



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA

DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

CUAUTITLÁN

**SINCRONIZACIÓN DE UN PROCESO PRODUCTIVO
TIPO SERIAL CON TRES MÓDULOS UTILIZANDO
EL MÉTODO DE VORTICE.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

PEDRO QUINTERO DE JESÚS

ASESOR: M. EN I. ANTONIO ZEPEDA SÁNCHEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

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

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

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

~~Sincronización de un proceso productivo tipo serial con tres módulos utilizando el método del vortice.~~

que presenta el pasante: Pedro Quintero de Jesús
 con número de cuenta: 8611103-2 para obtener el título de
Ingeniero Mecánico Electricista

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

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 12 de Febrero de 2004

PRESIDENTE	<u>Ing. Eduardo Salas Córdova</u>	
VOCAL	<u>Ing. Ma. Soledad Alvarado Martínez</u>	
SECRETARIO	<u>M. I. Antonio Zepeda Sánchez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>M. I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Rogelio Xelhuantzi Parada</u>	

AGRADECIMIENTOS:

A Dios por nuestras vidas y por que sólo él sabe por que suceden las cosas.

A mis queridos padres por que siempre me han dado más de lo que he necesitado, por ser ejemplo de trabajo y honradez, por que siempre me dijeron “estudia y trabaja”, por su comprensión y paciencia, por sus enormes sacrificios, los cuales han realizado para que yo pudiera estudiar una licenciatura.

A mi esposa por ser mi apoyo prácticamente desde que empecé la carrera, por tu paciencia, por tu ayuda y por tu amor.

A mi hijo ya que Dios los ha puesto en mi vida ya que es una de las mejores cosas que me han sucedido.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por habernos otorgado la mejor herencia que se le puede legar a un ser humano:

Educación y Cultura.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por que en sus aulas aprendimos la responsabilidad que implica el conocimiento y comprensión de los fenómenos físicos de la naturaleza.

A mis amigos Antonio Zepeda Sánchez y Eusebio Jiménez López por haberme otorgado el privilegio de ser su alumno, así como su comprensión, tolerancia y aún más, su amistad y paciencia.

A compañeros y amigos con quien hemos compartido momentos buenos y malos, dentro y fuera de las aulas.

Y a todas y cada una de las personas que hicieron posible llevar acabo la realización de este trabajo.

	Índice
Índice	1
Introducción	4
Capítulo 1 Definición del problema y sus restricciones	8
Introducción	8
Nomenclatura utilizada en este capítulo	8
1.1 Definición del caso de estudio	9
1.2 Restricciones del problema	10
1.3 Formulación del problema	12
1.4 Distribución de planta y descripción de los elementos de trabajo	13
1.5 Crónica de flujo de operaciones	17
Capítulo 2 Algunas consideraciones sobre las trayectorias de operación	20
Introducción	20
Nomenclatura utilizada en este capítulo	20
2.1 Consideraciones sobre los lugares geométricos operativos	21
2.2 Tiempos de proceso	23
2.3 Caracterización de ciclos operativos	24
Capítulo 3 Selección y distribución de elementos de sensado	32
Introducción	32
Nomenclatura utilizada en este capítulo	32
3.1 El problema de control de procesos	33
3.2 Elementos de sensado	34
3.3 Caracterización por proceso de sensores	35
3.4 El orden de ida y distribución de sensores principales y secundarios sobre el	

sistema productivo	37
3.4.1 El orden de ida	37
3.4.2 Caracterización de lugares estratégicos y distribución de sensores principales	38
3.4.3 Crónica de proceso de ida, caracterización y distribución de sensores de completud	42
3.4.4 Crónica de recorrido de ida	45
3.4.4.1 Crónica preliminar de recorrido de ida	45
Capítulo 4 Modularización y sincronización de operaciones	47
Introducción	47
Nomenclatura utilizada en el capítulo	47
4.1 Modularización	47
4.2 Modularización del sistema productivo	51
4.3 Jerarquización de módulos funcionales para sincronización	53
4.4 Sincronización de procesos	54
4.4.1 Algunas consideraciones sobre la sincronización local	55
Capítulo 5 Método del vórtice para sincronización local	57
Introducción	57
Nomenclatura que se utiliza en el capítulo	57
5.1 Definición de sincronización modular y los tiempos de la terna sincronizable	57
5.2 El método del vórtice	59
5.3 El procedimiento de sincronización local o modular	61

