobre el cual se realizará más adelante la sincronización local de operaciones. Considere ahora las definiciones siguientes:

- “El módulo de máxima jerarquía en una línea de producción se caracteriza por integrar la operación principal (o el conjunto de operaciones principales) con el máximo tiempo fijo” y/o por complejidad de operaciones y/o por integrar un número grande de particiones unitarias y/o por ser intersección de dos o más módulos.
- “Si un módulo de máxima jerarquía es inicial, entonces existe cuando menos un módulo sucesor”.
- “Si un módulo de máxima jerarquía es final, entonces existe cuando menos un módulo antecesor”.
- “Si un módulo de máxima jerarquía no es inicial ni final, entonces existen cuando menos un módulo antecesor y un módulo sucesor”.
- “Si existen dos módulos de máxima jerarquía por igualdad de tiempos fijos, entonces se tomará como principal aquél módulo que integre la subparte (componente) más próxima al producto terminado”.

Jerarquización de módulos:

1. De acuerdo con las definiciones descritas anteriormente, el módulo de impresión es el de máxima jerarquía por el criterio de máximo tiempo fijo y complejidad de operaciones y tiene un módulo sucesor y un antecesor (el corte y el montaje).

2. Mediana jerarquía: módulo de montaje. Criterio: tiempo fijo y complejidad de operaciones.
3. Mínima jerarquía: Módulo de corte. Criterio: Mínimo tiempo fijo y proceso no complejo.

4.4 Sincronización de procesos

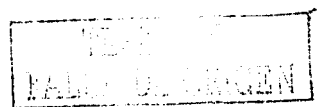
Para sincronizar las operaciones de la maquinaria se deben analizar tanto los tiempos de ida como los de vuelta. Dicho análisis consiste en modificar y, en su caso, fijar los tiempos secundarios de tal forma que el volumen de producción sea satisfecho [20] y [30] . Considere la siguiente definición:

- "La sincronización de operaciones (SO) es un conjunto de procedimientos sistemáticos direccionados a controlar, coordinar y monitorear las operaciones de la maquinaria de tal forma que el volumen de producción sea satisfecho".

Es importante mencionar que todos los procedimientos utilizados para lograr la sincronización de operaciones deben estar relacionados. Por otro lado, la sincronización de procesos se divide en dos partes:

- 1) Sincronización local (modular).
- 2) sincronización global (línea de producción).

La primera parte consiste en analizar cada módulo funcional que compone a la línea de producción de manera independiente de los demás módulos. Cada módulo funcional está restringido por el TpU para esta tesis.



módulos sincronizados localmente. La restricción global para este tipo de sincronización es el TpU.

4.4.1 Algunas consideraciones sobre la sincronización local

En esta sección se presentan algunas consideraciones y criterios relacionados con la sincronización local de módulos funcionales. El objetivo es encontrar un procedimiento sistemático que permita a través del análisis de particiones unitarias, sincronizar los módulos de impresión, montaje y corte, respectivamente.

Cada módulo de producción contiene particiones unitarias de cuatro tipos:

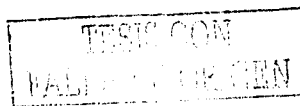
- 1) Partición primaria.
- 2) Partición secundaria.
- 3) Partición híbrida.
- 4) Partición especial.

El primer tipo está integrada por una máquina de operación principal, dos sensores (generalmente un sensor principal y otro de completud) y un componente. La partición secundaria tiene los mismos elementos que la partición primaria con la diferencia de que la máquina o dispositivo realiza una operación de transporte.

La partición híbrida está formada por los mismos elementos que los anteriores con la diferencia de que la máquina realiza una operación híbrida: principal y transporte en el mismo tiempo. Finalmente, la partición unitaria especial consiste en dispositivos de sujeción, sus sensores y el componente.

Por otro lado, las particiones secundarias se pueden clasificar de la manera siguiente:

- 1) Secundaria de transporte principal.
- 2) Secundaria de transporte secundario.
- 3) Secundaria de transporte de precisión.



El transporte principal se caracteriza por operaciones desde 1 hasta 6 grados de libertad. El transporte secundario es generalmente de un grado de libertad, y el transporte de precisión está relacionado con desplazamientos de componentes sobre guías o correderas.

La caracterización de particiones unitarias es de gran importancia en la sincronización, pues como se verá más adelante, dentro de los módulos de producción existen una jerarquía de particiones la cual permitirá generar un procedimiento sistemático para sincronizar local y globalmente líneas de producción automáticas.

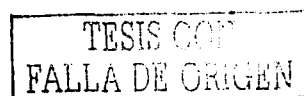
4.4.2 Sincronización local del módulo de impresión.

El módulo de máxima jerarquía es, de acuerdo a la sección 4.3, el que integra el máximo tiempo fijo y complejidad de operaciones. Para el caso del sistema productivo en estudio, dicho módulo es el de impresión. Considere ahora los siguientes pasos [29]:

- 1) Identificar el módulo de máxima jerarquía y aislarlo de la línea de producción.
- 2) Identificar sensores principales de entrada y salida al módulo.
- 3) Identificar la partición unitaria proceso de máxima jerarquía (P_{Op}).
- 4) Agrupar en torno a la partición de máxima jerarquía los transportes de entrada (P_{TRE}) y salida (P_{TRS}), esto es:

$$P_{TRE} \rightarrow P_{Op} \rightarrow P_{TRS}$$

Aquí, P_{TRE} y P_{TRS} serán llamadas particiones antecesora y sucesora, respectivamente.



- 5) Extender, si existen, particiones unitarias de transporte o principales en los extremos del grupo mencionado en el inciso 4).

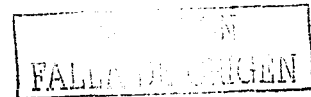
De acuerdo con la figura 3.4 y a los pasos señalados anteriormente, la identificación y caracterización de particiones en el módulo de soldadura es la siguiente:

- 1) Módulo de impresión.
- 2) S_5 (entrada), S_8 (salida)
- 3) $P_{OP} = (S_7, R_1, B_{sub4}, S_{C2})$
- 4) $P_{TRE1} \rightarrow P_{TRE2} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TRS1}$
- 5) $P_{TRE2} = (S_6, B_2, B_{PP2}, S_7) \rightarrow P_{OP} \rightarrow (S_{C2}, B_2, B_{sub4}, S_8) = P_{TRS1}$
 $P_{TRE1} = (S_5, A_{C3}, B_{PP2}, S_6) \rightarrow P_{TRE2} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TRS1}$

Una vez definidas las particiones y extensiones, la siguiente etapa es relacionar las particiones para realizar la sincronización local, para ello considere las definiciones siguientes:

- "Existen dos formas de sincronización local:

- 1) Antecesora y
- 2) sucesora."

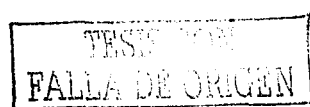


- "La sincronización es antecesora si el número de particiones unitarias a la izquierda de P_{OP} es mayor que el número de particiones unitarias a la derecha de P_{OP} ."
- "La sincronización es sucesora si a la derecha de P_{OP} existen más particiones unitarias que a la izquierda".
- "La sincronización es antecesora o predecesora si existen un número igual de particiones unitarias a la izquierda o a la derecha de P_{OP} ".

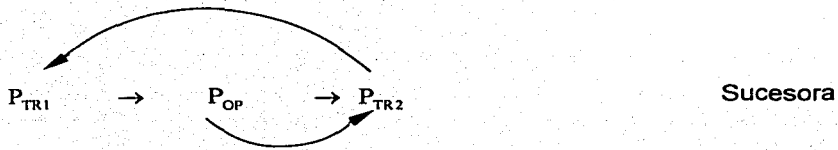
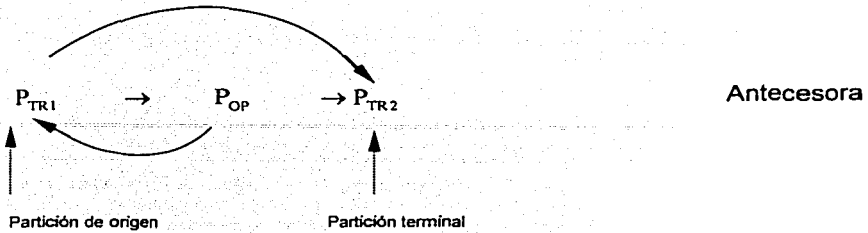
. Las siguientes definiciones son fundamentales para los objetivos de este trabajo:

- “La sincronización modular se dice ordenada y completa por “vórtice perfecto” [29], si el extremo inicial del vórtice inicia en la partición de máxima jerarquía por proceso y su extremo final termina en una partición de origen o terminal”.
- “La sincronización modular se dice ordenada e incompleta por “vórtice perfecto” si el extremo final del vórtice termina en una partición que no es de origen ni terminal”.
- “La sincronización modular ordenada e incompleta se transforma a ordenada y completa si el extremo del vórtice se extiende a una partición de origen o terminal”.

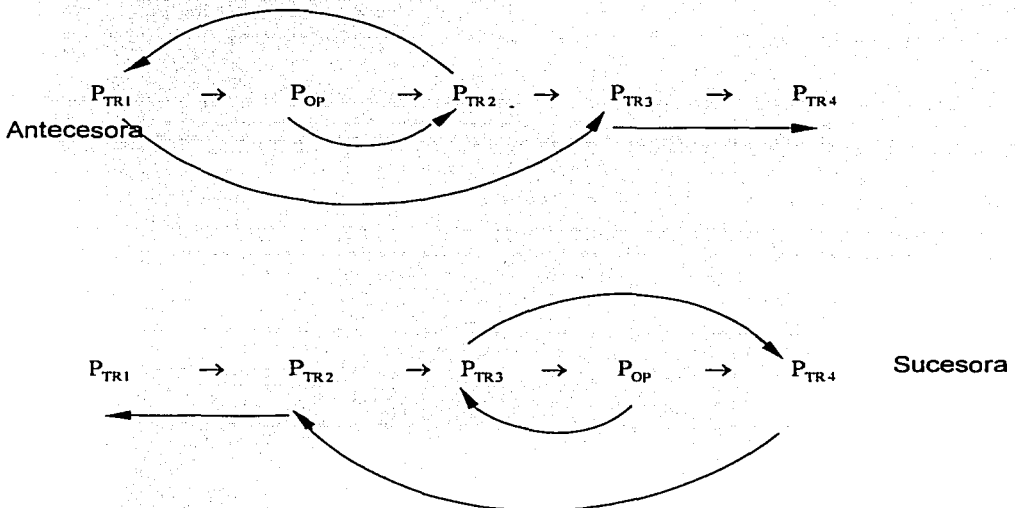
Las ideas dadas en las definiciones anteriores se muestran en la figura siguiente:



Vórtice



a) Sincronización ordenada y completa.



b) Sincronización ordenada incompleta.

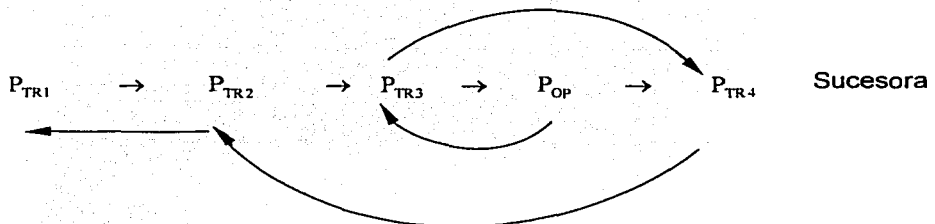


Figura 4.2. Tipos de Vórtice; a) vórtice completo, b) vórtice incompleto

De acuerdo al paso 5) anteriormente mencionado, la sincronización del módulo de impresión es antecesor con vértice perfecto. La figura siguiente muestra la esquematización de dicho vértice:

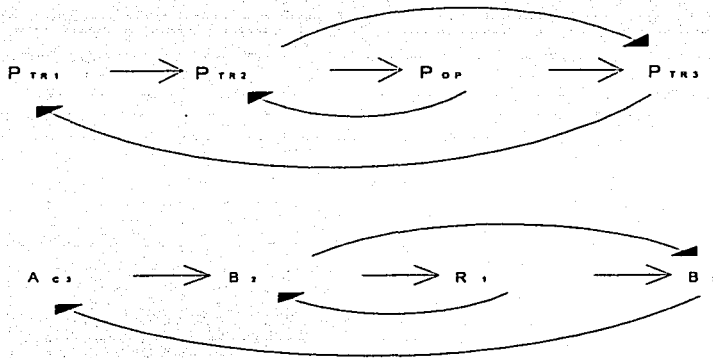
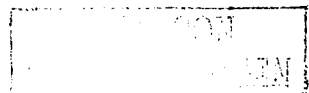


Figura 4.3. Sincronización predecesora con vértice perfecto del módulo de impresión

Antes de continuar con el procedimiento de sincronización de procesos, es necesario definir algunas propiedades del vértice, estas es:

- 1) La dirección del vértice es en contra de las manecillas de reloj si el número de particiones unitarias relativas a P_{op} es mayor del lado derecho en relación con el lado izquierdo.
- 2) La dirección del vértice es a favor de las manecillas del reloj, si el número de particiones unitarias a la derecha de P_{op} es menor que las asociadas al lado izquierdo.
- 3) Si el número de particiones unitarias del lado izquierdo y derecho de P_{op} coincide, entonces la dirección del vértice es a favor o en contra de las manecillas del reloj.



4.4.3 Relación del vórtice con los tiempos de proceso y sincronización local por tiempos

Para poder satisfacer el volumen de producción a través de la sincronización de operaciones, es necesario integrar los tiempos de proceso al método del vórtice perfecto, esto es [31]:

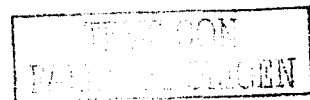
- 1) Identificar la(s) máquina(s) que usan el mayor tiempo fijo (partición por proceso de máxima jerarquía).
- 2) El origen del vórtice es en la(s) máquina(s) de la partición por proceso de máxima jerarquía.
- 3) Completar los tiempos del ciclo operativo de la máquina de máxima jerarquía tomando en cuenta las restricciones siguientes:

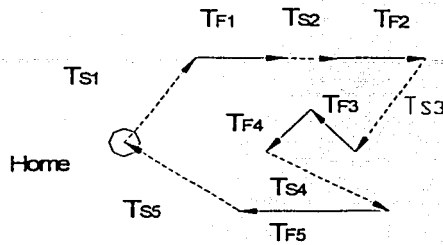
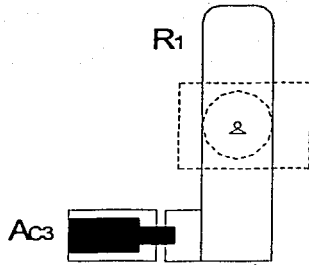
$$3.1) T_{pU} = \sum T_{cu}$$

$$3.2) BcM = \hat{BcM}$$

Aquí, $\sum T_{cu}$ es la sumatoria de los tiempos asociados con el ciclo operativo de la maquinaria y BcM es " el balanceo cinemático" de la maquinaria. De acuerdo con los pasos señalados anteriormente, la máquina R_1 son de máxima jerarquía, por el hecho de utilizar el máximo tiempo fijo. Por tanto, el origen del vórtice está en R_1 .

Por otro lado, para completar los tiempos del ciclo operativo de R_1 tal que la suma de dichos tiempos sea igual al T_{pU} , basta con asignar a $T_{s5} = 9$ s. La figura siguiente muestra el ciclo operativo de R_1 .





$T_{S1}=+2$, $T_{F1}=+2$, $T_{S2}=+1$, $T_{F2}=+2$, $T_{S3}=+2$, $T_{F3}=+1$, $T_{F4}=+1$, $T_{S4}=+2$, $T_{F5}=+4$ Y $T_{S5}=9$.

Figura 4.4 Completud de tiempos para el ciclo operativo de R_1

4) Si el vórtice relaciona una máquina antecesora, entonces se debe sincronizar la máquina de máxima jerarquía y su máquina antecesora.

5) Si el vórtice relaciona una máquina sucesora, entonces se sincroniza la máquina de máxima jerarquía y su sucesora.

6) La sincronización para las máquinas del paso 4) debe satisfacer:

$$6.1) T_{IDA}^{MG} + T_{IDA}^{ANT} = T_p U$$

$$6.2) T_{VUELTA}^{ANT} = T_{VUELTA}^{MG}$$

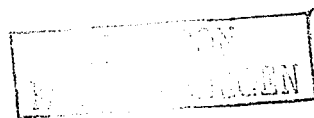
$$6.3) B_c M = \hat{B}_c M$$

7) La sincronización para las máquinas del paso 5) debe satisfacer:

$$7.1) T_{IDA}^{MG} + T_{IDA}^{SU} = T_p U$$

$$7.2) T_{VUELTA}^{SU} \leq T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{SU}$$

$$7.3) B_c M = \hat{B}_c M$$



8) Los pasos 6) y 7) están sujetos a que las máquinas operen a ciclos continuos.

Las nomenclaturas usadas en los pasos anteriores son:

- T_{IDA}^{MG} : Tiempo de ida de la máquina de máxima jerarquía.
- T_{IDA}^{ANT} : Tiempo de ida de la máquina antecesora.
- T_{IDA}^{SU} : Tiempo de ida de la máquina sucesora.
- T_{VUELTA}^{MG} : Tiempo de vuelta de la máxima jerarquía.
- T_{VUELTA}^{ANT} : Tiempo de vuelta de la máquina antecesora.
- T_{VUELTA}^{SU} : Tiempo de vuelta de la máquina sucesora.
- T_{CO}^{MG} : Tiempo de ciclo de la máquina de máxima jerarquía.

Considere la siguiente observación:

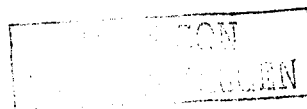
"Los tiempos de ida del robot R_1 (máquina de máxima jerarquía) son: $T_{S1}= 2$, $T_{F1}= 2$, $T_{S2} = 1$, $T_{F2} = 2$, $T_{S3} = 2$, $T_{F3} = 1$, $T_{F4} = 1$, $T_{S4} = 2$ y $T_{F5} = 4$; es decir, el tiempo medido desde la activación del sensor S_7 hasta la activación del sensor S_{C_2} ".

De acuerdo con la figura 4.3, la sincronización del módulo de impresión es por vórtice antecesor. Por tanto, las máquinas R_1 y B_1 relacionadas por el vórtice, deben sincronizarse según los pasos 6) y 8), esto es:

$$T_{IDA}^{B2} = T_{pU} - T_{IDA}^{R1} = 26 - 17 = 9 \text{ s.}$$

Las bandas se consideran de ida pura, por tanto, se considera que no tienen regreso.

La figura siguiente muestra la asignación de los tiempos $T_{IDA}^{B2} = 9 \text{ s.}$



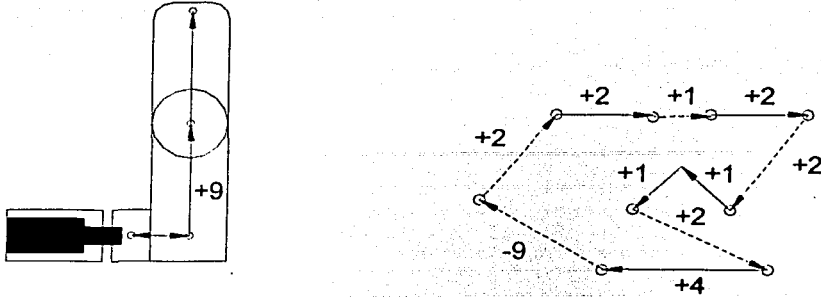
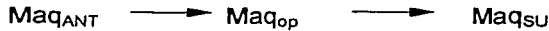


Figura 4.5 Tiempos de ida y vuelta para sincronización antecesora

Una vez sincronizadas las máquinas de máxima jerarquía con su antecesora o sucesora, es necesario completar el grupo:



Para ello considere los siguientes pasos:

9) Si el grupo se completa con una máquina antecesora, entonces se debe sincronizar al grupo tomando en cuenta las restricciones siguientes:

$$9.1) \quad T_{IDA}^{ANT} + T_{IDA}^{MG} + T_{IDA}^{*SU} = T_{pU}$$

$$9.2) \quad T_{IDA}^{*SU} = T_{IDA}^{SU} - T_{IDA}^{ANT}$$

$$9.3) \quad T_{VUELTA}^{ANT} \leq T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{ANT}$$

$$9.4) \quad T_{VUELTA}^{*SU} \leq T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{*SU}$$

$$9.5) \quad B_C M = \hat{B}_C M$$

10) Si el grupo se completa con una máquina sucesora, entonces dicho grupo se debe sincronizar con las siguientes restricciones:

$$10.1) \quad T_{IDA}^{*ANT} + T_{IDA}^{MG} + T_{IDA}^{SU} = T_{pU}$$

$$10.2) \quad T_{IDA}^{*ANT} = T_{IDA}^{ANT} - T_{IDA}^{SU}$$



$$10.3) T_{VUELTA}^{SU} = T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{SU}$$

$$10.4) T_{VUELTA}^{*ANT} = T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{*ANT}$$

$$10.5) B_C M = \hat{B}_C M$$

11) Para los pasos 9) y 10), T_{IDA}^{ANT} y T_{IDA}^{SU} son tiempos asignados.