Capítulo 6 Sincronización local del módulo de soldadura	64
Introducción	64
Nomenclatura que se utiliza en el capítulo	64
6.1 El proceso de sincronización local del módulo de soldadura	64
6.2 El vórtice y grupos de sincronización	65
Capítulo 7 Sincronización local del módulo de marcaje	72
Introducción	72
Nomenclatura utilizada en el capítulo	72
7.1 El vórtice del módulo de soldadura y grupos de sincronización	72
7.2 Uso de la metodología para sincronizar el módulo de marcaje	73
Capítulo 8 Sincronización local del módulo de taladrado	79
Introducción	79
Nomenclatura utilizada en el capítulo	79
8.1 El vórtice y grupos de sincronización	79
8.2 Sincronización local del módulo de taladrado	81
8.3 Resultados de las sincronizaciones locales	92
Conclusiones	92
Referencias	94
Apéndice A: Planos de fabricación	97

Introducción

Gran parte de los sistemas de manufactura automatizados y no automatizados tienen problemas para cumplir con los volúmenes de producción establecidos. Problemas de diseño de los procesos, máquinas defectuosas, incumplimiento de proveedores, una incorrecta planeación de procesos y la desincronización de operaciones son algunos factores que influyen en la ineficiencia de las líneas producción.

Si una empresa no puede satisfacer los volúmenes de producción, corre el riesgo de perder el mercado o, en su caso, tendrá pérdidas económicas que en la conducirá al fracaso total. Dentro de los problemas que se presentan en las líneas de producción, la sincronización de operaciones y procesos adquiere un papel relevante. De hecho, es posible afirmar que si un sistema productivo no cumple con los volúmenes de producción, dicho sistema no está sincronizado, entre otras posibles causas. El término sincronizar implica que la maquinaria de trabajo opera en forma coordinada y, dicha operación depende de una correcta distribución de tiempos de procesos monitoreada por un sistema de control [1].

El problema de la sincronización de procesos se complica en la medida de que un sistema productivo integre varias líneas de producción que se conecten entre sí. Además, el número de máquinas es otro factor importante que se debe considerar en el procedimiento de la sincronización de sistemas de manufactura. La sincronización de procesos se define de la manera siguiente [2]:

"Es un procedimiento sistemático utilizado para distribuir los tiempos de proceso sobre las otras de trabajo de la maquinaria de trabajo que integra sistema de manufactura. Dicha distribución está gobernada por el tiempo de producción unitario y monitoreada por un sistema de control".

El tiempo de producción unitaria derivado de la relación entre el volumen de producción y el total de tiempo de trabajo, es un parámetro que se utiliza para sincronizar las operaciones en la maquinaria tanto en forma individual como los módulos de producción [2,3,4]. De hecho, para

simplificar los procedimientos de control y sincronización en un sistema de manufactura, dicho sistema debe ser modularizado; es decir, particionando de manera sistemática de tal forma que cada módulo puede ser analizado en forma independiente.

Si el procedimiento de la sincronización de procesos y operaciones se realiza en un módulo, entonces dicho proceso es llamado "sincronización local". Por otro lado, si los procedimientos de control y sincronización se realiza sobre todo los módulos de la línea de producción, ha dicho proceso se le denomina "sincronización global"[1].

El método de vórtice es una técnica geométrica utilizada por [2], para distribuir, sistemáticamente, los tiempos de proceso en los módulos de producción. Dicho método es usado en el procedimiento de la sincronización local. La idea básica con este método, es relacionar la maquinaria de trabajo, previamente distribuida y modularizado, en grupos de elementos de trabajo los cuales se sincronizan bajo restricción del tiempo de producción unitaria.

El origen del vórtice está asociado con la máquina es máxima jerarquía, es decir, la de operación principal y/o la que requiere el máximo tiempo fijo o, equivalentemente, la máquina más lenta de proceso integrada al módulo. El vórtice finaliza en la máquina antecesora o sucesora final del módulo y su forma geométrica relaciona, en forma de vórtice, las máquinas que integran el módulo [2].

La restricción fundamental que regula la aplicación del método del vórtice es, la siguiente [5,6,7]:

"El método del vórtice no puede ser utilizado para la sincronización local de procesos y operaciones si la diferencia entre el tiempo de producción unitaria y máximo tiempo fijo de operación principal es mínimo no funcionan".