Para el caso del módulo de impresión, el grupo se completa con una máquina sucesora, según la figura 4.3. Por tanto, la sincronización de dicho grupo se realiza con el paso 10); esto es:

$$T_{IDA}^{B2} + T_{IDA}^{R1} + T_{IDA}^{*B2} = T_p U$$

$$T_{IDA}^{*B2} = T_{IDA}^{B2} - T_{IDA}^{*B2} \quad ; \quad T_{IDA}^{**B2} = 4 \text{ s.} ; T_{IDA}^{*B2} = 5 \text{ s.}$$

$$T_{VUELTA}^{*B2} = T_{CO}^{R1} - T_{IDA}^{*B2} \quad ; \quad (\text{Las bandas se consideran como de ida pura}).$$

$$T_{VUELTA}^{**B2} = T_{CO}^{R1} - T_{IDA}^{**B2}$$

$$B_C M = \hat{B}_C M$$

La figura siguiente muestra la sincronización del grupo $B_2 \longrightarrow R_1 \longrightarrow B_2$:

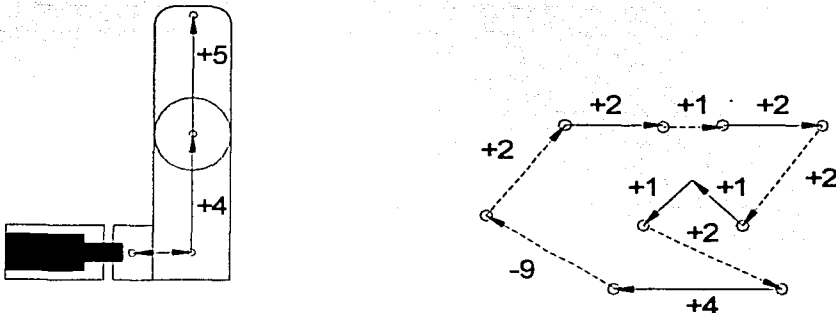
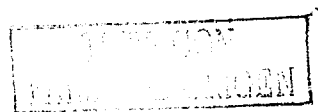


Figura 4.6 Sincronización del grupo $B_2 - R_1 - B_2$



Una vez sincronizado el grupo principal, es necesario integrar las particiones de extensión (si existen) de acuerdo con el vórtice. Para ello considere los siguientes pasos:

12) Si existe una extensión antecesora del grupo sincronizado en el paso 9) de acuerdo con el vórtice, el grupo y la partición se deben sincronizar bajo las siguientes restricciones:

$$12.1) T_{IDA}^{ANT E_i} + T_{IDA}^{*ANT} + T_{IDA}^{MG} + T_{IDA}^{**SU} = T_p U$$

$$12.2) \text{ Si } T_{IDA}^{*ANT} = T_{IDA}^{ANT} - T_{IDA}^{ANT E_i}, \text{ entonces } T_{IDA}^{**SU} = T_{IDA}^{*SU} = T_{IDA}^{SU}$$

$$12.3) \text{ Si } T_{IDA}^{**SU} = T_{IDA}^{*SU} - T_{IDA}^{ANT E_i}, \text{ entonces } T_{IDA}^{*ANT} = T_{IDA}^{ANT}$$

$$12.4) T_{VUELTA}^{ANT E_i} \leq T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{ANT E_i}$$

$$12.5) T_{VUELTA}^{*ANT} \leq T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{*ANT} \text{ y } T_{VUELTA}^{**SU} = T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{**SU}$$

$$12.6) B_C M = \hat{B}_C M$$

13) Si existe una extensión predecesora al grupo sincronizado en el paso 10) de acuerdo con el vórtice, el grupo y la partición se sincronizan bajo las siguientes restricciones:

$$13.1) T_{IDA}^{**ANT} + T_{IDA}^{MG} + T_{IDA}^{*SU} + T_{IDA}^{SU} = T_p U$$

$$13.2) \text{ Si } T_{IDA}^{*SU} = T_{IDA}^{SU} - T_{IDA}^{SU}, \text{ entonces } T_{IDA}^{**ANT} = T_{IDA}^{*ANT} = T_{IDA}^{ANT}$$

$$13.3) \text{ si } T_{IDA}^{**ANT} = T_{IDA}^{*ANT} - T_{IDA}^{SU}, \text{ entonces } T_{IDA}^{*SU} = T_{IDA}^{SU}$$

$$13.4) T_{VUELTA}^{SU} \leq T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{SU}$$

$$13.5) T_{VUELTA}^{**ANT} \leq T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{**ANT}, T_{VUELTA}^{*SU} = T_{CO}^{MG} - T_{IDA}^{*SU}$$

$$13.6) B_C M = \hat{B}_C M$$

De acuerdo con la figura 4.3, el vórtice relaciona el actuador A_{c3} al grupo $\{B_1, R_1, B_2\}$. La sincronización de dichos elementos se realiza según el paso 12), esto es:

$$T_{IDA}^{A_{c3}} + T_{IDA}^{**B_2} + T_{IDA}^{R_1} + T_{IDA}^{*B_2} = 26 \text{ seg}, T_{IDA}^{A_{c3}} = 1 \text{ s.}$$



$$T_{IDA}^{***B_2} = T_{IDA}^{**B_2} - T_{IDA}^{\wedge C_2} ; T_{IDA}^{\wedge C_2} = 1 \text{ seg.} \quad T_{IDA}^{***B_2} = 1 \text{ s.}$$

$T_{VUELTA}^{***B_2}$ (no existe, pues B_2 es de ida pura)

$T_{VUELTA}^{**B_2}$ (no existe, pues B_2 es de ida pura)

$$T_{VUELTA}^{\wedge C_2} \leq T_{CO}^{R_1} - T_{IDA}^{\wedge C_2} ; T_{VUELTA}^{\wedge C_2} \leq 25 \text{ s.}$$

La figura siguiente muestra la sincronización del módulo de impresión:

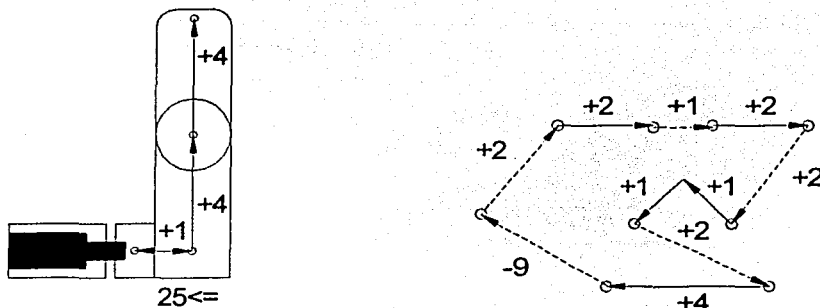


Figura 4.7 Sincronización de los elementos del módulo de impresión.

4.4.4 Sincronización local del módulo de montaje

En esta sección se presenta la sincronización local del módulo de montaje usando el método del vórtice perfecto. Para el módulo de jerarquía menor se tienen los siguientes pasos:

- 1) Identificar el módulo de jerarquía menor al de máxima jerarquía.
- 2) Identificar sensores principales de entrada y salida al módulo.
- 3) Identificar la partición unitaria del proceso del módulo.

TESIS CON
BASE EN ORIGEN

- 4) Agrupar en turno a la partición unitaria por proceso los transportes de entrada (P_{TRE}) y salida (P_{TRS}), esto es

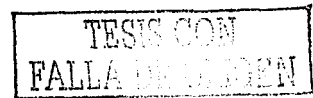
$$P_{TRE} \rightarrow P_{op} - P_{TRS}$$

- 5) Extender, si existen, particiones unitarias de transporte o principales en los extremos del grupo mencionado en el inciso 4).

De acuerdo con la figura 3.4 y con la tabla 4.1 y a los pasos anteriormente señalados, la identificación y caracterización de particiones en el módulo de montaje es la siguiente:

- 1) Módulo de montaje.
- 2) S_9 (entrada); S_{14} (salida).
- 3) $P_{OP} = (S_{11}, R_2, B_{PP6}, S_{c3}), (S_{c3}, R_2, B_{SUB6}, S_{c4}), (S_{c4}, R_2, B_{PP7}, S_{c5})$.
- 4) $P_{TR1} = (S_{10}, B_3, B_{PP5}, S_{11}) \rightarrow P_{op} \rightarrow (S_{12}, R_3, PT, S_{13})$
- 5) $P_{TRE3} = (S_9, A_{C4}, B_{PP5}, S_{10}) \rightarrow P_{TR1} \rightarrow P_{op} \rightarrow P_{TR2}$
- 6) $P_{TRE3} \rightarrow P_{TR1} \rightarrow P_{op} \rightarrow P_{TR2} \rightarrow (S_{13}, B_4, PT, S_{14}) = P_{TR4}$

Note en el paso 5) que, el grupo extendido $P_{TR3} \rightarrow P_{TR1} \rightarrow P_{op} \rightarrow P_{TR2} \rightarrow P_{TR4}$ relacionado con vórtice perfecto del tipo antecesor o sucesor. La figura muestra dichas relaciones:



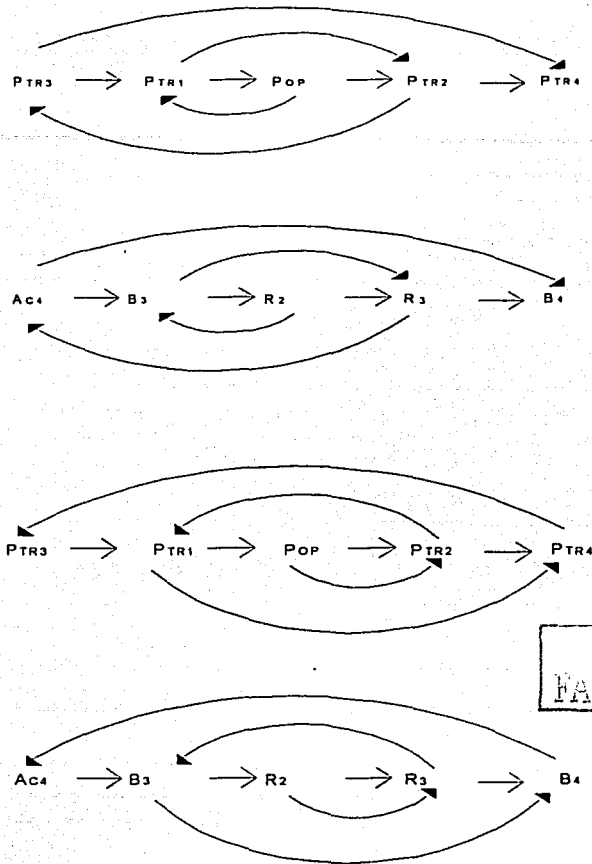


Figura 4.8 Relación del módulo de montaje con vórtice antecesor o sucesor

Se utilizará para sincronizar el módulo de montaje, el vórtice antecesor. Para relacionar el vórtice antecesor con los tiempos de proceso del módulo de montaje se consideran los siguientes pasos:

- 1) Identificar la(s) máquina(s) de proceso en el módulo de jerarquía menor.
- 2) El origen del vórtice es en la máquina de mayor tiempo de operación.
- 3) Sincronizar la máquina de mayor tiempo de operación tal que:

$$3.1) T_{pu} = \sum T_{co}$$

$$3.2) B_{CM} = \hat{B}_{CM}$$

Según los pasos anteriormente señalados, el robot R_2 es la máquina de operación con mayor tiempo de proceso (montaje). Por tanto, el origen de vórtice está en R_2 (ver figura 4.8). Los tiempos del ciclo operativo de R_2 se muestran en la figura siguiente:

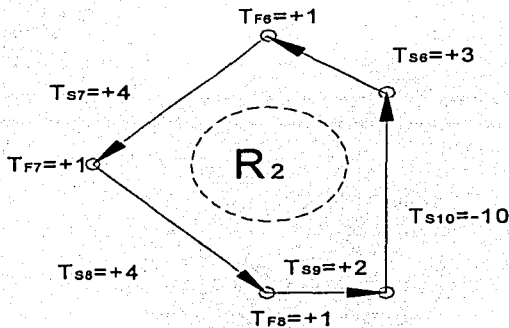


Figura 4.9 Asignación de tiempos al ciclo de R_2 bajo T_{pu}

La siguiente proposición es de gran importancia en este trabajo:

“En la sincronización local de un módulo de jerarquía menor, los tiempos fijos pueden ser modificados en sentido incremental o decremental siempre y cuando dicha modificación no afecte la operación principal y los parámetros cinemáticos de la maquinaria”.

La proposición anterior indica que un tiempo fijo (de la máquina de jerarquía menor) puede ser modificado, esto si no se afecta la operación principal.

En este caso, el vórtice relaciona el robot R_2 con la banda B_4 . Considere la siguiente proposición:



“Para sincronizar antecesora o sucesoramente un módulo de menor jerarquía, los tiempos de ciclo de la máquina principal se modifican hasta lograr que :

$$1) T_{IDA}^{ANT} + T_{IDA}^{MG} = T_pU \quad o$$

$$2) T_{IDA}^{SU} + T_{IDA}^{MG} = T_pU$$

Bajo la proposición anterior las máquinas B_3 y R_2 se sincronizan de la manera siguiente:

$$T_{IDA}^{B_3} + T_{IDA}^{R_2} = T_pU ; T_{IDA}^{R_2} = 16 \text{ S}; T_{IDA}^{B_3} = 10 \text{ s.}$$

La figura 4.10 muestra la sincronización antecesora de R_2 y B_3 , respectivamente:

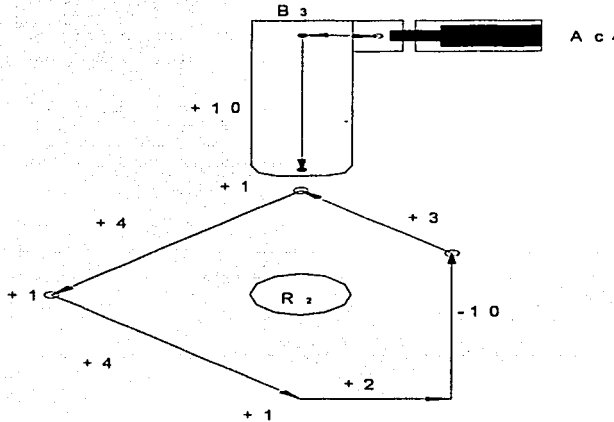
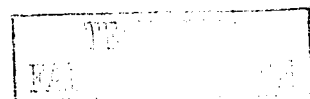


Figura 4.10 Sincronización de A_{c1} y R_1 bajo modificación de T_{IDA}^{R1}

Una vez sincronizada la máquina R_2 con su antecesora B_3 , de acuerdo con el vórtice (ver figura 4.8), la siguiente máquina a sincronizar es el robot R_3 (sucesor).



Para mostrar las modificaciones tanto en la ida como en la vuelta de R_2 la sincronización de grupo $P_{TR1} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TR2}$ se realizará de la manera siguiente:

$$T_{IDA}^{*B3} + T_{IDA}^{R2} + T_{IDA}^{R3} = T_p U ;$$

$$T_{IDA}^{*B3} = T_{IDA}^{B3} - T_{IDA}^{R3} ; T_{IDA}^{*B3} = +4 ; T_{IDA}^{R3} = +6 \text{ s.}$$

$$T_{VUELTA}^{R3} = T_{CO}^{R2} - T_{IDA}^{R3} = 26\text{s} - 6\text{s} = 20 \text{ s.}$$

La figura siguiente muestra la sincronización del grupo $P_{TR1} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TR2}$:

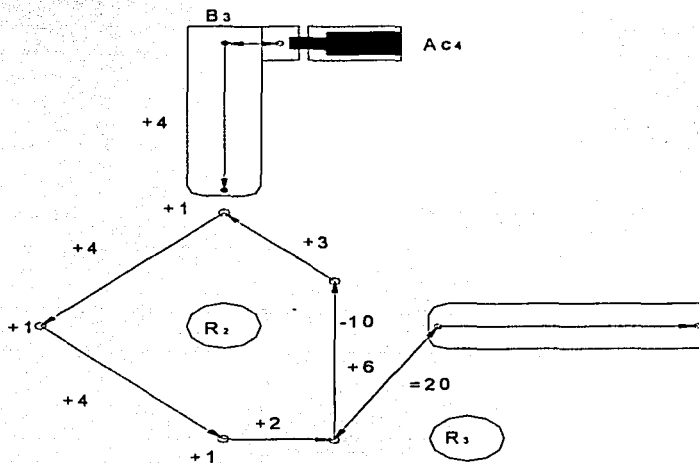
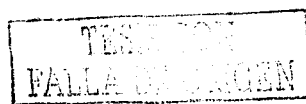


Figura. 4.11 Sucesora R_3 con R_2 Y B_3

Para sincronizar el módulo de montaje, es necesario relacionar a través del vórtice, la máquina de extensión siguiente. De acuerdo a la figura 4.8, dicha máquina es el actuador A_{c4} (antecesora).

El grupo de máquinas por sincronizar es el siguiente: $P_{TR3} \rightarrow P_{TR1} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TR2}$.

$$T_{IDA}^{AC4} + T_{IDA}^{B3} + T_{IDA}^{R2} + T_{IDA}^{R3} = T_p U$$



$$T_{IDA}^{*R3} = T_{IDA}^{R3} - T_{IDA}^{AC4}; T_{IDA}^{AC4} = 3 \text{ s.}, T_{IDA}^{R3} = 3 \text{ s.};$$

$$T_{VUELTA}^{AC4} \leq T_{CO}^{R2} - T_{IDA}^{AC4} \leq 23 \text{ s.}$$

$$T_{VUELTA}^{R3} \leq T_{CO}^{R2} - T_{IDA}^{R3} \leq 23 \text{ s.}$$

En la figura 4.12 se muestra la sincronización de dicho grupo:

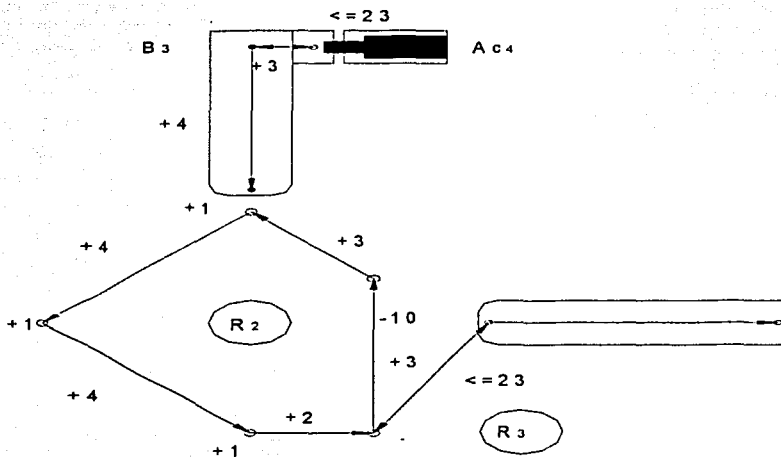


Figura. 4.12 Antecesora AC_4 con R_3 , R_2 y B_3

Para terminar de sincronizar el módulo de montaje, es necesario relacionar a través del vórtice, la máquina de extensión final. De acuerdo a la figura 4.8, dicha máquina es la banda B_4 (sucesora). La distribución de tiempos es:

$$T_{IDA}^{*AC4} + T_{IDA}^{B3} + T_{IDA}^{R2} + T_{IDA}^{*R3} + T_{IDA}^{B4} = TpU$$

$$T_{IDA}^{*AC4} = T_{IDA}^{AC4} - T_{IDA}^{B4}; T_{IDA}^{B4} = 2 \text{ s.}, T_{IDA}^{*AC4} = 3 - 2 = 1 \text{ s.}$$

$$T_{VUELTA}^{AC4} \leq T_{CO}^{R2} - T_{IDA}^{AC4} \leq 25 \text{ s.}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

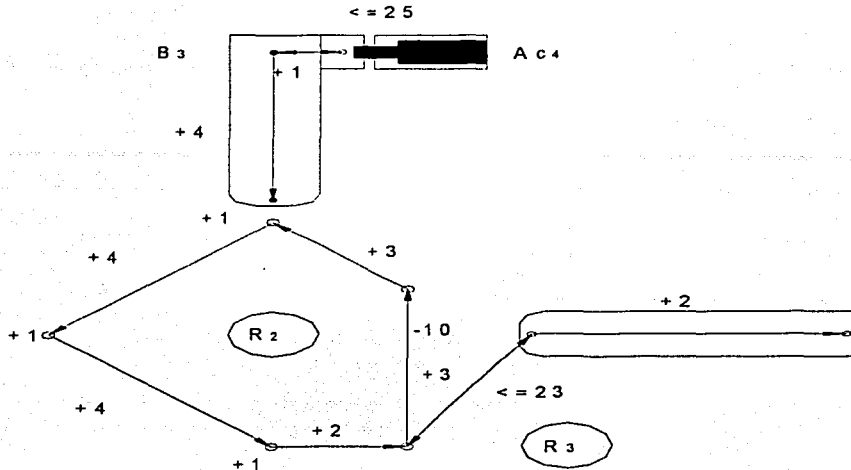


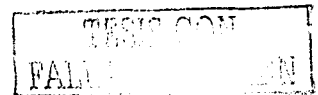
Figura 4.13. Sincronización completa del módulo de montaje

4.4.5 Sincronización local del módulo de corte

En esta sección se presenta la sincronización local del módulo de corte usando el método del vórtice. Para el módulo de jerarquía menor se tienen los siguientes pasos:

- Identificar sensores principales de entrada y salida al módulo.
- Identificar el módulo de jerarquía menor.
- Identificar la partición unitaria del proceso del módulo.
- Agrupar en turno a la partición unitaria por proceso los transportes de entrada (P_{TRE}) y salida (P_{TRS}), esto es:

$$P_{TRE} \rightarrow P_{op} - P_{TRS}$$



- Extender, si existen, particiones unitarias de transporte o principales en los extremos del grupo mencionado en el inciso 4).

De acuerdo con la figura 3.4 , con la tabla 4.1 y a los pasos anteriormente señalados, la identificación y caracterización de particiones en el módulo de montaje es la siguiente:

Módulo de corte:

S_1 (entrada); S_4 (salida).

$P_{OP} = (S_3, A_{C2}, B_{SUB5}, S_{c1})$.