El término "mínimo no funcional" está relacionado con la operatividad de una máquina o una colección de máquinas; es decir, si en el procedimiento de la distribución de tiempos sobre las

rutas de trabajo de una máquina, un tiempo de operación tiende a cero, entonces la máquina operará en los límites de funcionalidad permisible [6,7]. Este factor generará problemas en el correcto funcionamiento de la máquina ya que si un elemento de trabajo opera en los límites de funcionalidad permisible, el ciclo de vida de la máquina se reducirá o, en su caso, los elementos que componen dicha máquina se desgastarán continuamente lo cual implica parar la línea y cambiar algún elemento.

En ese trabajo de tesis se utilizará el método del vórtice para sincronizar localmente una línea de producción serial. Dicha línea está compuesta por tres módulos de producción y de las operaciones principales de manufactura son: 1)marcaje,2) soldadura y3) taladrado. La pieza analizada en esta tesis es hipotética.

Se utilizará una metodología para sincronizar localmente los módulos de producción en estudio. Además, parte de la línea de producción analizada en esta tesis fue estudiada en [3]. Cabe mencionar que en diversos trabajos se ha estudiado la sincronización de operaciones. Por ejemplo, en [8] se propone un método basado en las reglas de Petri para diseñar el sistema de control de una celda de manufactura flexible didáctica. En [9,10], se utiliza Inteligencia artificial para planear automáticamente el sistema de control de operaciones de un sistema de manufactura. En [11] se utiliza redes neuronales para diseñar un sistema modular de control de procesos. En [12] se utiliza una computadora personal para imitar el comportamiento de un PLC. En [13] 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 este trabajo de tesis se propone cumplir con los siguientes objetivos:

- Usar el método del vórtice para sincronizar, localmente, una línea de producción serial compuesta por 3 módulos.
- Explicar por medio de una metodología, el proceso de la sincronización local.
- Verificar si los pasos de la metodología pueden usarse para una línea de producción serial compuesta por F-módulos.

Esta tesis está dividida en 8 capítulos los cuales se resumen a continuación:

En el capítulo 1 se presenta el problema por solucionar, así como sus restricciones fundamentales. Se define la distribución de planta y se da la crónica de operaciones. En el capítulo 2 se presentan las rutas de trabajo de la maquinaria, los tiempos de proceso, el TpU y se caracterizan los ciclos operativos de los elementos que componen la línea de producción. En el capítulo 3 se distribuyen sensores a lo largo de la línea de producción. Se discute el orden de ida y el orden TpU; así como las crónicas de operaciones con el sistema de sensado incluido. En el capítulo 4 se modulariza el sistema productivo en estudio y se discute, en términos generales, el procedimiento de la sincronización local. En el capítulo 5 se presenta la metodología para sincronizar, localmente, módulos de producción. En el capítulo 6 se utiliza la metodología descrita en el capítulo 5 para sincronizar el módulo de soldadura. En el capítulo 7 se sincroniza el módulo de marcaje usando el vórtice descrito en la metodología. En el capítulo 8 se sincroniza el módulo de taladrado usando la metodología del capítulo 5.

Finalmente, se dan las conclusiones derivadas de este trabajo de tesis y un apéndice que muestra los planos de fabricación del componente estudiado.

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 esta tesis. Se define el problema por solucionar y sus restricciones. Posteriormente, se propone la distribución de planta compuesta por siete robots industriales, dos actuadores neumáticos, cuatro bandas sincronas y dos mesas de operación. Para cada elemento de trabajo se presenta una breve descripción de las operaciones que realiza, así como sus rutas de operación. La distribución de planta propuesta en esta tesis fue diseñada en otro trabajo[3]. Finalmente, se define nomenclaturas adecuadas para cada variable en cuestión o elemento de trabajo caracterizado.

La nomenclatura utilizada en este capítulo es la siguiente:

A = Producto o pieza.
B = Producto o pieza.
C = Producto preparado.
D = Producto o pieza.
E = Producto preparado.
 B_{SUBi} = Subparte generada por la operación

de manufactura.

V_P = Volumen de producción.
marcaje.

RP = Restricciones de planta.

$1(A_1)$ = Almacén de materias primas.

$2(A_2)$ = Almacén para productos terminados.

D_a = Distribución de almacenes.

P_T = Planeación táctica.

E_S = Especificaciones.

J_T = Jornada de trabajo.

Po = Planeación operacional.

M_{O_i} = Mesa de operación.

A_{C_i} = Actuado neumático.

R_i = Robots.

B_i = Bandas.

N_i = Nodos.

N_i^M = Diferencia de troquelado.

F = Porción extraída por el

$\overset{Pr}{\cup}$ = Unión de preparación.