$P_{TR1} = (S_2, B_1, B_{PP3}, S_3) \rightarrow P_{op} \rightarrow (S_{C1}, B_1, B_{SUB5}, S_4)$

$P_{TRE1} = (S_1, A_{C1}, B_{PP3}, S_2) \rightarrow P_{TR1} \rightarrow P_{op} \rightarrow P_{TR2}$

Note en el paso 5), que el grupo extendido $P_{TRE1} \rightarrow P_{TR1} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TR2}$ está sincronizado con vórtice perfecto del tipo antecesor. La figura siguiente muestra dicha sincronización:

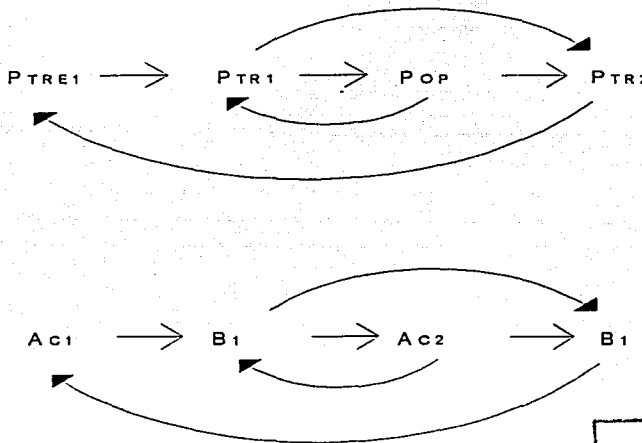
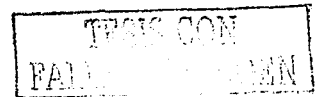


Figura 4.14. Vórtice para el módulo de corte



Según los pasos anteriormente señalados, el actuador A_{C2} es la máquina de operación con tiempo de proceso (corte). Por tanto, el origen de vórtice está en A_{C2}

(ver figura 4.14). Los tiempos de ciclo operativo de Ac_2 se muestran en la figura siguiente:

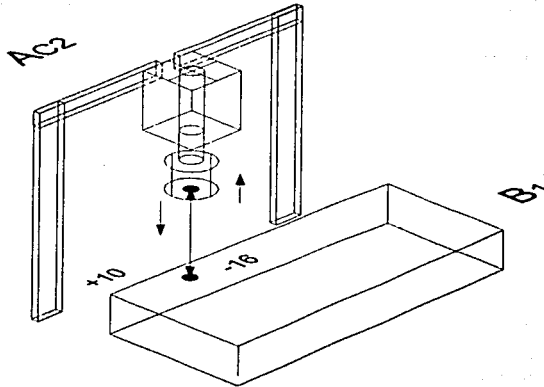


Figura 4.15 Asignación de tiempos al ciclo de Ac_2 bajo T_{pu}

$$T_{IDA}^{B1} + T_{IDA}^{*AC2} = T_{pu} ; T_{IDA}^{B1} = +5 \text{ s.}$$

$$T_{IDA}^{*AC2} = T_{IDA}^{AC2} - T_{IDA}^{B1} ; T_{IDA}^{*AC2} = +5 \text{ s.}$$

La figura siguiente muestra la sincronización antecesora de Ac_2 y B_1 , respectivamente:

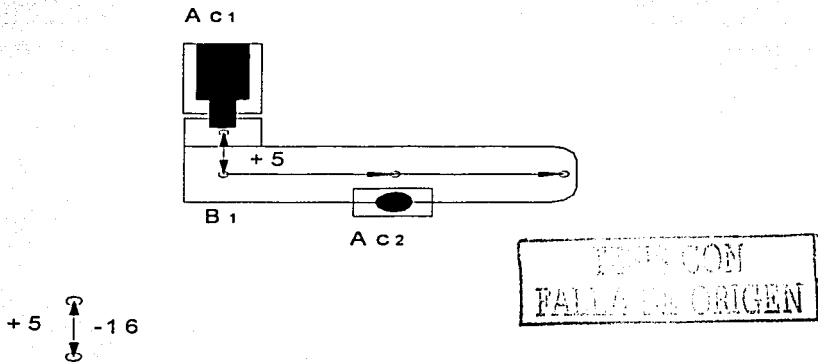


Figura 4.16 Sincronización de Ac_2 y B_1 bajo modificación de T_{IDA}^{B1}

Una vez sincronizada la máquina A_{C2} con su antecesora B_1 , de acuerdo con el vórtice, la siguiente máquina a sincronizar es la misma banda B_1 (sucesora). Para mostrar modificaciones tanto a la ida como a la vuelta de A_{C1} la sincronización de grupo $P_{TR1} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TR2}$ se realizará de la manera siguiente.

$$T_{IDA}^{B1} + T_{IDA}^{*B1} + T_{IDA}^{*AC2} = TpU$$

$$T_{IDA}^{*B1} = T_{IDA}^{B1}$$

$$T_{IDA}^{*B1} = +4 \quad ; \quad T_{IDA}^{*AC2} = +1 \text{ s.}$$

La figura siguiente muestra la sincronización del grupo $P_{TR1} \rightarrow P_{OP} \rightarrow P_{TR2}$:

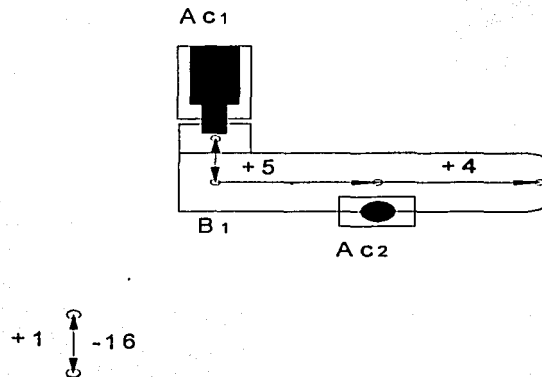


Figura. 4.17 Sucesora B_1 con A_{C2} y B_1

Directamente obtenemos la sincronización del módulo.

TESIS CON
FALLA EN ORIGEN

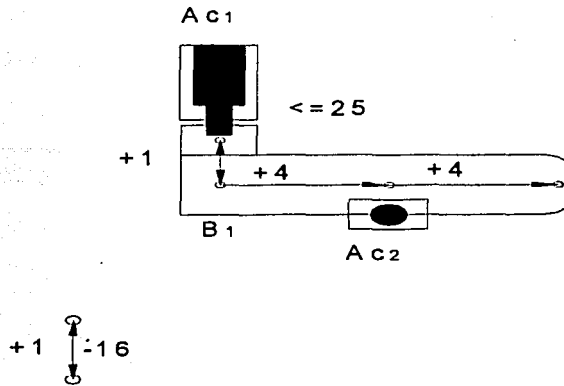


Figura 4.18 Sincronización completa del módulo de corte

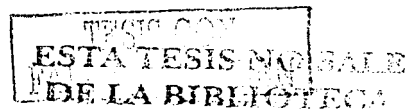
4.4.6 Sincronización global

El interés en esta sección es discutir en breves términos la sincronización global del sistema productivo motivo de estudio. Dicha sincronización debe contemplar los siguientes aspectos:

- 1) Balancear la línea de producción.
- 2) Fijar los tiempos de vuelta.
- 3) Encontrar los condicionantes de control.
- 4) Sincronizar toda la línea a TpU y determinar sensores de sincronización.

4.4.6.1 Balanceo de la línea de producción y tiempo de ida

El término "balancear" significa distribuir piezas de trabajo en el sistema productivo sobre lugares estratégicos. Dicha distribución debe satisfacer los siguientes puntos [31]:



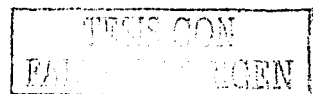
- Evitar alcances sobre la línea de producción.
- La distribución de piezas debe ser funcional de tal manera que el TpU se satisfaga entre el primer y segundo componente.

Para lograr un balanceo funcional se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Realizar una crónica de ida de los módulos localmente sincronizados.
- 2) Determinar el tiempo total de recorrido de ida.
- 3) Fijar un componente (producto terminado) en la última posición estratégica (lugar del último sensor principal).
- 4) Colocar un segundo componente (materia prima, producto preparado o subproducto) sobre la línea de producción en un tiempo tal que:

$$T_{SP}^i = \sum T_{IDA} - TpU$$

- 5) Si el componente, de acuerdo con T_{SP} , no se localiza en un lugar estratégico (excepto el último), entonces:
 - 5.1) La línea está desbalanceada.
 - 5.2) La sincronización local es insuficiente para sincronización global.
- 6) Si el componente se localiza en un lugar estratégico, entonces:
 - 6.1) La línea puede ser balanceada.
 - 6.2) El lugar está, de acuerdo con el vórtice y restricción TpU, en una intersección de módulos locales.
- 7) Localice una tercer pieza de trabajo en el tiempo:



$$T_{SP}^2 = T_{SP}^1 - T_{pU}$$

- 8) Verificar los pasos del 5 al 6.
- 9) Si el paso 6 es satisfecho, entonces la línea esta balanceada entre módulos.
- 10) Repetir el paso 7 si existen más módulos.
- 11) Generar una crónica de procesos y verificar si el balance de línea ha sido satisfecho.

Los pasos anteriormente señalados están sujetos al método del vórtice perfecto bajo restricción de T_{pU} .

Para el caso del sistema productivo motivo de estudio, los pasos anteriores se aplican de la manera siguiente:

1) Crónica de ida:

En t_0 el actuador A_{C1} transporta a B_{PP3} , en t_1 la banda B_1 , transporta a B_{PP3} . En t_5 el actuador A_{C2} realiza operación de corte sobre B_{PP3} , obteniendo la subparte B_{SUB5} . En t_{22} la banda B_1 transporta a la subparte B_{SUB5} . En t_{26} el actuador A_{C3} transporta a la parte B_{PP2} . En t_{27} la banda B_2 transporta a B_{PP2} . En t_{31} el robot R_1 realiza la operación de impresión obteniendo la subparte B_{SUB4} . En t_{48} la banda B_2 transporta a la subparte B_{SUB4} . En t_{52} el actuador A_{C4} transporta a la parte B_{PP5} . En t_{53} la banda B_3 transporta a la parte B_{PP5} . En t_{57} el robot R_2 realiza la operación de montaje obteniendo el producto terminado PT. En t_{73} el robot R_3 transporta a PT. En t_{76} la banda B_4 transporta a PT hacia la salida del sistema de producción en 2 segundos.

2) Tiempo total de recorrido de ida: 78 segundos.



3) La figura 4.19 muestra la distribución de piezas de acuerdo con los pasos 4), 6) y 7).

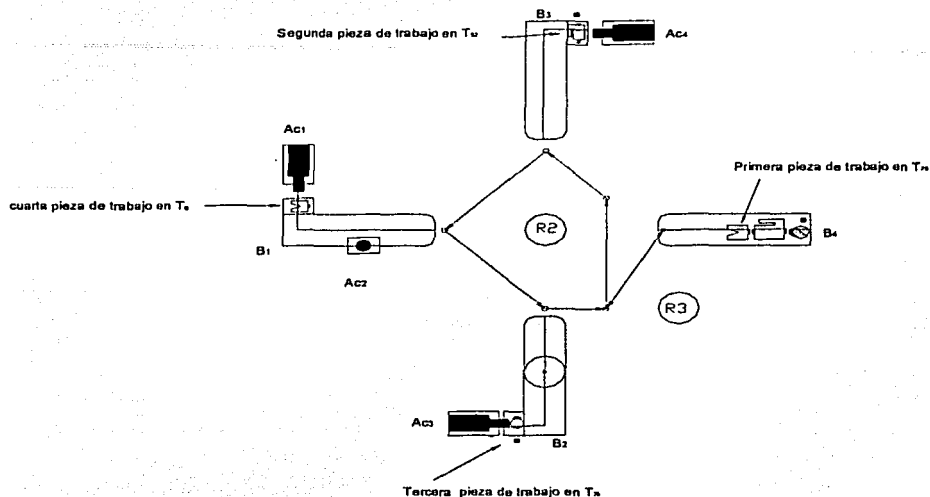


Figura. 4.19 Localización de piezas de trabajo para balanceo de línea

Por otro lado, los tiempos de vuelta asociados con las trayectorias de ida, serán analizados en el capítulo 6, en tanto, los condicionales de control son usados para:

- 1) Controlar las activaciones o desactivaciones de la maquinaria por medio de sensores en términos individuales.
- 2) Controlar en términos globales (por lo general en cada inicio y finalización de operaciones en los módulos) la maquinaria de proceso de tal forma que el TpU sea satisfecho y la línea de producción sea balanceada.

Por cada condicional global, se asociarán el tercer tipo de sensores, es decir, los sensores relacionados a la sincronización de operaciones.



4.5 Distribución de sensores de sincronización y bandera sobre el sistema

Los sensores de sincronización se caracterizan por ordenar el flujo de materiales y operaciones de los elementos de trabajo de tal forma que el volumen de producción sea satisfecho. Los sensores de sincronización pueden ser principales, de completud o nuevos sensores. La importancia de los sensores de sincronización radica en garantizar el TpU entre la primera pieza de trabajo que recorre la línea de producción y su sucesora. El número de sensores de este tipo no puede encontrarse por alguna relación.

Los sensores bandera están relacionados con los sistemas de seguridad operativos de la maquinaria y de los recursos humanos. También se caracterizan por emitir señales intermedias necesarias para un control rígido.

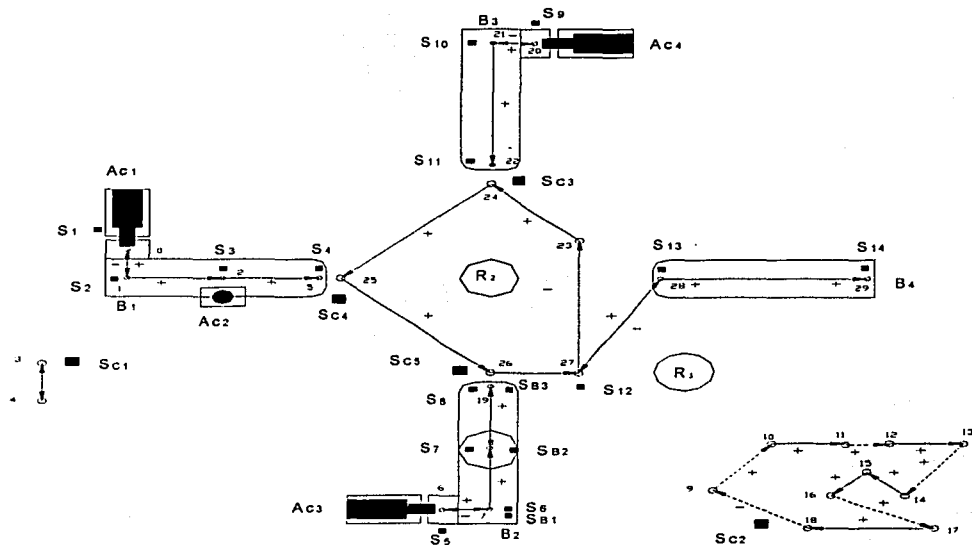
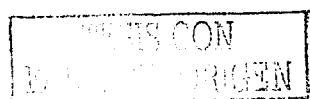


Figura. 4.20 Distribución de sensores tipo bandera



De la figura anterior, se observa que se integraron 3 sensores sobre el sistema, S_{B1} , S_{B2} , y S_{B3} ; con el fin de generar señales intermedias que nos permitan un control rígido.

TECNOLOGIA
FALLA DE CONTROL

Capítulo 5

Condicionales y ecuaciones de estado

Introducción. En este capítulo se presenta un análisis direccionado con el estudio de las ecuaciones de estado asociadas con un PLC. Son discutidos dos tipos de condicionales: 1) el ordinario y, 2) el bicondicional. Para generar las ecuaciones de estado se utiliza el álgebra de Boole sistematizada en el conjunto binario {1,0}, [10]. Finalmente, se construyen los modelos de control para las máquinas asociadas con el sistema productivo motivo de estudio.

5.1. El Sistema de control

En esta sección se presentan algunas consideraciones relacionadas con el control de sistemas productivos. Las principales tareas de un sistema de control son:

- 1) Emisión / recepción de señales por sensores.
- 2) Procesamiento de señales.
- 3) Emisión / recepción de señales procesadas a los elementos de trabajo.

Para poder controlar, monitorear, coordinar y sincronizar las operaciones de la maquinaria de una línea de producción, es necesario distribuir sensores, los cuales emitirán señales operativas. Un sistema de procesamiento de señales es el encargado de recibir las emisiones de señales de los sensores, y una vez procesadas, dichas señales son transmitidas a los elementos de mando asociados con la maquinaria de trabajo.

Cada señal emitida por un sensor implica una acción o evento dentro de la línea de producción. Por tanto, el control de todas las señales por medio de algún sistema



de procesamiento implica el control de los elementos de trabajo en todos los aspectos de operación.

Por otro lado, las tareas de procesamiento de señales son realizadas generalmente por PLC,s (Programing Logic Control) o microprocesadores [10]. Las funciones principales de PLC consisten en recibir señales de los sensores y procesarlas de acuerdo con ciertos condicionantes de proceso. Las señales evaluadas y procesadas son emitidas a los diferentes elementos de mando de la maquinaria de trabajo.

Para poder caracterizar un sistema de control es necesario definir una entidad de control; esto es, la tripleta (S, A, Y) es llamada una entidad de control global si:

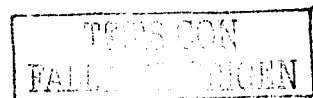
- 1) S es un conjunto de sensores.
- 2) A es un conjunto de estados.
- 3) Y es un conjunto de salidas.

Por ejemplo, la tripleta (S_1, A_1, B_1) es una entidad de control relacionada con el sistema de transporte, con el sensor S_1 , con la condición de estado A_1 y con la salida de activación de mando de la banda B_1 . Las acciones, sensor, transmitir (señales), procesar, mandar señales y activación de un elemento de mando están relacionadas a una entidad de control.

Un estado $A_1 \in A$ es un conjunto de condiciones que controlan la entrada de las señales y su salida. Dichas condiciones dependen de las restricciones operativas de la maquinaria y de las variables de producción.

Estrictamente hablando, un sistema de control se puede representar por:

$$A = \{ S, A, Y, \delta, \lambda \}$$



Aquí, Δ es un autómata y $\lambda: A \times S \rightarrow A$ y $\delta: A \times S \rightarrow Y$ son dos funciones de transición interna de señales [11].

La estructura definida anteriormente, está asociada a un autómata representativo de muchos problemas. Para el caso del sistema de control de procesos estudiado en este trabajo de tesis, el autómata debe representar un sistema de señales binarias. Por tanto, cada conjunto S , A y Y contiene vectores formados por combinaciones binarias tomadas del conjunto $\{1, 0\}$.

Considere que los conjuntos S , A y Y contiene vectores como los mencionados anteriormente, además, las dimensiones de dichos conjuntos son k , m y n . La representación,

$$\underline{A} = \{k, m, n, \delta, \lambda\}$$

es llamada "autómata estructurado" [11]. Dicho autómata es la base operacional de un PLC. El PLC debe controlar cada una de las "entidades de control" asociadas con un sistema de manufactura tanto en forma individual como en forma colectiva. Si una línea de producción está integrada por una gran cantidad de "entidades de control" agrupadas en módulos de producción, entonces de acuerdo con las capacidades operativas del procesador de señales, se debe utilizar un PLC para cada módulo caracterizado.

Considere las siguientes definiciones:



Un módulo de máxima jerarquía se dice controlado si:

- 1) Todas las "entidades de control" han sido caracterizadas y controladas.
- 2) El sistema de control satisface el T_{pU} .

Un sistema de control satisface el volumen de producción si:

$$T_{pU} = \sum T_F + I_{TS}$$

En este trabajo de tesis se resolverá el siguiente problema:

"Dados S , Y , E_{∞} , encuentre:

C_{co} y $E_{E \in A}$, tal que:

1) $R_c = \hat{R}_c$

2) $T_p U = \tau_p \hat{U}$

Aquí, "Eco" es un conjunto de entidades de control, C_{co} son las condicionantes y $E_{E \in A}$ es el conjunto de ecuaciones de estado.

5.2 Condicionantes y ecuaciones de estado

Un condicionante es un criterio que determina la forma operativa de una o un conjunto de "entidades de control". Por ejemplo:

"Si S_1^{\wedge} , entonces B_1^{\wedge} "

es un condicionante de operación asociado con la entidad (S_1, A_1, B_1) . El símbolo S_1^{\wedge} representa activación del sensor S_1 y B_1^{\wedge} activación de la banda B_1 .

Otro ejemplo es el siguiente:

" B_1^{\wedge} si y solo si S_1^{\wedge} "



Los condicionantes mencionados anteriormente se pueden representar por los símbolos " \Rightarrow " y " \Leftrightarrow " denominados condicional ordinario y bicondicional, respectivamente. El antecedente del condicional " \Rightarrow " por lo general son las

señales de los sensores y el consecuente la activación de los elementos de trabajo.

Por otro lado, la forma de operar del bicondicional " \Leftrightarrow " será equivalente al símbolo " $=$ ". Considere ahora la siguiente expresión:

$$\text{"Si } S_1^A \text{ y } S_2^A \text{, entonces } B_1^A \text{"}$$

la cual se puede escribir de la forma siguiente:

$$\text{"Si } S_1^A \wedge S_2^A \Rightarrow B_1^A \text{"}$$

El símbolo " \wedge " (y) es un conectivo lógico y conecta dos formas de activación. La expresión :

$$\text{"Si } S_1^A \vee S_2^A \Rightarrow B_1^A \text{"}$$

integra el conectivo " \vee " (o).

Rigurosamente hablando, los conectivos \wedge y \vee son operaciones, estos es:

$$1) \vee : \{V, F\} \times \{V, F\} \rightarrow \{V, F\} \text{ y } \wedge : \{V, F\} \times \{V, F\} \rightarrow \{V, F\}$$

dadas por:

1	2	3
p	q	p ∨ q
V	F	V
F	V	V
V	V	V
F	F	F

Tabla 5.1. Tabla de valores para " \vee "

1	2	3
p	q	p ∧ q
V	F	F
F	V	F
V	V	V
F	F	F

Tabla 5.2. Tabla de valores para " \wedge "

Aquí, los símbolos "V" y "F" representan la veracidad o falsedad de las proposiciones p y q, respectivamente. Otra función usada para caracterizar fórmulas del tipo "enunciados" es la siguiente :

$$\neg : \{V, F\} \rightarrow \{V, F\}$$

definida por:

1	2
p	$\neg p$
V	F
F	V

Tabla 5.3. Tabla de valores para la función "negación"

Dicha función es llamada negación. La estructura $(\{V, F\}, \wedge, \vee, \neg)$ es llamada álgebra de Boole sobre el conjunto de los enunciados [10] y [22].

Considere ahora la siguiente equivalencia:

$$(\{V, F\}, \wedge, \vee, \neg) \Leftrightarrow (A_1, \bullet, +, -)$$



La operación $\bullet : A_1 \times A_1 \rightarrow A_1$ donde $A_1 = \{1, 0\}$ es llamada conjunción, $+: A_1 \times A_1 \rightarrow A_1$ es llamada disyunción y $- : A_1 \rightarrow A_1$ es la negación. Las operaciones antes mencionadas son representadas por medio de las siguientes tablas [10]:

1	2	3
x_1	x_2	$x_1 + x_2$
1	0	1
0	1	1
1	1	1
0	0	0

Tabla 5.4. Tabla de valores para "+"

1	2	3
x_1	x_2	$x_1 \bullet x_2$
1	0	0
0	1	0
1	1	1
0	0	0

Tabla 5.5. Tabla de valores para "•"

1	2
x	-x
1	0
0	1

Tabla 5.6. Tabla de valores para la función "negación"

Por otro lado, la operación,

$$\oplus : A_2 \times A_2 \rightarrow A_2$$

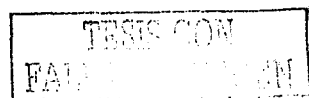
definida por:

1	2	3
x_1	x_2	$x_1 \oplus x_2$
1	1	0
0	0	0
1	0	1
0	1	1

Tabla 5.7 Valores para la operación disyunción exclusiva

Es llamada " disyunción exclusiva" o mod(2) [11]. Es importante señalar que x_1 y x_2 representan señales. La estructura $\{A_1, \cdot, \oplus, -\}$ es conocida como álgebra de Zegalkin.