S_{123} = Cuerpos de soldadura.

$\overset{S}{\cup}$ = Unión de soldadura.

RPr = Restricciones del proceso.

RC = Restricciones de control.

RG = Restricciones generales.

PT = Producto terminado.

1.1 Definición del caso de estudio

Una empresa llamada "A" requiere incrementar el volumen de producción (V_p) a 539 077 piezas anuales del producto mostrado en la figura 1.1. Se dispone de un área de trabajo y dos almacenes fijos de los cuales serán distribuidos los elementos de trabajo previamente seleccionados. El sistema de manufactura debe operar en forma totalmente automática.

La pieza de trabajo está compuesta de tres bloques tipo caja hueca según se muestra en la figura 1.1. La descripción de las operaciones principales de manufactura se detalla a continuación (ver apéndice A).

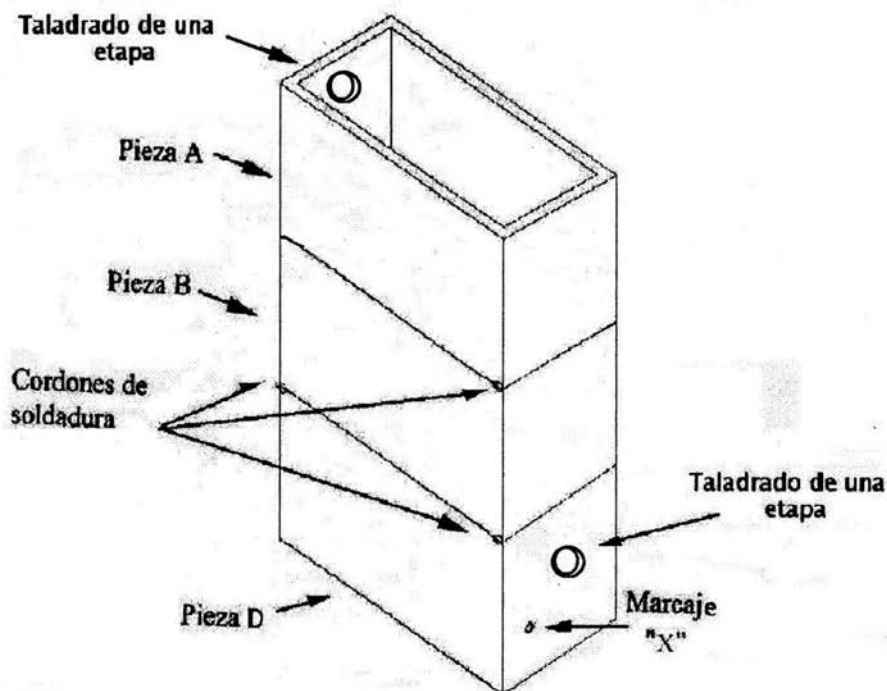


Figura 1.1. Pieza de trabajo y operaciones de manufactura

La descripción de las operaciones, en términos generales, es la siguiente:

- **Soldadura:** se requiere unir mediante tres cordones de soldadura los bloques A, B y D mostrados en la figura 1.1. La materia prima deberá ser preparada en el almacén 1 de materias primas.
- **Marcaje:** sobre el lugar “x” ubicado en el bloque D se debe realizar un marcaje de apoyo para ensamble posterior (la operación de ensamble no es modelada en esta tesis).
- **Taladrados:** de una etapa cada uno, en el bloque A y en el bloque D .

En este trabajo se considerará que la materia prima “compuesta” saldrá del almacén 1 en la forma mostrada en la figura 1.2.

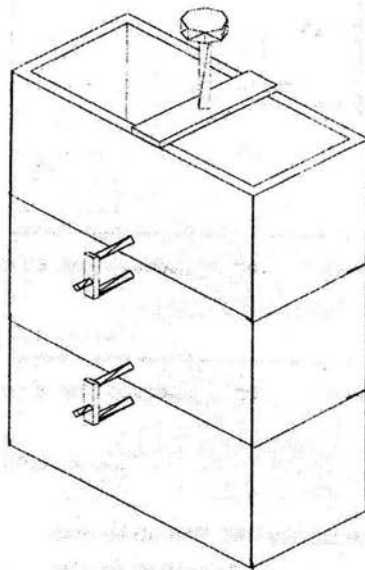


Figura 1.2. Producto preparado

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. Se integrarán nuevas restricciones al problema

estudiado en [3], con el propósito, de sincronizar, localmente el sistema de manufactura compuesto por tres módulos. La figura siguiente muestra la distribución de almacenes y el área de trabajo:

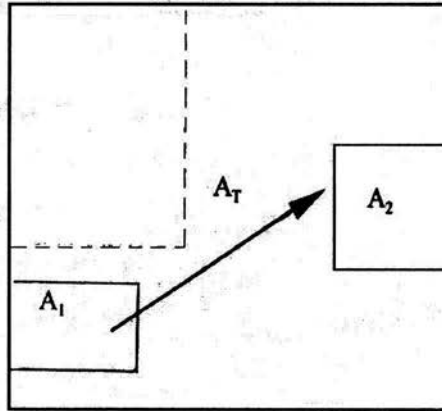


Figura 1.3. Área de trabajo y distribución de almacenes

Restricciones de planta (RP):

- 1) El área de trabajo (A_T) y la distribución de almacenes es fija y conocida.
- 2) El almacén 1(A_1) es únicamente de materias primas y el almacén 2(A_2) es para productos terminados según se muestra en la figura 1.3.
- 3) El flujo de proceso es del almacén A_1 al almacén A_2 .

Restricciones del proceso (RPr):

- 1) El volumen de producción es de 539, 077 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) No se incluyen los perfiles de trayectoria.

Restricciones generales (RG):

- 1) El estimado de costos se considera satisfecho.
- 2) Este trabajo no incluye optimización de procesos y operaciones.
- 3) La selección de maquinaria y herramienta se realiza tomando en cuenta datos generales.

Restricciones de control (RC):

- 1) El sistema debe operar en forma totalmente automática.
- 2) El tiempo de producción unitaria es perfecto y representable por un número entero.
- 3) Los tiempos de proceso son perfectos y representables por números enteros.
- 4) Sensores de presencia de materiales a lo largo de la línea de producción.

1.3 Formulación del problema

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

“Datos: V_p , E_s , J_T , A_T , D_a y $PE = \hat{PE}$

encuentre:

- 1) La planeación táctica (P_T) y
- 2) La planeación operacional (P_o) en términos de la sincronización local,

tal que sean satisfechas las siguientes restricciones:

$$1) RP = \hat{R}P$$

$$2) RPr = \hat{R}Pr$$

$$3) RG = \hat{R}G$$

$$4) RC = \hat{R}C$$

Aquí, D_a es la distribución de almacenes, $PE = \hat{P}E$ 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 la cual ya fue diseñada en [3]. En esta tesis se estudiará la planeación operacional (PO) direccionada al procedimiento de sincronización local de la misma línea analizada en [2,7] con la diferencia que se anexará otro módulo de producción. El problema de la PO será formulado más adelante.

1.4 Distribución de planta y descripción de los elementos de trabajo

En el trabajo desarrollado en [7] se describen los elementos de trabajo que componen la línea de producción caso de estudio. La planeación táctica que generó el plan, proceso y operación para seleccionar la maquinaria y el herramental, así como su distribución fue estudiada en [3] por lo cual la P_T (Planeación táctica) se considera satisfecha.