Las propiedades fundamentales del álgebra de Boole y de Zegalkin son demostradas en [10].



Una expresión de la forma:

"Si $(S_1^A \text{ y } S_2^A)$ o S_3^A , entonces B_1^A "

se puede representar de la manera siguiente:

$$"(S_1^A \bullet S_2^A) + S_3^A \Rightarrow B_1^A"$$

o, equivalentemente:

$$y_1 \Leftrightarrow (x_1 \bullet x_2) + x_3$$

Aquí, $y_1 \Leftrightarrow B_1^A$, $x_1 \Leftrightarrow S_1^A$, $x_2 \Leftrightarrow S_2^A$, y $x_3 \Leftrightarrow S_3^A$.

Las equivalencias anteriores son válidas si y solo si $(\{V,F\}, \wedge, \vee, \neg) \Leftrightarrow (A_1, \bullet, +, -)$. Cabe señalar que "y₁" integra los dos estados de activación de B₁; es decir;

$$y_1 = \{B_1^A, B_1^D\} \Leftrightarrow y_1 = \{1, 0\}.$$

También x₁ representa los estados de activación de los sensores, por ejemplo;

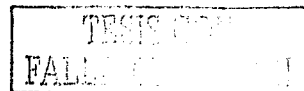
$$x_1 = \{S_1^A, S_1^D\} \Leftrightarrow x_1 = \{1, 0\}.$$

Si el símbolo \Leftrightarrow es remplazado por "=", entonces,

$$y_1 = (x_1 \bullet x_2) + x_3$$

Dicha expresión es llamada "ecuación de estado" [1] y [20].

La ecuación anterior puede ser representada a través de la siguiente tabla:



Emisión de señales			Estados		Salida de señales
x_1	x_2	x_3	$x_1 \bullet x_2$	$(x_1 \bullet x_2) + x_3$	y_1
1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1
1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1
0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	1	1
0	1	1	0	1	1

Tabla 5.8 Código de una ecuación de estado

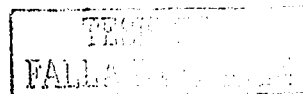
De acuerdo con la tabla anterior, la activación de la banda B_1 está determinada por el estado $(x_1 \bullet x_2) + x_3$. Existen 5 formas de activar B_1 según la ecuación de estado. Por otro lado, el sistema de control de un proceso productivo está compuesto por:

- 1) Sensores (emisión de señales).
- 2) Ecuaciones de estado (estados y procesamientos de señales).
- 3) Elementos de mando (maquinaria y señales de salida).

5.2.1 Condicionantes de la sincronización global

Para poder sincronizar los movimientos de la maquinaria, es necesario condicionar los eventos de sensado. Dichos condicionamientos están en función de los siguientes puntos:

- Tiempos de procesos.
- Balanceo de la línea de producción.
- Criterios de seguridad.



- Restricciones de control.
- Formas de control (rígida, semi-rígida, no rígida).

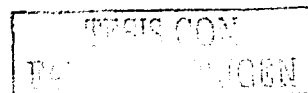
Cabe mencionar que los tiempos asociados con el inicio y término de las operaciones principales también deberán ser considerados. La sincronización global de operaciones consiste en determinar todos los eventos de activación / desactivación de cada entidad de control y, posteriormente, coordinar y controlar dichas entidades en términos globales.

Un sistema de manufactura sincronizado debe satisfacer, de acuerdo con el capítulo 4, las características siguientes:

- 1) Satisfacer el TpU.
- 2) Toda la maquinaria de trabajo debe estar controlada.
- 3) Las piezas de trabajo deben estar distribuidas sobre la línea de operación de tal forma que no existan alcances o cuellos de botellas.
- 4) Toda entidad de control debe estar caracterizada.
- 5) Se deben distribuir sensores de sincronización.

Los condicionales de sincronización global son aquellas proposiciones que determinan las activaciones de la maquinaria de acuerdo con criterios tales que:

- 1) El tiempo entre la primera y la segunda pieza de trabajo debe ser exactamente el TpU.
- 2) Condicionar entidades de control, las cuales deben permitir iniciar nuevamente parte de la maquinaria una vez sensado el primer producto finalizado.
- 3) Condicionar los módulos de menor jerarquía de acuerdo con el módulo de máxima jerarquía.



5.3 Condicionantes para el sistema productivo

Para poder controlar, coordinar y sincronizar las operaciones de manufactura en un sistema productivo, como se ha mencionado en secciones anteriores, es necesario elaborar criterios o condicionales de control, los cuales permiten ordenar en lugar y tiempo las activaciones de la maquinaria.

Por ejemplo, un sensor condiciona la salida o no salida de una máquina de acuerdo con varios factores:

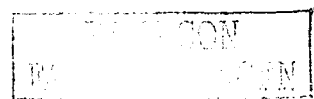
- 1) La presencia de una pieza.
- 2) El tiempo de manufactura.
- 3) Criterio de seguridad.
- 4) Condiciones globales.

En un sistema de manufactura existen cuatro tipos de condicionantes:

- 1) Condicional unitario.
- 2) Condicional por proceso.
- 3) Condicional de módulo de producción.
- 4) Condicional global.

El primer tipo relaciona la activación de una máquina con la activación de un solo sensor. El segundo tipo de condicionamiento relaciona una máquina o varias máquinas con la activación de uno o varios sensores. El tercer tipo integra cuando menos un sensor de sincronización local o modular. Finalmente, el condicional tipo global integra cuando menos dos sensores; uno en el almacén de materias primas y otro en el almacén de productos terminados.

Es posible caracterizar los condicionales unitarios en un sistema productivo serial a través del recorrido de ida; pues se supone que toda la maquinaria ha sido activada una sola vez en dicho recorrido. En otras palabras el $N_{CU} = N_{SP} + N_{SC}$. Aquí, N_{SP} es el número de sensores primarios y N_{SC} el número de sensores de completud.



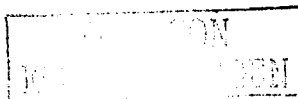
Cabe aclarar que los condicionales anteriormente señalados están asociados exclusivamente con los sensores primarios y de completud. La tabla siguiente muestra los elementos de sensado y maquinaria relacionada con los condicionales unitarios:

Elemento de sensado	Máquina	Pareja de condicional	Criterio de condicional
S ₁	Ac ₁	(S ₁ , Ac ₁)	Primario
S ₂	B ₁	(S ₂ , B ₁)	Primario
S ₃	Ac ₂	(S ₃ , Ac ₂)	Primario
Sc ₁	B ₁	(Sc ₁ , B ₁)	Completud
S ₄	Ac ₃	(S ₄ , Ac ₃)	Primario
S ₅	Ac ₃	(S ₅ , Ac ₃)	Primario
S ₆	B ₂	(S ₆ , B ₂)	primario
S ₇	R ₁	(S ₇ , R ₁)	Primario
Sc ₂	B ₂	(S ₇ , B ₂)	Completud
S ₈	Ac ₄	(S ₈ , Ac ₄)	primario
S ₉	Ac ₃	(S ₉ , Ac ₄)	primario
S ₁₀	B ₃	(S ₁₀ , B ₃)	Primario
S ₁₁	R ₂	(S ₁₁ , R ₂)	Primario
Sc ₃	R ₂	(Sc ₃ , R ₂)	Completud
Sc ₄	R ₂	(Sc ₄ , R ₂)	Completud
Sc ₅	R ₂	(Sc ₅ , R ₂)	Completud
S ₁₂	R ₃	(S ₁₂ , R ₃)	Primario
S ₁₃	B ₄	(S ₁₃ , B ₄)	Primario

Tabla 5.9 Condicionales unitarios en el recorrido de ida

Para el caso de condicionales de proceso se tienen los siguientes:

- 1) S₃, B₁, Ac₂ (S₃, B₁, Ac₂)
- 2) S₇, B₂, R₁ (S₇, B₂, R₁)
- 3) S₁₁, B₃, R₂ (S₁₁, B₃, R₂)



La condición modular es la siguiente:

4) S_4, S_5, A_{C3} (S_4, S_5, A_{C3})

5) S_8, S_9, A_{C4} (S_8, S_9, A_{C4})

Finalmente, un condicional tipo global pueden ser:

6) $S_1, S_5, S_9, S_{14}, A_{C4}$ $(S_1, S_5, S_9, S_{14}, A_{C4})$

La forma operativa de las condicionales es la siguiente:

1) Si $S_2 \rightarrow 1$, entonces $B_1 \rightarrow 1$

2) Si $S_2 \rightarrow 0$, entonces $B_1 \rightarrow 0$

Lo anteriormente descrito es equivalente a:

1) Si el sensor S_2 esta activo, entonces la banda B_1 se activa.

2) Si el sensor S_2 no esta activo, entonces la banda B_1 no se activa.

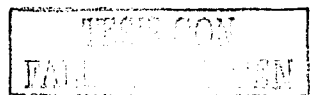
Por otro lado, los condicionales por proceso, modulares y globales se caracterizan por integrar más de un sensor o más de una máquina. Por ejemplo:

S_7, B_2, R_1 (S_7, B_2, R_1)

Si $S_7 \rightarrow 1$, entonces, $B_2 \rightarrow 0$ y $R_1 \rightarrow 1$.

Es decir,

"Si el sensor S_7 está activo, entonces se desactiva B_2 y activa R_1 ."



5.4 Análisis del condicional ordinario y bicondicional

El condicional ordinario asocia silogismos u oraciones del tipo "proposición" [22]. Es decir, aquellas oraciones estructuradas por símbolos con las siguientes propiedades:

- 1) El recipiente del símbolo es una oración bien definida.
- 2) El significado del símbolo es verdadero o falso.

Por ejemplo, la fórmula " $S_2 \Rightarrow B_1$ " se puede particionar en:

- 1) "Si S_2 " $\Rightarrow \{S_2^A, S_2^D\} \Leftrightarrow \{1, 0\}$
- 2) Entonces $B_1 \Rightarrow \{B_1^A, B_1^P\} \Leftrightarrow \{1, 0\}$

Luego entonces la fórmula " $S_2 \Rightarrow B_1$ " tiene dos interpretaciones:

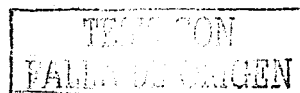
- a) Si $S_2^A(1)$, entonces $B_1^A(1)$
- b) Si $S_2^D(0)$, entonces $B_1^P(0)$

Es importante señalar que para el caso de condicionantes ordinarios las combinaciones (1,0) y (0,1) del condicional \Rightarrow no son aplicables, pues

Si $S_2^A(1)$, entonces $B_1^P(0)$ y

Si $S_2^D(0)$, entonces $B_1^A(1)$

No tienen sentido operativo. La tabla siguiente muestra los valores de verdad operativos y no operativos para la fórmula " $S_2 \Rightarrow B_1$ ".



S_2	B_1	$S_2 \Rightarrow B_1$	Tipo de acción
1	1	1	Operativa
0	0	1	Operativa
1	0	0	No Operativa
0	1	0	No Operativa

Tabla 5.10 Análisis del condicional ordinario

Considere ahora el caso de la fórmula $B_1 \Leftrightarrow S_2$, la cual se puede descomponer en:

- 1) $B_1^A(1)$ si y solo si $S_2^A(1)$
- 2) $B_1^D(1)$ si y solo si $S_2^D(0)$

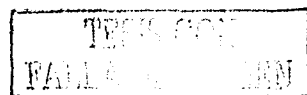
Note que si no se toman en cuenta las combinaciones (1,0) y (0,1) de la fórmula " $S_2 \Rightarrow B_1$ ", entonces es posible definir la siguiente proposición:

"La fórmula dada por condicional ordinario se puede transformar a un bicondicional si y solo si las combinaciones no operativas del de ambos condicionantes no sean tomadas en cuenta".

La tabla de valores para la fórmula $S_2 \Leftrightarrow B_1$ es la siguiente:

S_2	B_1	$S_2 \Leftrightarrow B_1$	Tipo de acción
1	1	1	Operativa
0	0	1	Operativa
1	0	0	No Operativa
0	1	0	No Operativa

Tabla 5.11 Valores para la fórmula $S_2 \Leftrightarrow B_1$.



5.5 Análisis de la ecuación de estado y modelos de control

Sea $y_1 = x_1$ una ecuación de estado asociada con el sensor $S_1(x_1)$ y la banda $B_1(y_1)$. La ecuación de estado $y_1 = x_1$ se dice operativa en términos de la igualdad si:

$$1) 0=0 \Leftrightarrow B_1^{\wedge} = S_1^{\vee}$$

$$2) 1=1 \Leftrightarrow B_1^{\vee} = S_1^{\wedge}$$

no son admisibles en términos de la relación de igualdad y en las formas operativas.

Se dice entonces que la máquina B_1 tiene asociado un sistema de control operativo si:

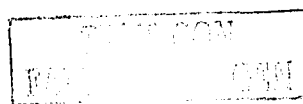
$$S_c^0(B_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_1 \Rightarrow B_1; \quad \text{operativo} \\ B_1 \Leftrightarrow S_1; \quad \text{operativo} \\ y_1 = x_1; \quad \text{operativo} \end{array} \right.$$

5.6 Modelo de control para una máquina bajo diferentes condiciones

El interés en esta sección es estudiar el modelo de control para la máquina A_{c2} sujeta al siguiente condicional modular:

$$S_4 \wedge S_5 \Rightarrow A_{c3}$$

En este caso, el actuador A_{c3} está controlado por los sensores S_4 y S_5 ambos modulares y el conectivo lógico " \wedge ".



Considere que la tabla de valores asociada con la fórmula $S_4 \wedge S_5 \Rightarrow A_{C3}$ es la siguiente:

	S_4	S_5	A_{C3}	$S_4 \wedge S_5$	A_{C3}	$S_4 \wedge S_5 \Rightarrow A_{C3}$
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	0	0
3	1	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	1
5	0	0	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	1
7	1	0	1	0	1	1
8	0	1	0	0	0	1

Tabla 5.12 Valores para la fórmula $S_4 \wedge S_5 \Rightarrow A_{C3}$

De acuerdo con la tabla anterior, las filas operativas de la fórmula $S_4 \wedge S_5 \Rightarrow A_{C3}$ son: 1,3,4,8; es decir aquellas combinaciones entre $S_1 \wedge S_4$ y B_1 tales que (1,1) y (0,0).

La siguiente proposición es de fundamental importancia en este trabajo [31]:

" Toda fórmula de la forma : $S_1 \wedge S_2 \vee S_3 \dots \wedge S_i \vee S_{i+1} \wedge S_{i+3} \Rightarrow M_k$ tiene 2^{n-1} formas operativas, si $n = N_{\text{sensores}} + 1$ "

Según la proposición anterior, no importa la secuencia de conectivos \wedge o \vee sobre el antecedente para que se cumpla el número 2^{n-1} .

Por otro lado, el término "1" de " $n = N_{\text{sensores}} + 1$ " significa una máquina en el consecuente. Por tanto, el modelo de control para la máquina A_{C3} sujeta al condicional modular $S_4 \wedge S_5 \Rightarrow A_{C3}$ es el siguiente:



$$S_c^0(A_{C3})_{\text{modular}} = \left\{ \begin{array}{l} S_4 \wedge S_5 \Rightarrow A_{C3} \\ A_{C3} \Leftrightarrow S_4 \wedge S_5 \\ y_1 = x_1 \bullet x_2 \end{array} \right.$$

Aquí, y_1 es una señal de una bobina (la cual funciona como un elemento de mando) y x_1 y x_2 son dos señales de sensores.

5.7 Modelos de control para la maquinaria

En esta sección se presentan los modelos de control para el recorrido de ida, sincronización local y sincronización global asociados con el sistema productivo motivo de estudio. Las variables utilizadas serán caracterizadas en la sección 6.6 del siguiente capítulo.

Modelos del recorrido de ida

$$1) S_c^0(A_{C1}) = \left\{ \begin{array}{l} S_1 \Rightarrow A_{C1} \\ A_{C1} \Leftrightarrow S_1 \\ y_1 = x_1 \end{array} \right.$$

$$2) S_c^0(B_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_2 \Rightarrow B_1 \\ B_1 \Leftrightarrow S_2 \\ y_2 = x_2 \end{array} \right.$$



$$3) S_c^0(Ac_2) =$$

$$S_3 \Rightarrow Ac_2$$

$$Ac_2 \Leftrightarrow S_3$$

$$y_3 = x_3$$

$$4) S_c^0(B_1) =$$

$$S_{C1} \Rightarrow B_1$$

$$B_1 \Leftrightarrow S_{C1}$$

$$y_2 = x_{16}$$

$$5) S_c^0(Ac_3) =$$

$$S_4 \wedge S_5 \Rightarrow Ac_3$$

$$Ac_3 \Leftrightarrow S_4 \wedge S_5$$

$$y_4 = x_4 \cdot x_5$$

$$6) S_c^0(B_2) =$$

$$S_6 \Rightarrow B_2$$

$$B_2 \Leftrightarrow S_6$$

$$y_5 = x_6$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$7) S_c^0(R_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_7 \Rightarrow R_1 \\ R_1 \Leftrightarrow S_7 \\ y_6 = x_7 \end{array} \right.$$

$$8) S_c^0(B_2) = \left\{ \begin{array}{l} S_{c2} \Rightarrow B_2 \\ B_2 \Leftrightarrow S_{c2} \\ y_5 = x_{16} \end{array} \right.$$

$$9) S_c^0(Ac_4) = \left\{ \begin{array}{l} S_8 \wedge S_9 \Rightarrow Ac_4 \\ Ac_4 \Leftrightarrow S_8 \wedge S_9 \\ y_4 = x_8 \cdot x_9 \end{array} \right.$$

$$10) S_c^0(B_3) = \left\{ \begin{array}{l} S_{10} \Rightarrow B_3 \\ B_3 \Leftrightarrow S_{10} \\ y_8 = x_{10} \end{array} \right.$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$11) S_c^0(R_2) = \left\{ \begin{array}{l} S_{11} \Rightarrow R_2 \\ R_2 \Leftrightarrow S_{11} \\ y_9 = x_{11} \end{array} \right.$$

$$12) S_c^0(R_2) = \left\{ \begin{array}{l} S_{C3} \Rightarrow R_2 \\ R_2 \Leftrightarrow S_{C3} \\ y_9 = x_{17} \end{array} \right.$$

$$13) S_c^0(R_2) = \left\{ \begin{array}{l} S_{C4} \Rightarrow R_2 \\ R_2 \Leftrightarrow S_{C4} \\ y_9 = x_{18} \end{array} \right.$$

$$14) S_c^0(R_2) = \left\{ \begin{array}{l} S_{C5} \Rightarrow R_2 \\ R_2 \Leftrightarrow S_{C5} \\ y_9 = x_{19} \end{array} \right.$$

TESIS CON
FALLA EN EL ORIGEN

$$15) S_c^0(R_3) = \left\{ \begin{array}{l} S_{12} \Rightarrow R_3 \\ R_3 \Leftrightarrow S_{12} \\ y_{10} = x_{12} \end{array} \right.$$

$$16) S_c^0(B_4) = \left\{ \begin{array}{l} S_{13} \Rightarrow B_4 \\ B_4 \Leftrightarrow S_{13} \\ y_{11} = x_{13} \end{array} \right.$$

Modelos de sincronización modular :

$$1) S_c^0(Ac_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_1 \wedge S_{C4} \Rightarrow Ac_1 \\ Ac_1 \Leftrightarrow S_1 \wedge S_{C4} \\ y_1 = x_1 \bullet x_{16} \end{array} \right.$$

$$2) S_c^0(Ac_3) = \left\{ \begin{array}{l} S_5 \wedge S_{C5} \Rightarrow Ac_3 \\ Ac_3 \Leftrightarrow S_5 \wedge S_{C5} \\ y_4 = x_5 \bullet x_{17} \end{array} \right.$$

TESIS CON
FALLA EN EL ORIGEN

$$3) S_c^0(Ac_4) = \left\{ \begin{array}{l} S_4 \wedge S_8 \wedge S_9 \Rightarrow Ac_4 \\ Ac_4 \Leftrightarrow S_4 \wedge S_8 \wedge S_9 \\ y_7 = x_4 \cdot x_8 \cdot x_9 \end{array} \right.$$

$$4) S_c^0(Ac_3) = \left\{ \begin{array}{l} S_4 \wedge S_5 \wedge \neg S_{B1} \wedge \neg S_{B2} \wedge \neg S_{B3} \Rightarrow Ac_3 \\ Ac_3 \Leftrightarrow S_4 \wedge S_5 \wedge \neg S_{B1} \wedge \neg S_{B2} \wedge \neg S_{B3} \\ y_4 = \bullet x_4 \cdot x_{18} \cdot (\neg x_{20} \cdot \neg x_{21} \cdot \neg x_{22}) \end{array} \right.$$

Modelos de sincronización global:

$$S_c^0(Ac_4) = \left\{ \begin{array}{l} S_5 \wedge S_9 \wedge S_{14} \Rightarrow Ac_4 \text{ en } T_{78} \\ Ac_4 \Leftrightarrow S_5 \wedge S_9 \wedge S_{14} \text{ en } T_{78} \\ y_7 = x_{12} \cdot x_{18} \cdot x_{19} \end{array} \right.$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 6

El código binario de procesos

Introducción. En este capítulo se presenta una metodología para construir un esquema operativo llamado "código binario de procesos" [1], [3] y [20]. Son utilizados el orden de ida, caracterizado en el capítulo 4, el orden TpU para distribuir en el código binario las activaciones de los sensores y de la maquinaria. El código está compuesto por dos submatrices: 1) tiempo-sensado, y 2) tiempo-maquinaria. Son incluidos los tiempos de regreso de la maquinaria, así como de elementos de señalización tipo bandera. Finalmente, se presenta el diagrama de contactos asociado al sistema de control de el sistema de manufactura motivo de estudio.