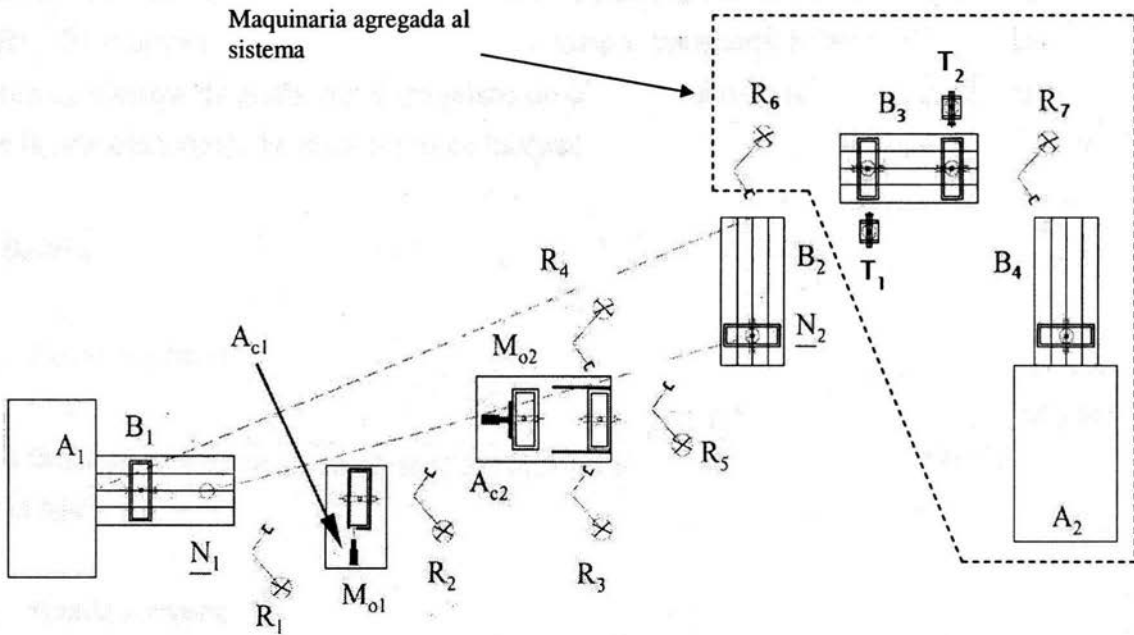


Figura 1.4. Distribución de planta del sistema productivo

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

- Elementos fijos:

M_{01} : Mesa de operación.

En esta mesa se localiza un sistema de guías que fija la pieza de trabajo para realizar la operación de marcaje por medio del actuador neumático A_{C1} ”.

M_{02} : Mesa de operación.

“Sobre la mesa M_{02} se realiza la operación de soldadura por medio de los robots R_3 y R_4 . El actuador A_{C2} localizado sobre esta mesa, transporta la pieza de trabajo sobre un sistema de

guías con el propósito de ubicarlas sobre la región de soldadura con la precisión marcada en el plano de fabricación”.

- Bandas

B_1 : Banda síncrona.

“La banda B_1 transporta la pieza preparada en el almacén A_1 al punto N_1 mostrado en la figura 1.4”

B_2 : Banda síncrona.

“La banda B_2 transporta al subproducto de la mesa de operación M_{02} , del nodo N_2 mostrado en la figura 1.4, al extremo de la misma”.

B_3 : Banda síncrona.

“La banda B_3 transporta al subproducto de un extremo a otro para el taladrado”.

B_4 : Banda síncrona.

“La banda B_4 transporta al producto terminado del N_4 al almacen de productos terminados A_2 ”.

- Robots industriales

R_1 : Robot ABB IRB 2400/16

“El robot R_1 transporta la pieza de trabajo del nodo N_1 a la mesa de operación M_{01} ”.

R_2 : Robot ABB IRB 2400/16

“El robot R_2 transporta al producto ya “marcado” de la mesa de operación M_{01} a la mesa M_{02} ”.

R_3 y R_4 : Robot ABB AWR 1400

“Los robots R_3 y R_4 efectúan la operación de soldadura sobre la pieza de trabajo una vez transportada por el actuador A_{C2} a la región de soldadura localizada en la mesa M_{02} ”.

R_5 : Robot ABB IRB 2400/16ABB.

“El robot R_5 transporta al subproducto de la mesa M_{02} al nodo N_2 localizado sobre la banda B_2 ”.

R_6 : Robot ABB IRB 2400/16ABB.

“El robot R_6 transporta al subproducto del nodo N_3 a la banda B_3 ”.

R_7 : Robot ABB IRB 2400/16 ABB.

“El robot R_7 transporta al producto terminado (PT) del nodo N_4 al almacén A_2 de producto terminado”.

- Actuadores

A_{C1} : Actuador neumático

“El actuador A_{C1} realiza la operación de marcaje de la pieza de trabajo y está ubicado sobre la mesa M_{01} ”. Dicho actuador es de simple efecto con punzón adaptado en la cabeza”.

A_{C2} : Actuador neumático

“El actuador A_{C2} transporta sobre la mesa M_{02} la pieza de trabajo. Las guías mostradas sobre la mesa M_{02} fueron diseñada con el propósito de transportar el componente de manera precisa”.

T_1 : Taladrado.

“El taladro T_1 realiza la operación de taladrado con una broca de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro que está localizada en el maneral en el inicio de la banda B_3 ”.

T_2 : Taladrado.

“El taladro T_2 , localizado en extremo final de la banda B_3 , realiza la operación de taladrado con una broca de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro”.

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:

1) $C = A \overset{Pr}{\cup} B$ Producto preparado.

2) $E = C \overset{Pr}{\cup} D$ Producto preparado.

3) $B_{SUB1} = E \overset{M}{-}_T F$ Subparte generada por la operación de marcaje.