6.1 El código binario de procesos

Para manejar adecuadamente las entidades de control sincronizadas local y globalmente, es necesario utilizar algún tipo de representación que permita observar e interpretar la información de proceso y de control del sistema productivo.

El "código binario de procesos" (CBP) es una matriz de casillas en las cuales un código del tipo binario indica el estado de operación de la maquinaria y de los elementos de sensado en un determinado tiempo de operación [20].

Para construir un CBP se requiere del orden de ida y de la distribución ordenada de sensores, así como el TpU y los tiempos discretizados asociados a los ciclos operativos de la maquinaria.



La estructura de un CBP está dividida en dos partes [31]:

- 1) Matriz de casillas tiempo-sensado.
- 2) Matriz de casillas tiempo-maquinaria.

6.1.1 Matriz tiempo - sensado

La matriz completa del código debe integrar dos tipos de tiempos:

- 1) Tiempos de proceso discretizados.
- 2) Tiempos representativos de activación de un sensor (condicionantes).

El número total de discretizaciones de los tiempos de proceso se encuentra a través de la expresión siguiente: $N_{TOT} = T_{RIDA} + T_{VUELTA}^{Mi}$

Aquí, T_{RIDA} es el tiempo total de recorrido de ida T_{VUELTA}^{Mi} es el tiempo de vuelta de la última máquina que compone a la línea de producción.

Por otro lado, los tiempos representativos de activación de un sensor dependen del número de condicionantes comprendidos en N_{TOT} . Por tanto, el número total de casillas de tiempo N_{TC}^T relacionados al CBP se encuentran por medio de la siguiente expresión: $N_{TC}^T = N_{TOT} + N_{CON}$ Aquí, N_{CON} es el número de condicionantes.

Cabe señalar que el CBP debe representar todos los ciclos operativos de la maquinaria de trabajo y, por lo tanto, pueda suceder el caso en que N_{TC}^T sea incrementado lo cual no afecta al CBP.

En la matriz de casillas tiempo-sensado los sensores distribuidos sobre la línea de producción deben estar ordenados de acuerdo a la forma de distribución. El número total de casillas relacionadas con los sensores N_{TC}^S es igual al número de sensores distribuidos, es decir: $N_{TC}^S = N_{SENSORES}$.



Por tanto, el número de casillas asociadas a la matriz de tiempo –sensado es:

$$[M_{T-S}]_{N_{TC}^S \times N_{TC}^S}$$

La siguiente tabla muestra un esquema representativo de una matriz tiempo-sensado [31] y [20]:

M _{T-S}		Elementos de sensado								
		Principales		Compleitud		Sincronización		Bandera		
			S ₁	S _l	S _{C1}	S _{CK}	S _{S1}	... S _M	S _{B1} ...	S _{PN} ... N _{TC} ^S
Tiempos de proceso discretizados	Tiempos de procesos	cT ₀	0	0	0	0	1	0	1	0
		T ₁	.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	0	.	.	.	.	.
	
		T ₄	.	.	.	.	.	.	.	.
	Condicionante	cT ₄	0	0	0	0	1	0	0	0
	Tiempos de Procesos	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		T ₅	.	.	.	.	.	.	.	.
N _{TC} ^S		.	0	0	0	.	.	.	.

Tabla 6.1 Matriz de casillas tiempo-sensado

Para llenar las casillas de M_{T-S} considérese la siguiente función:

$$R_{T-S} : R^+ \times S \rightarrow C = \{1,0\}$$

definida por:

- 1) $R_{T-S}(T_k, S_j) = 1 \Leftrightarrow S_j^A; \quad \forall T_k \in R^+; S_j \in S$
- 2) $R_{T-S}(T_k, S_j) = 0 \Leftrightarrow S_j^D; \quad \forall T_k \in R^+; S_j \in S$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

dicha función es llamada "relación de tiempo-sensado."

Los tiempos cT_0 y cT_4 son llamados tiempos condicionantes. Para este tipo de tiempos se define la siguiente proposición:

"Uno o varios sensores pasan de estado activo a desactivo o de desactivo a activo y envía una señal "1" ó "0" si $T_i \in R^*$ es condicionado" (cT_E).

La proposición anterior es de gran importancia en el control de procesos, pues permitirá construir mas adelante las ecuaciones de estado de un PLC.

Para finalizar esta sección es conveniente señalar que el CBP debe indicar las formas de activación (en un tiempo condicionado) y de operación de los sensores. Por ejemplo, un sensor puede operar (estado activo) en un intervalo de tiempo (indicando presencia de pieza) o en un tiempo fijo (cT_k). Dicha forma de operación se debe mostrar en el CBP.

6.1.2 Matriz tiempo-maquinaria

La maquinaria de proceso está representada en el CBP siguiendo el orden de ida. El número de casillas asociada a los elementos de trabajo (N_{TC}^{ET}) es igual al número de máquinas (N_{maq}) distribuidas a lo largo de la línea de producción, esto es: $N_{TC}^{ET} = N_{maq}$

Por otro lado, la caracterización de tiempos en la matriz tiempo-maquinaria es exactamente igual a la asociada a la matriz (M_{T-S}) [31].

Por lo tanto el orden de M_{T-M} es: $[M_{T-M}]_{N_{TC}^{ET} \times N_{TC}^{ET}}$

El esquema mostrado en la tabla 6.2 corresponde a una matriz tiempo maquinaria.



MAQUINARIA									Ciclo
Maquinaria ordenada por el recorrido de ida									
M ₁	M ₂	N ^{ET} _{TC}		—
0	0	0	0	0	0	0	0	cT ₀	Ida
+1	0	0	0	.	0	.	.	T ₁	
+1	0	0	0	0	0	0	.	.	
+1	0	0	0	0	0	0	.	.	
+1	0	0	0	0	0	.	.	T ₄	
0	0	0	0	0	0	0	0	cT ₄	Vuelta
-1	0	+1	0	0	0	0	.	0	
-1	0	+1	0	.	.	.	.	T ₅
0	0	0	0	0	0	0	0	cT ₅	—
0	0	-1	0	.	.	0	.	N ^T _{TC}	

Tabla 6.2 Matriz de casillas tiempo-maquinaria

Para relacionar la maquinaria con los tiempos de proceso considere la función siguiente:

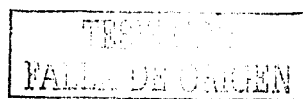
$$R_{T-M} : R^+ \times E_T \rightarrow \{1,0\} = C$$

definida por:

- 1) $R_{T-M}(T_k, E_{Tj}) = 1 \Leftrightarrow E_{Tj}^A; \quad \forall T_k \in R^+; E_{Tj} \in E_T$
- 2) $R_{T-M}(T_k, E_{Tj}) = 0 \Leftrightarrow E_{Tj}^D; \quad \forall T_k \in R^+; E_{Tj} \in E_T$

Dicha función es llamada "función de tiempo-maquinaria" [31]. Aquí, E_{Tj}^A y E_{Tj}^D representan activación y no activación de un elemento de trabajo j-ésimo.

La siguiente proposición es fundamental en este informe:



"Uno o varios elementos E_{T_i} de trabajo pasan de estado activo a desactivo o de desactivo a activo si existen un conjunto $S_R \subseteq S$ tal que:

- 1) $E_{T_i} \in P_U$ y $S_R \in P_U$
- 2) S_R satisface cT_R ."

Note en la proposición anterior que tanto E_{T_i} como S_R deben estar contenidos en una misma partición unitaria (P_U) o, equivalentemente, a una entidad de control. Además, $S_R \subseteq S$ es un conjunto de sensores que deben activarse en tiempos condicionantes.

Por otro lado, considere que $E_{T_j}^{\wedge} \leftrightarrow 1$ representa un elemento de trabajo activado. Sea $I = \{+, -\}$ un conjunto de símbolos, entonces la función,

$$f_{iv} : I \rightarrow \{E_{T_j}^{\wedge}\}$$

definida por:

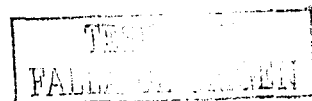
$$1) f_{iv}(+) = E_{T_j}^{+\wedge} \leftrightarrow +1$$

$$2) f_{iv}(-) = E_{T_j}^{-\wedge} \leftrightarrow -1$$

es llamada "de asignación de ida y vuelta".

Una máquina ha recorrido sus trayectorias de ida sobre un intervalo de tiempo J_1 si $E_{T_j}^{+\wedge} \leftrightarrow +1$ en J_1 . Igualmente, una máquina ha recorrido sus trayectorias de vuelta en $J_2 \subset (0, +\infty)$ si $E_{T_j}^{-\wedge} \leftrightarrow -1$ en J_2 .

Finalmente, una máquina completa su ciclo operativo continuo (sin parar) si en $J_1 \cup J_2$, $E_{T_j}^{+\wedge}$ y $E_{T_j}^{-\wedge}$.



Observación: Una máquina que no opera a ciclo continuo (paradas intermitentes) completa su ciclo operativo si : existen J_k asociados a E_{Tj}^D tal que :

$$E_{Tj}^{\wedge+} \rightarrow E_{Tj}^D \rightarrow E_{Tj}^{\wedge+} \rightarrow E_{Tj}^{\wedge-} \rightarrow E_{Tj}^D \rightarrow E_{Tj}^{\wedge-}$$

en $J_k \cup J_l$. Aquí, J_k son los intervalos de tiempo asociados a las activaciones de $E_{Tj}^{\wedge+}$.

6.2 El código binario de procesos y su primera interpretación

En esta sección son acopladas las matrices M_{T-S} y M_{T-M} para construir un código binario de procesos (CBP). Los tiempos condicionantes asociados a CBP son utilizados para construir las ecuaciones de estado de un PLC. El siguiente esquema operativo es un CBP [20] y [31].

		SENSORES					MAQUINARIA						
		X_1	...	X_6	...	X_N	y_1	...	y_2	...	y_l		
Tiempos de proceso	$\begin{matrix} S \\ T \end{matrix}$	S_1	...	S_6	S_F	N_{TC}^S	M_1	...	M_2	...	N_{TC}^{ET}	$\begin{matrix} E_T \\ T \end{matrix}$	
	cT_0	0	0	$\begin{matrix} 1 & \\ & 0 \end{matrix}$	0	.	0	0	0	0	0	0	
	T_1	0	0		0	.	+1	.	.	.	.	.
	.	.	0	0	0	.	+1	.	.	.	.	.
	.	.	.		0	.	+1	.	.	.	.	.
	T_4	.	.		0	.	1	.	.	.	.	.
	cT_4	$\begin{matrix} 1 & \\ & 0 \end{matrix}$	\oplus	$\begin{matrix} 1 & \\ & 0 \end{matrix}$	1	.	0	0	0	0	0	0	
	T_5	.	.	.	.	.	-1	0	0	0	0	0
	cT_5	.	.	.	.	.	0	.	.	.	.	.
N_{TC}^T	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Tabla 6.3 Código binario de procesos

Note en la tabla 6.3 que se han colocado arriba de los sensores las variables X_1, \dots, X_n y en los elementos de trabajo las variables y_1, \dots, y_n .

El CBP así presentado, simplifica la construcción de las ecuaciones de estado (diagrama de escalera) de un PLC [20]. Se observa en la tabla que las casillas operativas de los tiempos condicionados integran el símbolo 1/0. Además, existen símbolos de operadores lógicos ($-, +, \cdot, \oplus$) que relacionan dichas casillas.

Considérese las siguientes proposiciones:

- 1) "Cada fila de casillas de tiempos condicionantes controla una entidad de control si existe al menos un símbolo 1/0 en una casilla".
- 2) "Una o varias casilla de un tiempo condicionante marcadas con el símbolo 1/0 activa o desactiva uno o varios elementos de trabajo si 1/0 relaciona a un(os) sensor(es) $S_1(X_1)$ con un(os) elemento(s) de trabajo $M_1(y_1)$ ".

Nota: la relación entre $S_1(X_1)$ y $M_1(y_1)$ se indica por una flecha (\rightarrow) de origen en S_1 y flecha en M_1 .

- 3) "Dos o mas casillas del tipo 1/0 presentadas en un tiempo condicionante (cT_k) están relacionadas bajo una o varias operaciones lógicas ($-, +, \cdot, \oplus$)."
- 4) "Toda fila de los tiempos condicionantes es una ecuación de estado si una o varias casillas 1/0 están conectadas por una operación lógica y el resultado de dichas conexiones relaciona uno o varios elementos de trabajo.
- 5) "Las conexiones entre casillas 1/0 mediante operadores lógicos depende de la sincronización local y global de la línea de producción."



De acuerdo con la proposición 5) toda fila de tiempos condicionantes es una ecuación de estado. Por ejemplo, en la tabla 6.3 se puede observar que si S_1 y S_2 están relacionados en cT_4 por medio de la operación "disyunción exclusiva" (\oplus). Además, dicho tiempo condicionante relaciona las casillas 1/0 de S_1 y S_2 con la máquina $M_1(y_1)$ (en el regreso). La ecuación de estado en cT_4 es la siguiente:

$$X_1 \oplus X_6 = y_1$$

La tabla de activaciones para dicha ecuación de estado es la siguiente:

S_1	S_2	M_1
X_1	X_6	$X_1 \oplus X_6 = y_1$
1	1	0
0	0	0
0	1	1
1	0	1

Tabla 6.4 Código de activaciones en cT_4

Note en la tabla anterior lo siguiente:

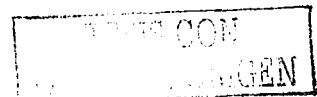
$$1) \oplus(1,1) = 0 \Rightarrow E_{T_1}^D$$

$$2) \oplus(0,0) = 0 \Rightarrow E_{T_1}^D$$

$$3) \oplus(1,0) = 1 \Rightarrow E_{T_1}^A$$

$$4) \oplus(0,1) = 1 \Rightarrow E_{T_1}^A$$

Lo cual quiere decir que si en cT_4 se presentan simultáneamente activaciones iguales (1, 1) ó (0, 0) de los sensores S_1 y S_2 , la máquina M_1 no se activa. Sin embargo, si algún sensor (no los dos) se activa (1, 0) ó (0, 1), entonces la máquina se activa.



El ejemplo anterior conduce a la siguiente proposición:

“La activación o no activación real de un(os) elemento(s) de trabajo depende de la ecuación de estado caracterizada en el tiempo condicionante cT_K ”.

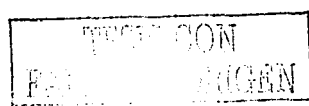
6.3 Ventajas de un código binario de procesos y metodología para su construcción

Para representar las actividades y tareas del control de procesos asociado con la planeación operacional, es necesario contar con un esquema operativo, en este caso, un código binario de procesos del tipo operacional (CBPO) [20] y [31].

Algunas de las ventajas derivadas de un CBPO se resumen en los siguientes puntos:

- Representación del recorrido en términos de sensores y activaciones de la maquinaria de proceso.
- Verificación de las ordenes: ida y T_{pU}.
- Visualización del subsistema de arranque modular y operatividad automática de la línea de producción.
- Sincronización modular y global de la línea de producción.
- Representatividad de todas las condicionales de control.
- Esquematización de los ciclos operativos de cada elemento de trabajo que compone una línea de producción.
- Representación de los modelos de control para cada máquina o dispositivo.
- Monitoreo global de los mandos y modos operativos sensor-máquina-sincronización-balance de toda la línea de producción.

Ante la gran importancia de contar con un CBPO por los grandes beneficios que de él se derivan, es necesario sistematizar su constructibilidad. Los pasos siguientes son fundamentales para generar un CBPO [20] y [31].



- 1) Representar los elementos que componen las submatrices tiempo-sensado y tiempo-maquinaria de la línea de producción de estudio.
- 2) Distribuir sobre la matriz de CBP los elementos de activación de sensores y la maquinaria siguiendo el recorrido de ida. Cada casilla del CBP que relaciona una pareja (Tp, M) tal que exista un símbolo "1" en dicha casilla deberá integrar el símbolo "+" delante "1" para indicar que se trata del recorrido de ida.
- 3) La columna de tiempos debe integrar la discretización del tiempo total del recorrido de ida y los condicionales cT_{ki} asociados al recorrido de ida (sensores principales y de completud).
- 4) Por cada cT_{ki} debe existir un solo evento de sensado.
- 5) Una vez concluido el paso 4) se asocian los eventos de sensado que caracterizan la sincronización modular y global. Aquí, existirán cuando menos dos cT_{ki} con más de un evento de sensado si la línea de producción tiene mas de un módulo de operación.
- 6) Definir, de acuerdo al balanceo de la línea de producción, los eventos de sensado para ciclo automático sobre el módulo de máxima jerarquía.
- 7) Determinar y distribuir los tiempos de vuelta de los elementos de trabajo sobre el código del paso 6).
- 8) Integrar al código, eventos de señalización tipo bandera (si existen) e incluir si es necesario, los cT_{ki} necesarios.
- 9) Extender las filas y columnas del código binario derivado del paso anterior si se presenta el caso en que el ciclo operativo de la máquina

de máxima jerarquía no ha terminad. Este paso es también válido si una de las máquinas de jerarquía menor o secundarias no han terminado su ciclo operativo.

- 10) Todas las casillas que no representen activación de sensor y/o máquina se deben llenar con el símbolo "0".
- 11) Por cada cT_{ki} se debe asociar el modelo de control para cada máquina.

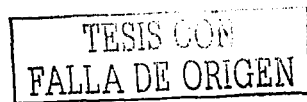
El código binario obtenido usando los pasos anteriormente descritos es llamado "código binario de procesos tipo operacional" [20] y [31].

6.4 El ciclo de arranque y el ciclo automático

En esta sección se definen algunos conceptos de interés relacionados con las formas operativas del sistema de manufactura motivo de estudio. Dichos conceptos están direccionados a los ciclos de arranque y automático de una línea de producción tipo serial.

Todo sistema de manufactura debe ser iniciado o arrancado por medio de condiciones y, posteriormente, el sistema debe operar automáticamente. Se pueden describir los arranques de un sistema en cuatro tipos:

- 1) Unitario.
- 2) Compuesto.
- 3) Modular.
- 4) Global.



El tipo unitario está asociado al arranque del sistema caracterizado por la inicialización de la primer máquina del recorrido de ida. Si el sistema se inicia con dos o más máquinas, entonces el arranque es compuesto.

Por otro lado, toda máquina o conjunto de máquinas relacionadas al inicio de operaciones de módulos inicializados caracterizan un arranque modular. Finalmente, si todas las máquinas han sido inicializadas, entonces el arranque es global.

Para el tipo global la caracterización de arranques es equivalente a la activación de sensores en el recorrido de ida. Considere ahora las siguientes definiciones:

- 1) "Un sistema de manufactura se dice "arrancado" funcionalmente si han sido inicializadas la(s) máquina(s) correspondientes al inicio de cada módulo de producción."
- 2) "Un sistema de manufactura se dice arrancado "totalmente" si toda la maquinaria que compone al sistema ha sido inicializada".
- 3) "Si una línea de producción contiene "n" módulos eslabonados secuencialmente, entonces el arranque de cada n+1 módulo es determinado por la última entidad de control de cada módulo, esto se verifica solo para sistemas seriales."

La siguiente proposición es de fundamental importancia en este informe:

"Un sistema de manufactura arrancado totalmente es equivalente al conjunto de activaciones de sensores principales y de completud caracterizados en el "recorrido de ida".

En otras palabras el arranque total global de un sistema productivo es equivalente al "orden de ida" (excepto el último sensor principal). Al conjunto de arranques que caracteriza el recorrido de ida se le llamará "ciclo de arranque". Este ciclo será mostrado en el código binario asociado al sistema productivo motivo de estudio.



Por otro lado, el ciclo automático de una línea de producción se caracterizará a través de las definiciones siguientes:

- 1) "Un sistema de manufactura se dice parcialmente en ciclo de automático, si cualesquiera de los módulos antecesores ha sido arrancado al menos dos veces".
- 2) "Un sistema de manufactura se dice en ciclo automático total si la última entidad de control de la línea de producción arranca cuando menos dos veces los módulos antecesores y por segunda vez al módulo terminal."

La siguiente equivalencia resulta de fundamental importancia en este informe:

"El ciclo automático total es equivalente al orden TpU".

Cabe aclarar dos cosas:

- 1) Las definiciones anteriores son considerados solo para sistemas productivos tipo seriales.
- 2) El ciclo automático es un conjunto de condiciones de arranque y cuando menos una entidad de control final de cada módulo que compone la línea de producción, la cual inicializará cuando menos por segunda vez un módulo antecesor o por segunda vez el módulo terminal.

Por otro lado, el ciclo automático asociado al sistema productivo motivo de estudio será descrito en el código binario caracterizado en la sección 6.6.

Es importante señalar que el ciclo automático total implica que toda la maquinaria ha realizado por lo menos una vez su ciclo operativo (excepto la última máquina). Por tanto, es necesario definir y fijar los tiempos de vuelta de la maquinaria de trabajo.



6.5 Tiempos de vuelta

El ciclo de vuelta operativo de una máquina está compuesta por trayectorias de ida y vuelta de acuerdo con el capítulo 2 de este informe. Para asignar tiempos a la trayectorias de vuelta se deben considerar dos aspectos:

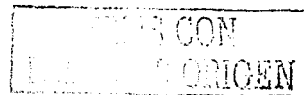
- 1) Sea T_{VUELTA}^{Mi} el tiempo de vuelta de una máquina i -ésima. Si $T_{pU} = T_{IDA}^{Mi} + T_{VUELTA}^{Mi}$, entonces la máquina opera a ciclo continuo, es decir no se detiene.
- 2) Si la máquina opera a ciclo intermitente (paro en su "home"), entonces $T_{VUELTA}^{Mi} < T_{pU} - T_{IDA}^{Mi}$.

De acuerdo con estas consideraciones los tiempos de las trayectorias de vuelta pueden ser asignados según la siguiente relación:

$$T_{VUELTA}^{Mi} \leq T_{pU} - T_{IDA}^{Mi}$$

Cabe aquí aclarar que la relación anterior se cumple solo para sistemas secuenciales o seriales, para nuestro sistema motivo de estudio la relación anterior se cumple, a la segunda inicialización de la maquinaria puesto que es un sistema no serial.