4) $B_{SUB2} = B_{SUB1} \overset{S}{\cup} S_{123}$ Subparte generada por la aplicación de soldadura.

5) $B_{SUB3} = B_{SUB2} \overset{T}{-}_1 G$ Subparte generada por el taladrado T_1 .

6) $B_{SUB4} = B_{SUB3} \overset{T}{-}_2 H$ Subparte generada por el taladrado T_2 .

7) $PT = B_{SUB4}$ Producto terminado.

Aquí, " $\overset{Pr}{-}$ " es un operador que caracteriza la unión por preparación, " $\overset{M}{-}_T$ " es la diferencia de troquelado, F es la porción extraída por el marcaje, " $\overset{S}{\cup}$ " es la unión de soldadura y S_{123} son los cuerpos de los cordones de soldadura y " $\overset{T}{-}_{12}$ " son las operaciones de taladrado [3].

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

"La pieza E es preparada en el almacén A_1 . Dicha pieza es transportada del interior del almacén al nodo N_1 por medio de la banda B_1 . Posteriormente, el producto E es transportado por el robot R_1 del nodo N_1 a la mesa M_{01} sobre la cual, se localiza un sistema de guías que sujeta la pieza. El actuador A_{C1} , localizado en M_{01} , realiza la operación de marcaje en E produciendo el subproducto B_{SUB1} , el cual es transportado por el robot R_2 a la mesa M_{02} . En dicha mesa se localiza el actuador A_{C2} , el cual transporta a la subparte sobre un sistema de guías a una región de soldadura. Los robots R_3 y R_4 realizan la operación de soldadura sobre B_{SUB1} añadiendo simultáneamente los cordones S_1 , S_2 y S_3 . Posteriormente, el robot R_5 transporta el subproducto B_{SUB2} de M_{02} al nodo N_2 localizado sobre la banda B_2 . La banda B_2 transporta al subproducto B_{SUB2} de N_2 a N_3 por medio del robot R_6 a la banda B_3 . La banda B_3 transporta al subproducto B_{SUB2} a la operación de taladrado T_1 donde se produce la subparte B_{SUB3} después lo transporta en la banda B_3 al extremo final a la operación de taladrado T_2 produciendo la subparte B_{SUB4} . La banda B_4 transporta al producto terminado (PT) del nodo N_4 al interior del almacén A_2 .

La ecuación de forma [10,11] asociada al componente en estudio es:

$$PT = ((((((A \overset{Pr}{\cup} B) \overset{Pr}{\cup} D) - F) \overset{M}{\cup} S_1) \overset{S}{\cup} S_2) \overset{S}{\cup} S_3) - {}^T_1 G) - {}^T_2 H$$

Para finalizar este capítulo en la figura 1.5 se muestra una descomposición del producto terminado con el propósito de señalar los elementos que lo componen.

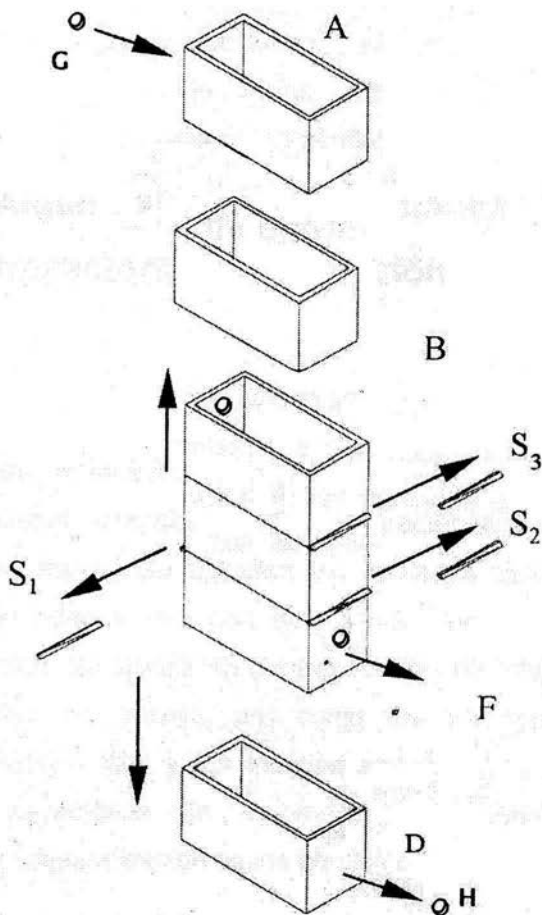


Figura 1.5. Descomposición del producto terminado

Capítulo 2

Algunas consideraciones sobre las trayectorias de operación

Introducción. Se presenta en este capítulo algunas consideraciones asociadas con la planeación operacional direccionadas con la caracterización de trayectorias de operación de maquinaria [3,7]. Se estudian los llamados ciclos operativos de los elementos de trabajo relacionados con el sistema productivo analizado en esta tesis [2,6]. 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. Finalmente, el estudio correspondiente a la sistematización de los perfiles de trayectoria no es considerado en esta tesis.