Cualesquiera asociación de tiempos que satisfagan dicha relación se considera funcional siempre y cuando $T_{pU} - T_{IDA}^{Mi}$ sea funcional, es decir, que B_cM sean satisfechos. Conviene aclarar que los tiempos de vuelta de las máquinas, en las cuales existe un sensor de completud, se caracterizan una vez activado dicho sensor.



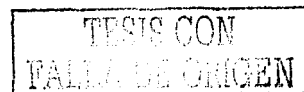
Los tiempos de vuelta se utilizan en el código binario de procesos para:

- 1) Extender el código según los tiempos de vuelta de la última máquina de la línea de producción.
- 2) Integrar al código condiciones que relacionen sensores tipo bandera.

La asociación de tiempos de vuelta relacionadas con el sistema productivo motivo de estudio se mostrará en el código binario descrito en la sección siguiente.

6.6 Construcción del código binario operacional para el sistema productivo

En esta sección se construye el CBPO asociado al sistema productivo motivo de estudio usando los pasos y consideraciones de las secciones anteriores de este capítulo [20] y [31]:

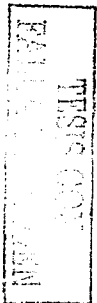


Paso 1) Representación de los elementos que componen las submatrices tiempo-sensado y tiempo-maquinaria.

Matriz tiempo-sensado																				Matriz tiempo-maquinaria												
Sensores principales ♦ Sensores de sincronización												Sensores De Completud						Sensores Bandera		Elementos de trabajo ordenados por el recorrido de ida.												
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	S ₁₇	S ₁₈	S ₁₉	S ₂₀	A _{C1}	B ₁	A _{C2}	A _{C3}	B ₂	R ₁	A _{C4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M

Tabla 6.5 Elementos principales de la matriz CBPO.

Observe en la tabla anterior que tanto los elementos de sensado como la maquinaria están distribuidos de izquierda a derecha de acuerdo al recorrido de ida y al orden de distribución de sensores.



Pasos 2), 3), y 4). Distribución de eventos de sensado y activación de maquinaria siguiendo el recorrido de ida.

CÓDIGO BINARIO DE PROCESOS OPERACIONAL																																					
MATRIZ TIEMPO-SENSADO																		MATRIZ TIEMPO-MAQUINARIA																			
SENSORES PRINCIPALES • SENSORES DE SINCRONIZACIÓN																		SENSORES DE COMPLETUD				SENSORES BANDERA		ELEMENTOS DE TRABAJO													
T/M	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	T/M			
cT ₁₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	S ₁₇	S ₁₈	S ₁₉	S ₂₀	S ₂₁	S ₂₂	A _{C1}	B ₁	A _{C2}	A _{C3}	B ₂	R ₁	A _{C4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	cT ₁₀			
	1/0																							0													cT ₁₀
T ₁																									+1												T ₁
cT ₁₁		1/0																							0	0											cT ₁₁
T ₂																										+1											T ₂
T ₃																										+1											T ₃
T ₄																										+1											T ₄
T ₅																										+1											T ₅
cT ₁₂			1/0																						0	0											cT ₁₂
T ₆																											+1										T ₆
T ₇																											+1										T ₇
T ₈																											+1										T ₈
T ₉																											+1										T ₉
T ₁₀																											+1										T ₁₀
T ₁₁																											+1										T ₁₁
T ₁₂																											+1										T ₁₂
T ₁₃																											+1										T ₁₃
T ₁₄																											+1										T ₁₄
T ₁₅																											+1										T ₁₅
T ₁₆																											+1										T ₁₆
T ₁₇																											+1										T ₁₇
T ₁₈																											+1										T ₁₈
T ₁₉																											+1										T ₁₉
T ₂₀																											+1										T ₂₀
T ₂₁																											+1										T ₂₁
T ₂₂																											+1										T ₂₂
cT ₁₃																									0	0											cT ₁₃
T ₂₃																											+1										T ₂₃
T ₂₄																											+1										T ₂₄
T ₂₅																											+1										T ₂₅
T ₂₆																											+1										T ₂₆

NIVEL
 NOG SENSADO

Paso 5), 6) Inclusión de los eventos de sensado para sincronización modular y global y ciclo automático.

CÓDIGO BINARIO DE PROCESOS OPERACIONAL																																				
MATRIZ TIEMPO-SENSADO																	MATRIZ TIEMPO-MAQUINARIA																			
SENSORES PRINCIPALES • SENSORES DE SINCRONIZACIÓN																	SENSORES DE COMPLETUD				SENSORES BANDERA			ELEMENTOS DE TRABAJO												
T/M	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	T/M		
S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	S ₁₇	S ₁₈	S ₁₉	S ₂₀	S ₂₁	S ₂₂	AC ₁	B ₁	AC ₂	AC ₃	B ₂	R ₁	AC ₄	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T ₁			
cT ₁₀₀	I/O																						0												cT ₁₀₀	
T ₁																							+1												T ₁	
cT ₁₀₁	I/O																							0												cT ₁₀₁
T ₂																								+1												T ₂
T ₃																								+1												T ₃
T ₄																								+1												T ₄
T ₅																								+1												T ₅
cT ₁₀₂		I/O																						0	0											cT ₁₀₂
T ₆																									+1											T ₆
T ₇																									±1											T ₇
T ₈																									±1											T ₈
T ₉																									±1											T ₉
T ₁₀																									±1											T ₁₀
T ₁₁																									±1											T ₁₁
T ₁₂																									±1											T ₁₂
T ₁₃																									±1											T ₁₃
T ₁₄																									±1											T ₁₄
T ₁₅																									±1											T ₁₅
T ₁₆																									±1											T ₁₆
T ₁₇																									±1											T ₁₇
T ₁₈																									±1											T ₁₈
T ₁₉																									±1											T ₁₉
T ₂₀																									±1											T ₂₀
T ₂₁																									±1											T ₂₁
T ₂₂																									±1											T ₂₂
cT ₁₀₃																								0	0											cT ₁₀₃
T ₂₃																									+1											T ₂₃
T ₂₄																									+1											T ₂₄
T ₂₅																									+1											T ₂₅

TESIS CON
 ORIGIN

Paso 7) Distribución de los tiempos de vuelta en la matriz de tiempo-maquinaria.

CÓDIGO BINARIO DE PROCESOS OPERACIONAL																																				
MATRIZ TIEMPO-SENSADO																							MATRIZ TIEMPO-MAQUINARÍA													
T/M	SENSORES PRINCIPALES ♦ SENSORES DE SINCRONIZACIÓN														SENSORES DE COMPLETUD					SENSORES BANDERA			ELEMENTOS DE TRABAJO													
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	T/M		
cT ₁₉	I/O																						0													
T ₁																							+1												T ₁	
cT ₁₁		I/O																					0	0												
T ₂																							-1	+1											T ₂	
T ₃																								+1												T ₃
T ₄																								+1												T ₄
T ₅																								+1												T ₅
cT ₁₃			I/O																				0	0												
T ₆																									+1											T ₆
T ₇																									±1											T ₇
T ₈																									±1											T ₈
T ₉																									±1											T ₉
T ₁₀																									±1											T ₁₀
T ₁₁																									±1											T ₁₁
T ₁₂																									±1											T ₁₂
T ₁₃																									±1											T ₁₃
T ₁₄																									±1											T ₁₄
T ₁₅																									±1											T ₁₅
T ₁₆																									±1											T ₁₆
T ₁₇																									±1											T ₁₇
T ₁₈																									±1											T ₁₈
T ₁₉																									±1											T ₁₉
T ₂₀																									±1											T ₂₀
T ₂₁																									±1											T ₂₁
T ₂₂																									±1											T ₂₂
cT ₁₅																I/O								0	0											
T ₂₃																									+1											T ₂₃
T ₂₄																									+1											T ₂₄
T ₂₅																									+1											T ₂₅
T ₂₆																									+1											T ₂₆
cT ₁₆			I/O	I/O																				0	0											

FALTA DE ORIGEN
 TESIS 2011

cT ₉₉			I/O						I/O										0	0	0				0										
T ₉₉																				+1	+1				+1					T ₉₉					
cT ₁₀₀				I/O															0	0	0				0										
T ₁₀₀																				±1	-1	+1				+1				T ₁₀₀					
cT ₁₀₁																				0	0	0				0	0								
T ₁₀₁																				±1		+1				0	+1			T ₁₀₁					
cT ₁₀₂																				±1		+1				-1	+1			T ₁₀₂					
cT ₁₀₃				I/O					I/O											0	0	0				0	0	0							
T ₁₀₃																				±1			+1			-1	-1	+1		T ₁₀₃					
cT ₁₀₄																				±1			+1			-1	-1	+1		T ₁₀₄					
cT ₁₀₅	I/O				I/O						I/O																								
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁		
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	S ₁₇	S ₁₈	S ₁₉	S ₂₀	S ₂₁	S ₂₂	S ₂₃	A _{c1}	B ₁	A _{c2}	A _{c3}	B ₂	R ₁	A _{c4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M

Tabla 6.8 Tiempos de vuelta de la maquinaria de trabajo

Los tiempos de ciclo para cada máquina se caracterizan por el símbolo "+1" en la ida y por "-1" en la vuelta. Note en la figura anterior que, la matriz tiempo-sensado no fue modificada. El símbolo "±" asociado al actuador A_{c1} indican extensión de los tiempos de vuelta para los sensores de completud.

IMPRESO EN
 PANAMA
 1980
 000000000000000000000000

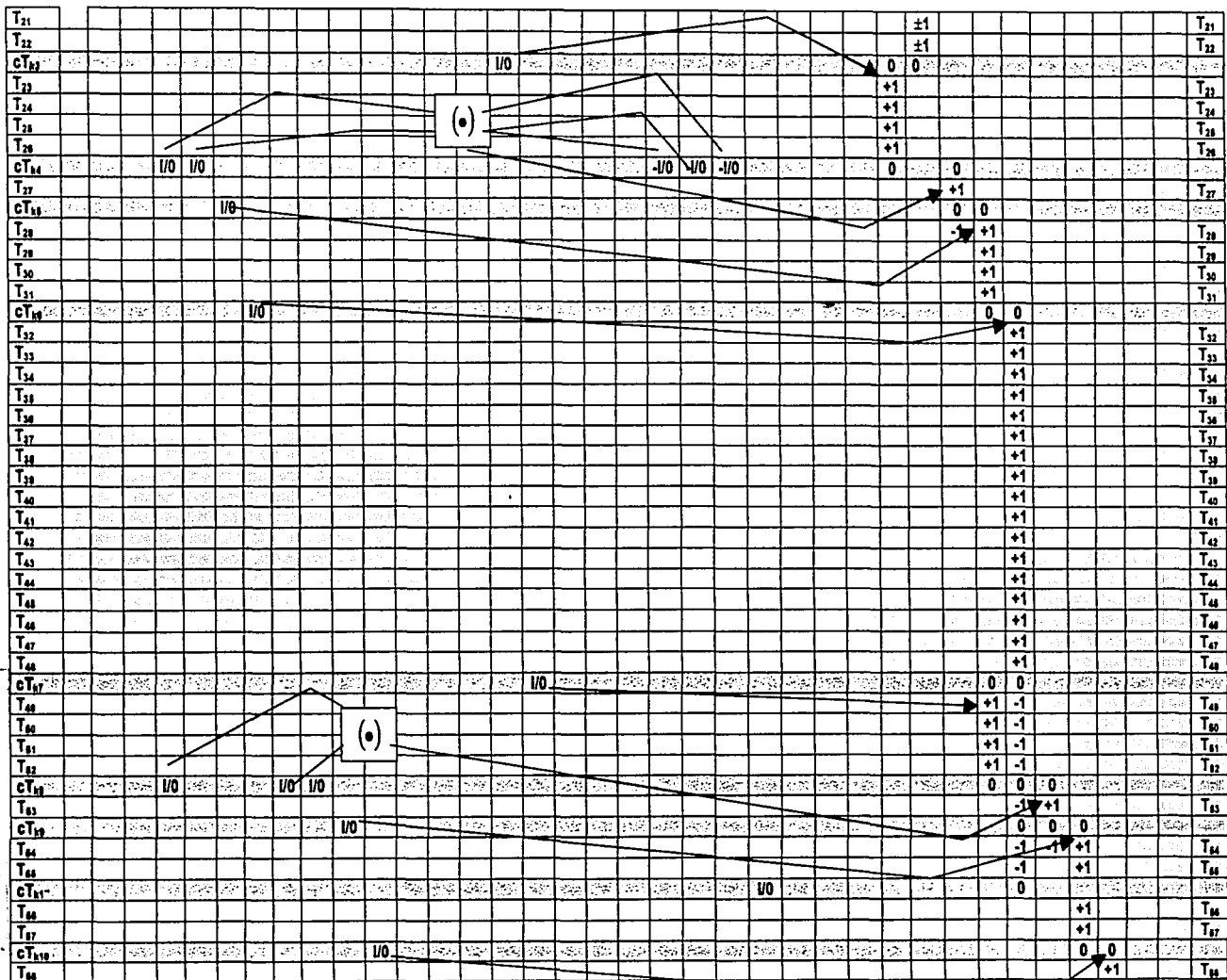
Paso 8) integrar eventos de señalización tipo bandera.

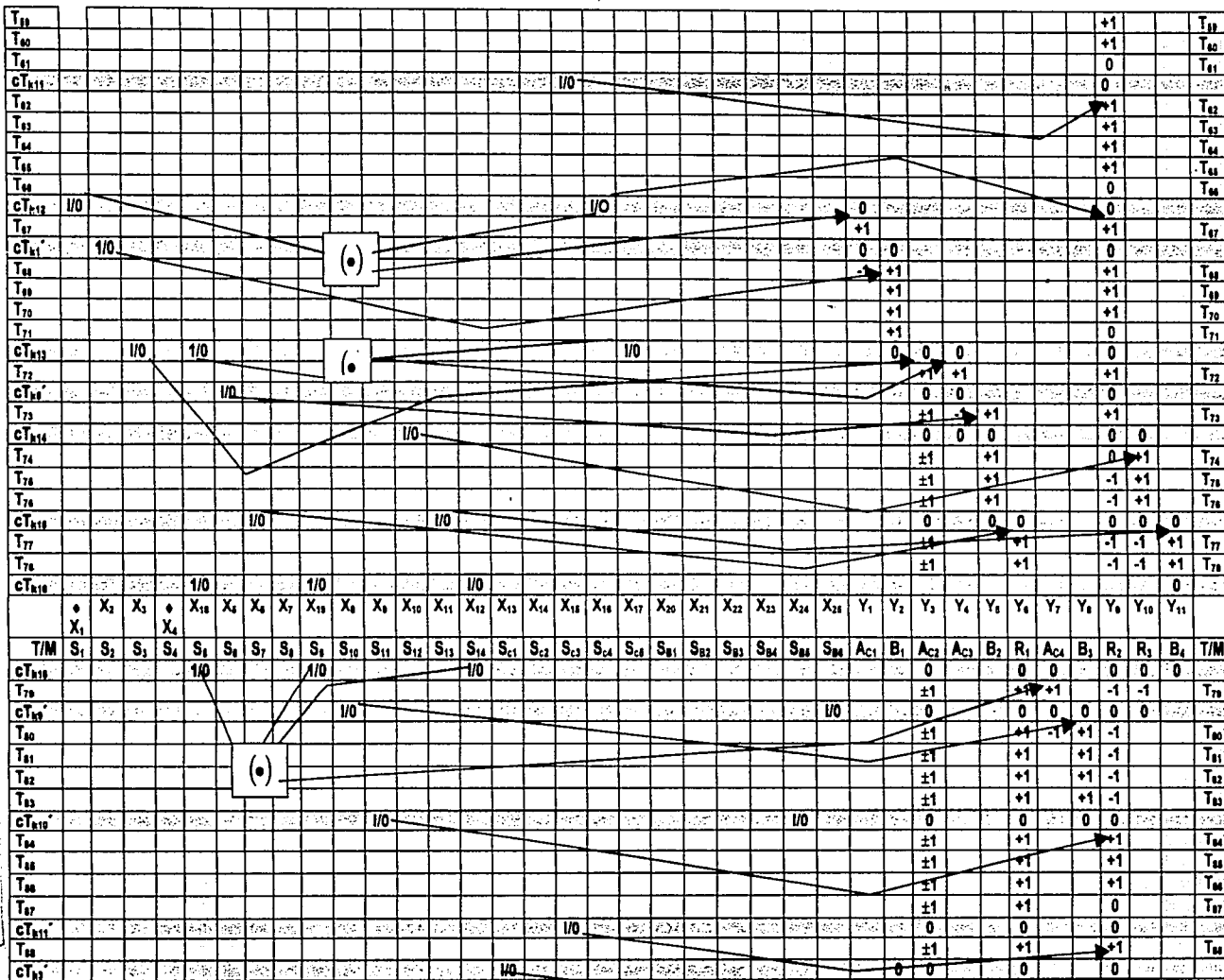
CÓDIGO BINARIO DE PROCESOS OPERACIONAL																																							
MATRIZ TIEMPO-SENSADO																							MATRIZ TIEMPO-MAQUINARIA																
T/M	SENSORES PRINCIPALES ♦ SENSORES DE SINCRONIZACIÓN												SENSORES DE COMPLETUD					SENSORES BANDERA					ELEMENTOS DE TRABAJO										T/M						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇		Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁		
S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c5}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	A _{C1}	B ₁	A _{C2}	A _{C3}	B ₂	R ₁	A _{C4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄				
cT ₁₀	1/0																										0	0											
T ₁																												+1											T ₁
cT ₁₁	1/0																											0	0										
T ₂																												-1	+1										T ₂
T ₃																													+1										T ₃
T ₄																													+1										T ₄
T ₅																													+1										T ₅
cT ₁₂			1/0																									0	0										
T ₆																														+1									T ₆
T ₇																														±1									T ₇
T ₈																														±1									T ₈
T ₉																														±1									T ₉
T ₁₀																														±1									T ₁₀
T ₁₁																														±1									T ₁₁
T ₁₂																														±1									T ₁₂
T ₁₃																														±1									T ₁₃
T ₁₄																														±1									T ₁₄
T ₁₅																														±1									T ₁₅
T ₁₆																														±1									T ₁₆
T ₁₇																														±1									T ₁₇
T ₁₈																														±1									T ₁₈
T ₁₉																														±1									T ₁₉
T ₂₀																														±1									T ₂₀
T ₂₁																														±1									T ₂₁
T ₂₂																														±1									T ₂₂
cT ₁₃														1/0															0	0									
T ₂₃																														±1									T ₂₃
T ₂₄																														±1									T ₂₄
T ₂₅																														±1									T ₂₅
T ₂₆																														±1									T ₂₆
cT ₁₄			1/0	1/0																									0		0								
T ₂₇																																							T ₂₇

Paso 11) Inclusión de los modelos de control en cada cT_{ki} .

CÓDIGO BINARIO DE PROCESOS OPERACIONAL																																								
MATRIZ TIEMPO-SENSADO																				MATRIZ TIEMPO-MAQUINARÍA																				
SENSORES PRINCIPALES + SENSORES DE SINCRONIZACIÓN										SENSORES DE COMPLETUD					SENSORES BANDERA					ELEMENTOS DE TRABAJO																				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}				
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	Ac_1	Ac_2	Ac_3	B_1	B_2	R_1	Ac_4	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M			
cT_{10}	1/0																										0													
T_1																												+1												T_1
cT_{11}		1/0																										0	0											
T_2																												-1	+1											T_2
T_3																													+1											T_3
T_4																													+1											T_4
T_5																													+1											T_5
cT_{12}			1/0																									0	0											
T_6																													+1											T_6
T_7																													+1											T_7
T_8																													+1											T_8
T_9																													+1											T_9
T_{10}																													+1											T_{10}
T_{11}																													+1											T_{11}
T_{12}																													+1											T_{12}
T_{13}																													+1											T_{13}
T_{14}																													+1											T_{14}
T_{15}																													+1											T_{15}
T_{16}																													+1											T_{16}
T_{17}																													+1											T_{17}
T_{18}																													+1											T_{18}
T_{19}																													+1											T_{19}
T_{20}																													+1											T_{20}

MEDIO E
 TESTS CON
 NOC SIST





6.7 Líneas principales del diagrama escalera

En esta sección se presentan las líneas principales de un diagrama escalera asociadas a un PLC. Dichas líneas serán interpretadas del código binario mostrado en la tabla 6.10. Se utilizarán los tiempos cT_{ki} , así como los modelos de control de la maquinaria descritos en el capítulo 5.

Cada sensor en un PLC tiene un contactor asociado en un esquema operativo denominado "diagrama escalera" y cada elemento de trabajo tiene un contactor (bobina) en dicho diagrama para representar los elementos de mando como se muestra en la figura siguiente:

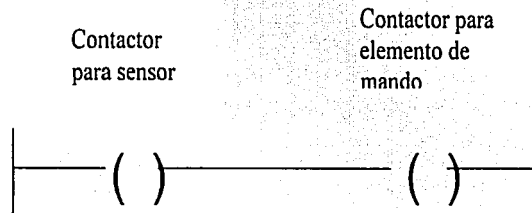


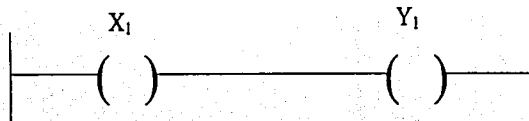
Figura 6.1 Esquema de una línea de contactos en un diagrama escalera

Del código binario descrito en la tabla 6.10 se pueden construir las líneas principales de un diagrama de contactos, pues cada cT_{ki} determina la activación / desactivación de un sensor o una máquina. De hecho, cada cT_{ki} caracteriza un modelo de control para cada máquina. Es importante señalar que no es posible determinar del código todo el diagrama completo,

pues se requieren comandos y acciones propias del PLC, las cuales quedan fuera de este estudio. A continuación se presenta una serie de extractos del código binario para representar la maquinaria en un diagrama escalera, además, se integrarán los modelos de control de cada máquina

1)

	•	X ₂	X ₃	•	•	X ₆	X ₇	•	•	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	•	X ₁₆	X ₁₈	X ₁₇	•	•	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₈	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₆	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁				
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	•	•	S ₆	S ₇	•	•	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	•	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	•	•	S _{c4}	S _{c5}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B8}	S _{B8}	A _{c1}	B ₁	A _{c2}	A _{c3}	B ₂	R ₁	A _{c4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M
cT ₁₀	I/O																										0													
T ₁																											+1													T ₁



$$S_c^0(B_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_1 \Rightarrow A_{c1} \\ A_{c1} \Leftrightarrow S_1 \\ y_1 = x_1 \end{array} \right.$$

Figura 6.2 Modelo, cT_M para la máquina A_{C1} y línea de contactos para la máquina A_{C1}

2)

	ϕ	X_2	X_3	ϕ	ϕ	X_6	X_7	ϕ	ϕ	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	ϕ	X_{16}	X_{16}	X_{17}	ϕ	ϕ	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{26}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}		
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	A_{C1}	B_1	A_{C2}	A_{C3}	B_2	R_1	A_{C4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M	
$S_c^0(B_1)$		1/0																									0											
T_2																											+1											T_1



FAMILIA
 TUBO
 100-100-100

$$S_c^0(B_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_2 \Rightarrow B_1 \\ B_1 \Leftrightarrow S_2 \\ y_2 = x_2 \end{array} \right.$$

Figura 6.3 Modelo, cT_M y línea de contactos para la máquina B_1

3)

	♦	X ₂	X ₃	♦	♦	X ₄	X ₇	♦	♦	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	♦	X ₁₆	X ₁₆	X ₁₇	♦	♦	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₈	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₆	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₈	Y ₁₀	Y ₁₁		
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c8}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	A _{c1}	B ₁	A _{c2}	A _{c3}	B ₂	R ₁	A _{c4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M	
S _c ⁰ (B ₁)			1/0																									0										
T ₂																												+1										T ₁

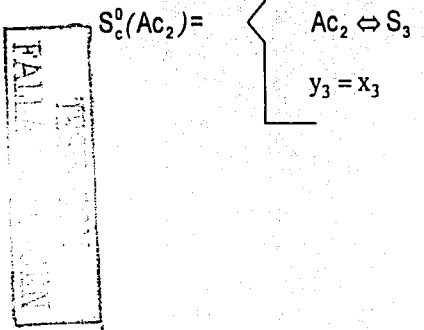
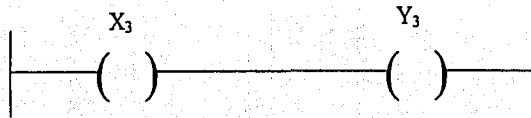
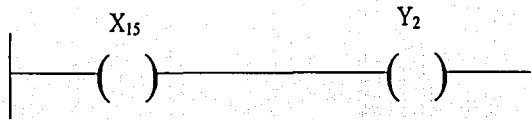


Figura 6.4 Modelo, cT_M y línea de contactos para la máquina A_{c2}

4)

	♦ X ₁	X ₂	X ₃	♦ X ₄	♦ X ₅	X ₆	X ₇	♦ X ₈	♦ X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	♦ X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	♦ X ₁₈	♦ X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁			
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c5}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	A _{c1}	B ₁	A _{c2}	A _{c3}	B ₂	R ₁	A _{c4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M		
S _c ⁰ (B ₁)															1/0												0												
T ₂₃																											+1												

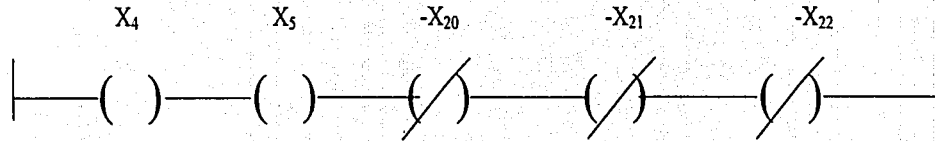


$$S_c^0(B_1) = \begin{cases} S_{c1} \Rightarrow B_1 \\ B_1 \Leftrightarrow S_{c1} \\ y_2 = x_{15} \end{cases}$$

Figura 6.5 Modelo, cT_u y línea de contactos para B₁

5)

	\diamond X_1	X_2	X_3	\diamond X_4	\diamond X_5	X_6	X_7	\diamond X_8	\diamond X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	\diamond X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	\diamond X_{18}	\diamond X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}		
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}	S_{18}	S_{19}	S_{20}	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}	S_{26}	A_{C1}	B_1	A_{C2}	A_{C3}	B_2	R_1	A_{C4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M	
$S_c^0(A_{C3})$				I/O	I/O															-I/O	-I/O	-I/O								0									
T_{27}																														+1									



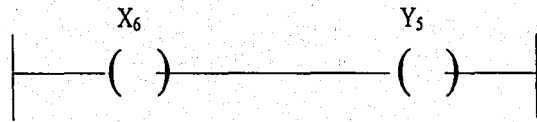
$S_c^0(A_{C3}) =$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_4 \wedge S_5 \wedge \neg S_{B1} \wedge \neg S_{B2} \wedge \neg S_{B3} \Rightarrow A_{C3} \\ A_{C3} \Leftrightarrow S_4 \wedge S_5 \wedge \neg S_{B1} \wedge \neg S_{B2} \wedge \neg S_{B3} \\ y_4 = \bullet X_4 \bullet X_5 \bullet (-X_{20} \bullet -X_{21} \bullet -X_{22}) \end{array} \right.$$

Figura 6.6 Modelos, cT_M y línea de contactos para A_{C3}

6)

	\diamond	X_2	X_3	\diamond	\diamond	X_6	X_7	\diamond	\diamond	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	\diamond	X_{16}	X_{17}	\diamond	\diamond	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}						
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	A_{c1}	B_1	A_{c2}	A_{c3}	B_2	R_1	A_{c4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M				
$S_c^0(B_2)$						1/0																																			
T_{28}																																									



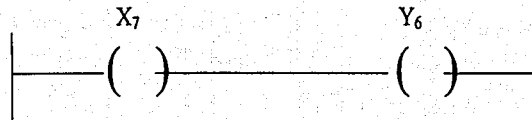
$S_c^0(B_2) =$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_6 \wedge \Rightarrow B_2 \\ B_2 \Leftrightarrow S_6 \\ y_5 = x_6 \end{array} \right.$$

Figura 6.7 Modelos, cT_M y línea de contactos para B_2

7)

	\diamond X_1	X_2	X_3	\diamond X_4	\diamond X_5	X_6	X_7	\diamond X_8	\diamond X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	\diamond X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	\diamond X_{18}	\diamond X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}						
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	A_{c1}	B_1	A_{c2}	A_{c3}	B_2	R_1	A_{c4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M					
$S_c^0(R_1)$							U/O																																			
T_{32}																																										



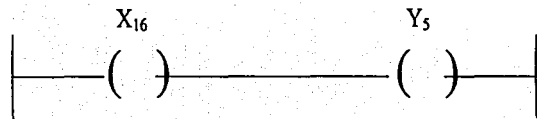
FALLA DE CONTACTO

$$S_c^0(R_1) = \begin{cases} S_7 \Rightarrow R_1 \\ R_1 \Leftrightarrow S_7 \\ Y_6 = X_7 \end{cases}$$

Figura 6.8 Modelos, cT_M y línea de contactos para R_1

8)

	ϕ	X_2	X_3	ϕ	ϕ	X_6	X_7	ϕ	ϕ	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	ϕ	X_{16}	X_{18}	X_{17}	ϕ	ϕ	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{26}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}			
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	A_{c1}	B_1	A_{c2}	A_{c3}	B_2	R_1	A_{c4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M		
$S_c^0(B_2)$																1/0																							
T_{48}																																							



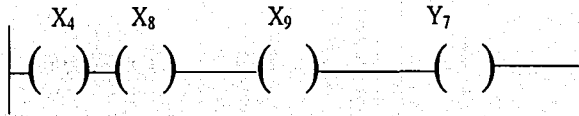
$$S_c^0(B_2) = \left\{ \begin{array}{l} S_{c2} \Rightarrow B_2 \\ B_2 \Leftrightarrow S_{c2} \\ y_5 = x_{16} \end{array} \right.$$

FALLA EN EL TIPO DE...

Figura 6.9 Modelos, cT_{ki} y línea de contactos para B_2

9)

	•	X ₂	X ₃	•	•	X ₆	X ₇	•	•	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	•	X ₁₆	X ₁₈	X ₁₇	•	•	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₆	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₆	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁				
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c8}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B6}	S _{B6}	A _{c1}	B ₁	A _{c2}	A _{c3}	B ₂	R ₁	A _{c4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M			
S _c ⁰ (A _{c4})				I/O				I/O	I/O																															
T ₈₅																																								

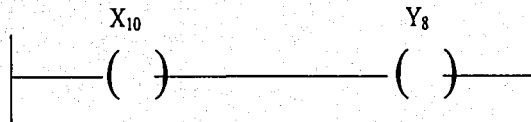


$$S_c^0(A_{c4}) = \left\{ \begin{array}{l} S_4 \wedge S_8 \wedge S_9 \Rightarrow A_{c4} \\ A_{c4} \Leftrightarrow S_4 \wedge S_8 \wedge S_9 \\ y_7 = x_4 \bullet x_8 \bullet x_9 \end{array} \right.$$

Figura 6.10 Modelo, cT_{id} y línea de contactos para A_{c4}

10)

	\diamond X_1	X_2	X_3	\diamond X_4	\diamond X_5	X_6	X_7	\diamond X_8	\diamond X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	\diamond X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	\diamond X_{18}	\diamond X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}				
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	S_{B7}	A_{c1}	B_1	A_{c2}	A_{c3}	B_2	R_1	A_{c4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M			
$S_c^0(B_3)$										1/0																															
T_{24}																																									



$S_c^0(B_3) =$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{10} \Rightarrow B_3 \\ B_3 \Leftrightarrow S_{10} \\ y_8 = x_{10} \end{array} \right.$$

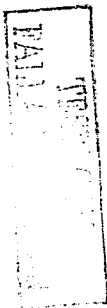
TERCER COPY
 FALLA DE ORIGEN

Figura 6.11 Modelo, cT_{id} y línea de contactos para B₃.

11)

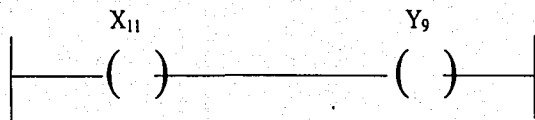
	♦	X ₂	X ₃	♦	♦	X ₆	X ₇	♦	♦	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	♦	X ₁₆	X ₁₈	X ₁₇	♦	♦	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₆	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₆	Y ₈	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁		
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c5}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	A _{C1}	B ₁	A _{C2}	A _{C3}	B ₂	R ₁	A _{C4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M	
Cl _r																						I/O																
T _{ss}																																						

Es importante señalar que para este evento no se determinó su modelo al igual que para S_{B5} y S_{B6}, debido a que estos sensores, solo indican que la maquinaria ha cumplido su ciclo de trabajo, y es una señal interna de las máquinas.



12)

	ϕ X_1	X_2	X_3	ϕ X_4	ϕ X_5	X_6	X_7	ϕ X_8	ϕ X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	ϕ X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	ϕ X_{18}	ϕ X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}			
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	A_{C1}	B_1	A_{C2}	A_{C3}	B_2	R_1	A_{C4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M		
$S_c^0(R_2)$											1/0																												
T_{82}																																							+1



PPSIS CON
RIGEN

$$S_c^0(R_2) = \begin{cases} S_{11} \Rightarrow R_2 \\ R_2 \Leftrightarrow S_{11} \\ y_9 = x_{11} \end{cases}$$

Figura 6.12 Líneas de código para R_2

13)

	♦ X ₁	X ₂	X ₃	♦ X ₄	♦ X ₅	X ₆	X ₇	♦ X ₈	♦ X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	♦ X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	♦ X ₁₈	♦ X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁						
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c5}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	A _{c1}	B ₁	A _{c2}	A _{c3}	B ₂	R ₁	A _{c4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M					
S ⁰ _c (R ₂)																	1/0																									
T _{g2}																																										

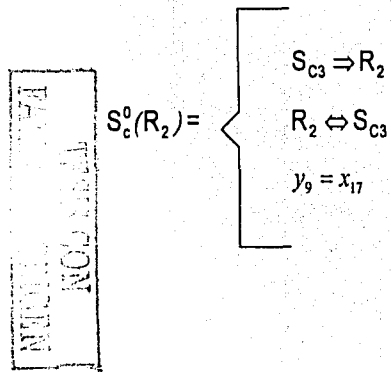
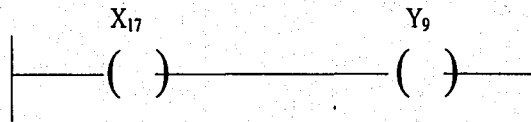
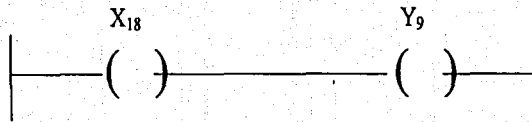


Figura 6.13 Modelo, cT_{K1} y línea de contactos para R₂

14)

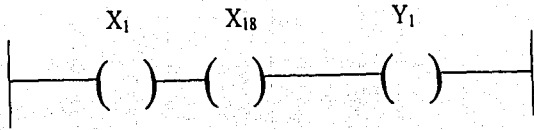
	\diamond X_1	X_2	X_3	\diamond X_4	\diamond X_5	X_6	X_7	\diamond X_8	\diamond X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	\diamond X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	\diamond X_{18}	\diamond X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}				
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{C1}	S_{C2}	S_{C3}	S_{C4}	S_{C5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	A_{C1}	B_1	A_{C2}	A_{C3}	B_2	R_1	A_{C4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M			
$S_c^0(R_2)$																		1/0																						
$S_c^0(A_{C1})$	1/0																	1/0								0														
T_{17}																										+1														



$S_c^0(R_2) =$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{C4} \Rightarrow R_2 \\ R_2 \Leftrightarrow S_{C4} \\ y_9 = x_{18} \end{array} \right.$$

MEMORANDUM
 DATE: _____
 TIME: _____
 FROM: _____
 TO: _____
 SUBJECT: _____



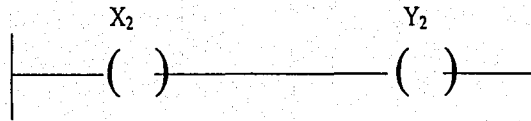
$$S_c^0(A_{C1}) = \left\{ \begin{array}{l} S_1 \wedge S_{C4} \Rightarrow A_{C1} \\ A_{C1} \Leftrightarrow S_1 \wedge S_{C4} \\ y_1 = x_1 \bullet x_{18} \end{array} \right.$$

Figura 6.14 Modelo, cT_{K1} y línea de contactos para A_{C1} y R_2

TESIS COM
 FALTA COM
 NO COM

15)

	♦	X ₂	X ₃	♦	♦	X ₆	X ₇	♦	♦	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	♦	X ₁₆	X ₁₈	X ₁₇	♦	♦	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₈	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₆	Y ₈	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁				
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{C1}	S _{C2}	S _{C3}	S _{C4}	S _{C6}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	S _{B8}	A _{C1}	B ₁	A _{C2}	A _{C3}	B ₂	R ₁	A _{C4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M		
S _c ⁰ (B ₁)		1/0																										0												
T ₈₈																												+1												

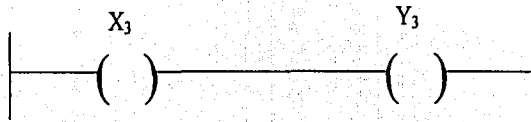


$$S_c^0(Ac_2) = \left\{ \begin{array}{l} S_2 \Rightarrow B_1 \\ B_1 \Leftrightarrow S_2 \\ Y_2 = X_2 \end{array} \right.$$

Figura 6.15 Modelo, cT_M y línea de contactos para B₁

16)

	\diamond X_1	X_2	X_3	\diamond X_4	\diamond X_5	X_6	X_7	\diamond X_8	\diamond X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	\diamond X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	\diamond X_{18}	\diamond X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}			
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}	S_{18}	S_{19}	S_{20}	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}	A_{C1}	B_1	A_{C2}	A_{C3}	B_2	R_1	A_{C4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M		
$S_c^0(A_{C2})$			1/0																									0											
$S_c^0(R_2)$																			1/0									0							0				
$S_c^0(A_{C3})$					1/0														1/0									0	0						0				
T_{T2}																												+1	+1						+1				

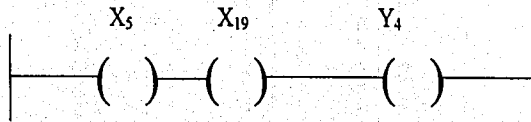


$$S_c^0(A_{C2}) = \begin{cases} S_3 \Rightarrow A_{C2} \\ A_{C2} \Leftrightarrow S_3 \\ Y_3 = X_3 \end{cases}$$



FALTA
 TESIS CON
 NOO SISSEM

$$S_c^0(R_2) = \left\{ \begin{array}{l} S_{C5} \Rightarrow R_2 \\ R_2 \Leftrightarrow S_{C5} \\ y_9 = x_{19} \end{array} \right.$$



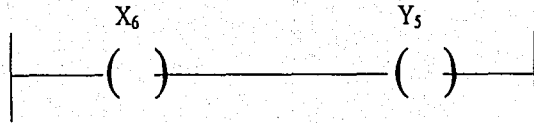
$$S_c^0(A_{C3}) = \left\{ \begin{array}{l} S_5 \wedge S_{C5} \Rightarrow A_{C3} \\ A_{C3} \Leftrightarrow S_5 \wedge S_{C5} \\ y_4 = x_5 \bullet x_{19} \end{array} \right.$$

Figura 6.16 Modelo, cT_M y línea de contactos para A_{C2} , A_{C3} y R_2

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

17)

	ϕ X_1	X_2	X_3	ϕ X_4	ϕ X_5	X_6	X_7	ϕ X_8	ϕ X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	ϕ X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	ϕ X_{18}	ϕ X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}				
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₄	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c5}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	A _{C1}	B ₁	A _{C2}	A _{C3}	B ₂	R ₁	A _{C4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M			
$S_c^0(B_2)$						1/0																																		
T ₇₃																																								



$S_c^0(B_2) =$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_6 \wedge \Rightarrow B_2 \\ B_2 \Leftrightarrow S_6 \\ y_5 = x_6 \end{array} \right.$$

TESIS FOR
 FALLA DE CONTACTO

Figura 6.17 Modelos, cT_{ki} y línea de contactos para B_2

18)

	• X ₁	X ₂	X ₃	• X ₄	• X ₅	X ₆	X ₇	• X ₈	• X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	• X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	• X ₁₈	• X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁					
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c5}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	A _{c1}	B ₁	A _{c2}	A _{c3}	B ₂	R ₁	A _{c4}	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M				
S _c ⁰ (R ₃)												1/0																										0			
T _{z4}																																							+1		



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS
 SÃO CARLOS - SP

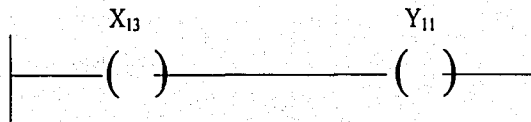
S_c⁰(R₃) =

- S₁₂ ⇒ R₃
- R₃ ⇔ S₁₂
- y₁₀ = x₁₂

Figura 6.18 Modelo, Ct_{id} y línea de contactos para R₃

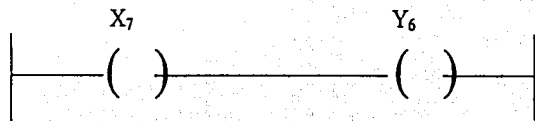
19)

	\diamond X_1	X_2	X_3	\diamond X_4	\diamond X_5	X_6	X_7	\diamond X_8	\diamond X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	\diamond X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	\diamond X_{18}	\diamond X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}				
T/M	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	S_{B4}	S_{B5}	S_{B6}	A_{C1}	B_1	A_{C2}	A_{C3}	B_2	R_1	A_{C4}	B_3	R_2	R_3	B_4	T/M			
$S_c^0(B_4)$													1/0																								0			
$S_c^0(R_1)$							1/0																															0		
T_{77}																																							+1	



No. 100 2534
 1971

$$S_c^0(B_4) = \left\{ \begin{array}{l} S_{13} \Rightarrow B_4 \\ B_4 \Leftrightarrow S_{13} \\ y_{11} = x_{13} \end{array} \right.$$



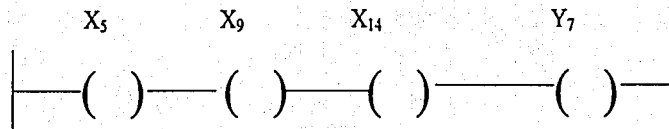
$$S_c^0(R_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_7 \Rightarrow R_1 \\ R_1 \Leftrightarrow S_7 \\ y_6 = x_7 \end{array} \right.$$

Figura 6.19. Modelo, cT_M y línea de contactos para R_1 y B_4

NEGOCIO
 CON
 NOO SISMA

20)

	\diamond X ₁	X ₂	X ₃	\diamond X ₄	\diamond X ₅	X ₆	X ₇	\diamond X ₈	\diamond X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	\diamond X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	\diamond X ₁₈	\diamond X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁							
T/M	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	S _{c5}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	S _{B5}	S _{B6}	Ac ₁	B ₁	Ac ₂	Ac ₃	B ₂	R ₁	Ac ₄	B ₃	R ₂	R ₃	B ₄	T/M						
S _c ⁰ (Ac ₄)					1/0				1/0					1/0																													
T ₇₈																																											



$$S_c^0(Ac_4) = \left\{ \begin{array}{l} S_5 \wedge S_9 \wedge S_{14} \Rightarrow Ac_4 \text{ en } T_{78} \\ Ac_4 \Leftrightarrow S_5 \wedge S_9 \wedge S_{14} \text{ en } T_{78} \\ y_7 = x_5 \bullet x_9 \bullet x_{14} \text{ en } T_{78} \end{array} \right.$$

Figura 6.20 Modelo, cT_M y línea de contactos para Ac₄

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis fueron cumplidos los siguientes objetivos:

- 1) Se distribuyeron, de manera sistemática, sensores en la línea de producción, y se modularizó el sistema.
- 2) Fue utilizado el método del vórtice para sincronizar localmente los módulos de producción.
- 3) Se construyó un código binario de procesos para sincronizar globalmente el sistema productivo.
- 4) Se generó, bajo interpretación del código binario, líneas del diagrama escalera de un PLC.

La caracterización y distribución de sensores, así como la modularización del sistema, permitieron sistematizar la sincronización local y global de operaciones. El código binario es una representación formal de los diversos eventos que se producen en la línea de producción y es un esquema operativo que permite visualizar las activaciones de los sensores y de la maquinaria de trabajo.

En esta tesis fue analizada y modelada la planeación operacional de un sistema de manufactura didáctico. Los resultados y conclusiones derivados de esta investigación se resumen en los puntos siguientes:

- Se distribuyeron: sensores principales, de completud, de sincronización y bandera sobre la línea de producción.
- Se propusieron tres módulos de producción y cada módulo fue sincronizado localmente bajo el tiempo de producción unitario.



- El control operacional del sistema es descrito por el código binario.
- El código binario es un referencial del control real, pues el primero es discreto y el segundo funcional.
- Fueron generadas líneas del diagrama escalera.
- El método del vórtice es funcional si existe un intervalo de tiempo generado por la diferencia $TPU - T_{FMAX}$ lo suficientemente operacional tal que los tiempos de ida de la maquinaria no sobrepasen sus parámetros cinemáticos.
- Una interpretación del código binario de procesos permite reconocer las ecuaciones de estado de un PLC, así como los modelos de control de cada máquina.
- El método del vórtice se puede usar para cualquier tipo de sistema productivo.
- La sincronización global fue en términos de control, diferente con el proceso de sincronización desarrollado por [29] ya que la línea analizada es no-serial.

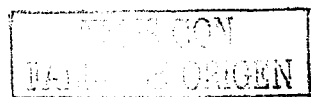
Cabe señalar que, con el estudio realizado en esta tesis, se podrá analizar la planeación operacional de sistemas de manufactura reales.

Futuros trabajos por desarrollar derivados de esta investigación son:

- Modelación y simulación del sistema productivo.
- Análisis de trayectoria de la operación de impresión.
- Modelación cinemática de un robot cartesiano plano.
- Modelación cinemática de un robot paralelo planar tipo RRR.

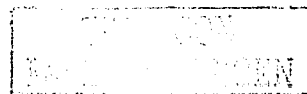


- **Diseño y construcción de la celda didáctica.**
- **Prueba operacional de la celda usando sensores y PLC.**

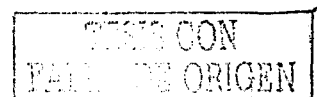


Bibliografía

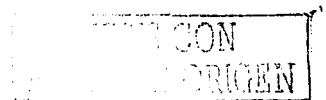
- [1] L. Rojas. "Algunas consideraciones sobre la planeación táctica y operacional". Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica, México, 2000.
- [2] E. Jiménez, L. Reyes, F. Cuenca, E. Barrios., J. Luna, F. Galindo. "Sistematización de trayectorias continuas: aplicaciones a ciclos de maquinado". Informe interno de investigación DEPMI-SME-MME-DMEC-MAV-03-2002. UNAM -ITESCA.(Edición).
- [3] E. Jiménez. "Simulación de un proceso de manufactura con obstáculo en la línea de producción". Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica, México,1998.
- [4] A. Taholakian, W. M. M Hales. "PN \Leftrightarrow PLC: A Methodology for Designing, Simulating and Coding PLC Based Control Systems Using Petri Nets". International Journal and Productions Research. Vol 35. NO 6. p.p 1743-1762,1997.
- [5] L. Castillo, J. Fernández, A. González. "Intelligent Planning of Grafcet Charts". Robotics and computer Integrated Manufacturing. Vol 16. p.p 225-239, 2000.
- [6] A. Heikkilä, H. Koivo. "Modular Control System with Intelligent Scheduling. Computer in Industry". Vol 36. p.p 75-81, 1998.



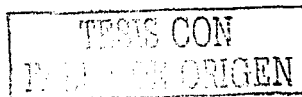
- [7] L. Castillo, J. Fernández, A. González. "Automatic Generation of Control Sequences for Manufacturing Systems Based on Partial Order Planning Techniques". Artificial Intelligence in Engineering. Vol 14. p.p 15-30, 2000.
- [8] A. Rullán. "Programmable Logic controller Versus Personal Computers for Process Control". Computer in Engineering. Vol 36. p.p 421-424, 1997.
- [9] J. La Fauci. "PLC o DCS: Selection and Trends". ISA Transactions. Vol 36. No 1 p.p 21-28, 1997.
- [10] E, Jiménez, L, Reyes, D. García, J. Ruelas, A. Danzos. "Sistematización del álgebra de Boole en el conjunto binario". Informe interno de investigación. DEPMI-SME-MME-DMEC-MAV-01-2001. UNAM –ITESCA.(En Edición).
- [11] F. Gécseg and I. Peák. "Algebraic Theory of Automata". Akadémiai kiado, Budapest, 1972.
- [12] John W. Gray. "Mastering Mathematica, programming methods and applications". Academic Press Inc.N.Y., 1994.
- [13] M. Quintana. "Métodos de planificación flexible en celdas de manufactura". ITESM, México, D.F.,1995.
- [14] 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 , p. 197-206, 1999.
- [15] Ohman, Martin. Johansson, Stefan. Aizen Karl-Erik. "Implementation Aspects of the PLC Standard IEC 1131-3". Control Engineering Practice. v6 n6 p.547-555, 1998.



- [16] Duran, O. Batocchio, A. "Automatic PLC Software with a Nature Interfase": International Journal of Production Research. V37 n4 Marzo, p. 805-819, 1999.
- [17] Volgin, L. I. "Representing Funtions of the Boolean Binary Algebra en the Complex Plane". Engineering Simulations. V13 n 4, p 537-550, 1996.
- [18] Hornes, Gerhard E. "Introducción al álgebra de Boole y a los dispositivos lógicos: autoenseñanza programada". Paraninfo. Madrid, 1972.
- [19] Brown, Frank Markham. "Boolean Reasoning: The logic of Boole equations". Boston. Kluwer Academic, 1990.
- [20] E. Jiménez, L. Reyes, I. González, M. Mercado, D. García. "Control de una línea de producción usando un código binario de procesos." División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Sección Mecánica, Cd. Universitaria, México, D.F, SOMIM, 2002.
- [21] Kerel Hrbacek, Thomas Jech. "Introduction to Set Theory". Marcel Dekker. N.Y., 1999.
- [22] A. Fregoso. "Los elementos del lenguaje de la matemática: Parte I. Lógica y conjuntos". Editorial Trillas, México, 1997.
- [23] A. Fregoso. "Los elementos del lenguaje de la matemática: Parte II. Funciones". Editorial Trillas, México, 1979.
- [24] Zvi Kohavi. "Switching and Finite Automata Theory". Mc Graw-Hill, N.Y., 1970.
- [25] John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman. "Formal Languajes and their Relation to Automation". Addison-Wesley, N.Y., 1969.



- [26] E. Jiménez. "Simulación de un proceso de manufactura con obstáculo en la línea de producción". Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica, 1998.
- [27] L. Marín. "Las ecuaciones de volúmenes modificadas". Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica, 2000.
- [28] A. Rubio. "Evasión de obstáculos mediante multicuerpos rígidos". Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica, 2000.
- [29] E. Jiménez, L. Reyes. "Distribución de sensores sobre una línea de producción serial y sincronización usando el método del vórtice." División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Sección Mecánica, Cd. Universitaria, México, D.F, SOMIM, 2002.
- [30] Jiménez, E., Reyes, L., Marín, L., Villar, G., Corona, J., Álvarez, J. "Representación de un proceso de maquinado usando una matriz de primitivas." División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Sección Mecánica, Cd. Universitaria, México, D.F, SOMIM, 2001.
- [31] E. Jiménez, L. Reyes, D. García, I. González. "Planeación operacional de sistemas de manufactura." Informe interno de investigación DEPI-SME-MME-DMEC-SSM-02-2002. UNAM -ITESCA.



APÉNDICE A

MODELO DEL PRODUCTO

TESIS CON
ESCALA DE ORIGEN

Modelo del producto

En este apéndice se presenta el modelo de manufactura de la pieza, el cual fue usado, para definir la distribución de maquinaria.

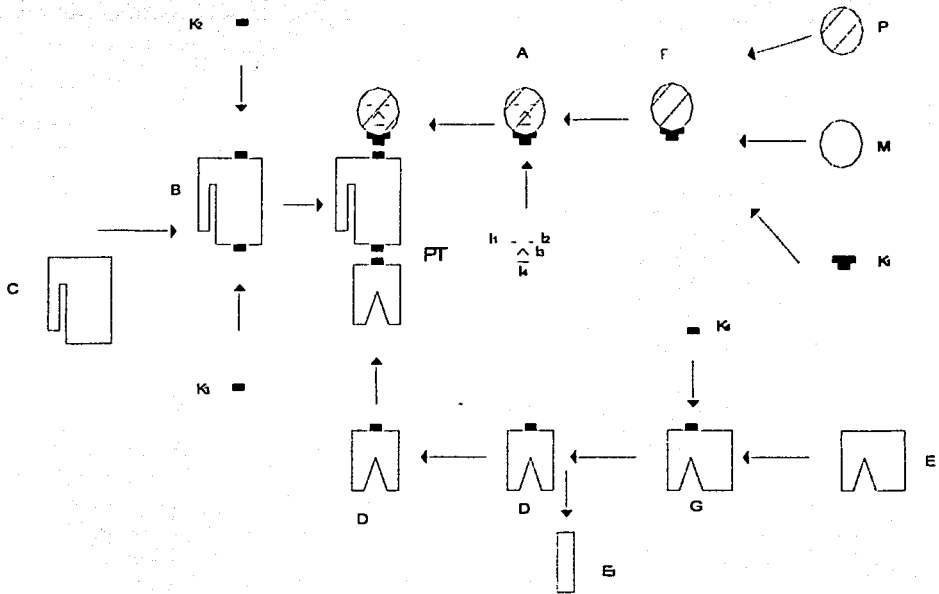


Figura A.1. Descripción de partes.

VER CON
FALLA DE ORIGEN

Parte.	Componente	Descripción.
1	C	Cuerpo de nieve seca.
2	K_2	Imán permanente.
3	K_3	Imán permanente.
4	B	Unión de (C, K_2 , K_3).
5	E	Piernas de nieve seca.
6	K_4	Imán permanente.
7	G	Unión de (K_4 , E).
7	E_1	Material excedente.
8	D	Pieza dimensionada, con un corte.
9	P	Papel de impresión.
10	M	Madera.
11	K_1	Imán permanente.
12	F	Unión de (P, M, K_3)
13	I_1, I_2, I_3, I_4	Cuerpo de la tinta.
14	A	Union de (P, M, K_1 , I_1, I_2, I_3, I_4).
15	PT	Producto terminado unión de (A, B, D).

Tabla A.1. Descripción general de los componentes.

1) Dominio de la manufactura para la impresión.

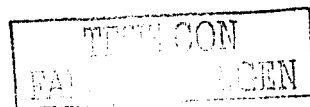
$$B_{MP} = \{K_1, M, P\}$$

$$B_{PP} = \{B_{PP1}, B_{PP2}\}$$

$$B_{MAQ} = \{I_1, I_2, I_3, I_4\}$$

$$B_{SUB} = \{B_{SUB1}, B_{SUB2}, B_{SUB3}, B_{SUB4}\}$$

$$PT = (A)$$



2) Dominio de manufactura para el corte.

$$B_{MP} = \{K_4, E,\}$$

$$B_{PP} = \{B_{PP3}\}$$

$$B_{MAQ} = \{E_1\}$$

$$B_{SUB} = \{B_{SUB5}\}$$

$$PT = (D)$$

3) Dominio de manufactura para el montaje.

$$B_{MP} = \{A, B, C, D, K_2, K_3\}$$

$$B_{PP} = \{B_{PP4}, B_{PP5}, B_{PP6}, B_{PP7}\}$$

$$B_{MAQ} = \{B, D\}$$

$$B_{SUB} = \{B_{SUB6}, B_{SUB7}\}$$

$$PT = (PT)$$

4) Ecuación de forma para la impresión.

- Subpartes y productos preparados.

$$B_{PP1} = M \overset{Pr}{\cup} P$$

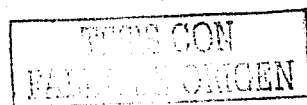
$$B_{PP2} = B_{PP1} \overset{Pr}{\cup} K_1$$

$$B_{SUB1} = B_{PP2} \overset{I}{\cup} I_1$$

$$B_{SUB2} = B_{SUB1} \overset{I}{\cup} I_2$$

$$B_{SUB3} = B_{SUB2} \overset{I}{\cup} I_3$$

$$B_{SUB4} = B_{SUB3} \overset{I}{\cup} I_4 = A$$



- Ecuación de subpartes:

$$A = B_{SUB4} = \left(M \cup^{Pr} P \right) \cup^{Pr} K_1 \cup^{Pr} I_1 \cup^{Pr} I_2 \cup^{Pr} I_3 \cup^{Pr} I_4$$

5) Ecuación de forma para el corte.

- Subpartes y productos preparados.

$$B_{PP3} = E \cup^{Pr} K_4 = G$$

$$B_{SUB5} = B_{PP3} \overset{C}{-} E_1 = D$$

- Ecuación de forma.

$$D = \left(\left(B_{SUB5} \cup^{Pr} K_4 \right) \overset{C}{-} E_1 \right)$$

6) Ecuación de forma para el montaje.

- Subpartes y productos preparados.

$$B_{PP4} = C \cup^{Pr} K_2$$

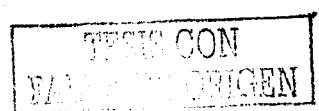
$$B_{PP5} = B_{PP4} \cup^{Pr} K_3 = B$$

$$B_{PP6} = B_{PP5} \cup^{Pr} D$$

$$B_{SUB6} = B_{PP6} \overset{M}{\cup} D$$

$$B_{PP7} = B_{SUB6} \cup^{Pr} A$$

$$B_{SUB7} = B_{PP7} \overset{M}{\cup} A$$



- Ecuación de forma

$$PT \approx B_{SUB7} = \left(\left(\left(\left(\left(C \overset{Pr}{U} K_2 \right) \overset{Pr}{U} K_3 \right) \overset{Pr}{U} D \right) \overset{M}{U} D \right) \overset{Pr}{U} A \right) \overset{M}{U} A$$

Ecuación de forma generalizada.

Sucesión:

- Superoperaciones:

- O₁ Montaje.
- O₂ Impresión.
- O₃ Corte.

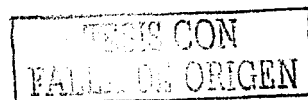
- Sucesión utilizada.

O₃₂₁: Primero el corte, luego la impresión, después el montaje (sucesión para la distribución de maquinaria y recorrido de ida).

7) Ecuación comprimida.

$$PT = \left(\left(\left(\left(D \overset{Pr}{U} B_{pp5} \right) \overset{M}{U} D \right) \overset{Pr}{U} A \right) \overset{M}{U} A \right)$$

8) Expansión total de la ecuación de forma.



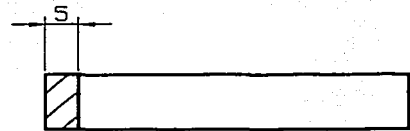
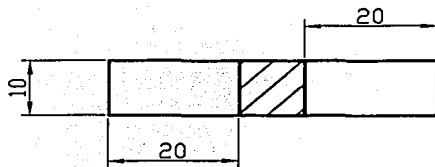
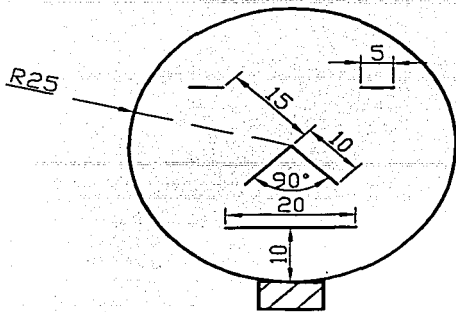
$$\begin{aligned}
 PT = & \left(\left(\left(\left(E \overset{\text{Pr}}{\cup} K_4 \right)^c - E_1 \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} \left(\left(C \overset{\text{Pr}}{\cup} K_2 \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} K_3 \right) \overset{M}{\cup} \left(E \overset{\text{Pr}}{\cup} K_4 \right)^c - E_1 \right) \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} \\
 & \left(\left(\left(\left(\left(\left(M \overset{\text{Pr}}{\cup} P \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} K_1 \right) \overset{\prime}{\cup} I_1 \right) \overset{\prime}{\cup} I_2 \right) \overset{\prime}{\cup} I_3 \right) \overset{\prime}{\cup} I_4 \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} K_3 \right) \overset{M}{\cup} \\
 & \left(\left(\left(\left(\left(M \overset{\text{Pr}}{\cup} P \right) \overset{\text{Pr}}{\cup} K_1 \right) \overset{\prime}{\cup} I_1 \right) \overset{\prime}{\cup} I_2 \right) \overset{\prime}{\cup} I_3 \right) \overset{\prime}{\cup} I_4 \right)
 \end{aligned}$$

TESIS CON
 CALIFICACION BUENA

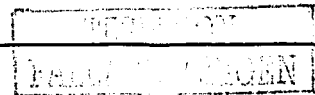
APÉNDICE B

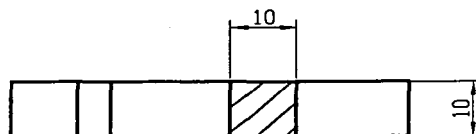
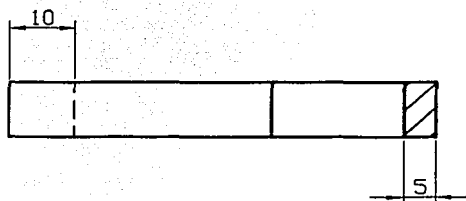
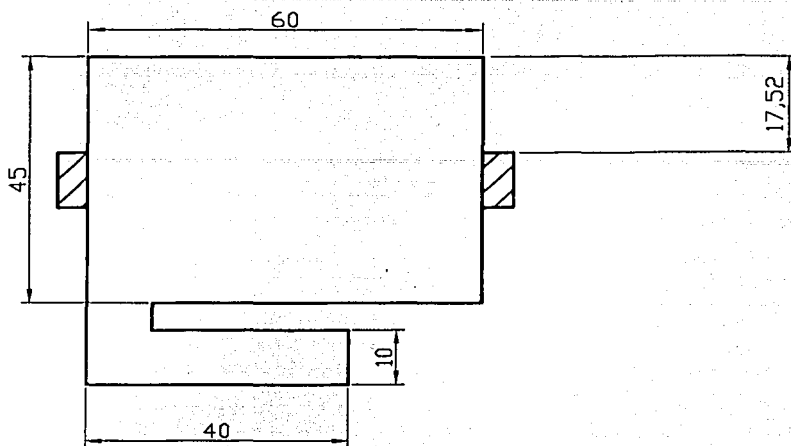
PLANOS

TESIS CON
HONORABLE MENCION



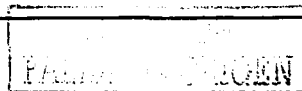
PROYECCIÓN	ESCALA	ACOTACIÓN	TEXTURA	TOLERANCIAS
	1:1	MM		A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA TOLERANCIAS ± 1.0 MM
DISEÑO		NUM. PLANO	MATERIAL	
DIBUJÓ		1/4	UNISEL	FIGURA HUMANA VISTAS
REVISÓ			<input checked="" type="checkbox"/> IMAN	
APROBÓ				

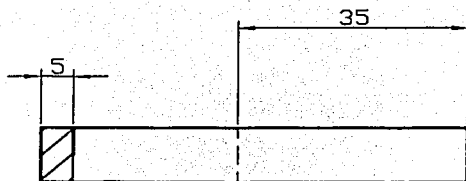
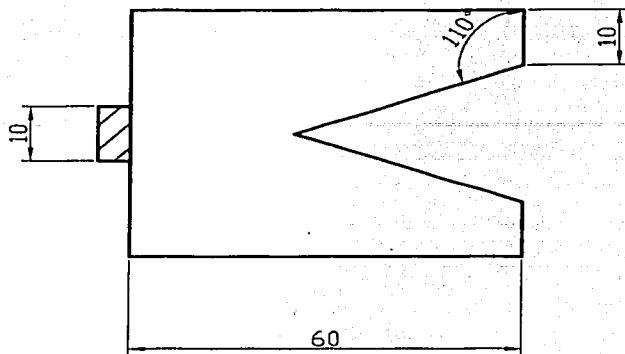




PROYECCIÓN	ESCALA	ACOTACIÓN	TEXTURA	TOLERANCIAS
	1:1	MM		A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA TOLERANCIAS ± 1.0 MM
DISEÑO		NUM. PLANO	MATERIAL	
DIBUJÓ		2/4	UNISEL	FIGURA HUMANA VISTAS
REVISÓ			IMAN	
APROBÓ				

184

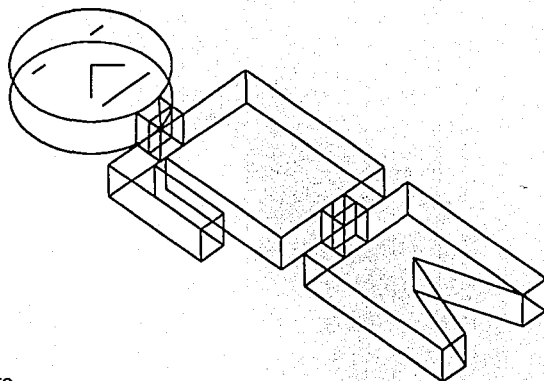




PROYECCIÓN	ESCALA	ACOTACIÓN	TEXTURA	TOLERANCIAS
	1:1	MM		A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA TOLERANCIAS ± 1.0 MM
DISEÑO		NUM. PLANO	MATERIAL	
DIBUJÓ		3/4	UNISEL	FIGURA HUMANA VISTAS
REVISÓ			IMAN	
APROBO				

185





NOTAS:

1. EL MONTAJE DE LAS PIEZAS SE REALIZARÁ, MEDIANTE IMANES PERMANENTES, PARA ESTO LAS PIEZAS DEBEN HABER SIDO PREPARADAS CON SUS RESPECTIVOS IMANES. LOS IMANES VAN PEGADOS SOBRE LAS PIEZAS.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

PROYECCIÓN	ESCALA	ACOTACIÓN	TEXTURA	TOLERANCIAS	
	1:2	mm			
DIBUJÓ		NUM. PLANO	MATERIAL		
REVISÓ		4/4		FIGURA HUMANA ISOMETRICO	
APROBÓ					

186