La nomenclatura utilizada en el capítulo es la siguiente:

L_G = Lugares geométricos.

T_{Si} = Tiempos asignados de soldadura.

P_T = Perfiles de trayectoria.

B_i = Bandas.

R_i = Robots.

I_{TS} = Intervalo de tiempo secundario.

T_{pU} = Tiempo de producción unitario.

T_{Fi} = Tiempo fijo.

J_T = Jornal de trabajo.

2.1 Consideraciones sobre los lugares geométricos operativos

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

Los siguientes conceptos serán de utilidad para los objetivos de esta tesis [7,14]:

- “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 en dos tipos:

1) Lugares geométricos de ida.

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 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) Los lugares geométricos de acercamiento.
 - 2) Lugares geométricos 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 a un lugar geométrico de vuelta es ajustable o modificable de acuerdo con los requerimientos 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 dependen de la localización del “home” (punto de partida de la herramienta) de la máquina y de la dirección del movimiento”.

Considérese ahora que los lugares geométricos mostrados en la figura 2.1 están asociados con el ciclo operativo del robot R_3 .

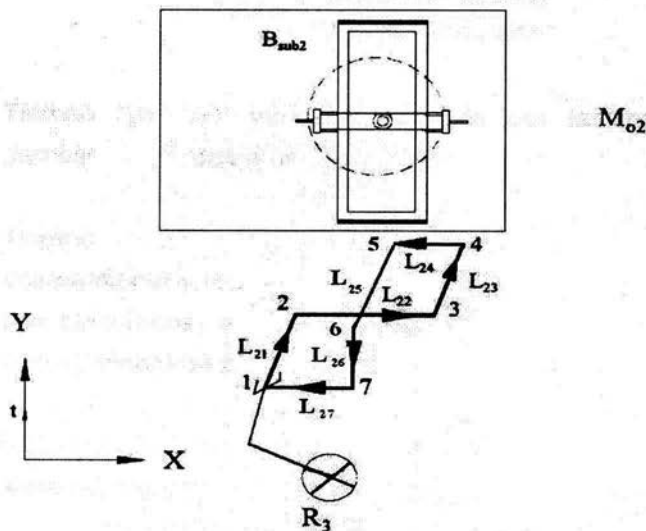


Figura 2.1. Lugares geométricos de operación del Robot R_3

De acuerdo con la figura anterior, L_{21} , L_{22} , L_{23} , L_{24} , L_{25} y L_{26} son los lugares geométricos de ida; L_{21} y L_{23} es el acercamiento, L_{22} y L_{24} es la ruta de operación principal y L_{27} es la ruta de vuelta.

2.2 Tiempos de proceso

Para asociar los tiempos de proceso a cada lugar geométrico relacionado con el ciclo operativo de una máquina, es necesario caracterizarlos de la manera siguiente [1,2,3,4,5,6]:

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

$$T_{PU} = J_T(\text{piezas/anales}) / \text{No de piezas/anales}$$

2) Tiempo fijo (T_F): variable generada por las características de proceso asociado a un componente.

a) Dicho tiempo se llama fijo puesto que una variación temporal, por muy pequeña que sea, afectará la operación de manufactura.

3) Tiempo secundario (T_S): tiempo asociado con 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:

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

y 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 $I_{TS} = 0$.

Los tiempos de proceso relacionados con el sistema productivo motivo de estudio son:

1) $T_{pU} = 39s/\text{pieza}$.

2) $T_{F1} = 1s$ (tiempo asociado con la operación de marcaje).

$T_{F2} = T_{F3} = 14s$ (tiempo fijo requerido para realizar un cordón de soldadura). En este caso S_1 y S_2 .

$T_{F4} = 4s$ (tiempo fijo requerido para realizar un cordón de soldadura). En este caso S_3 .

3) $T_{T1} = 10s$ (tiempo fijo requerido para realizar el taladrado).

4) $T_{T2} = 10s$ (tiempo fijo requerido para realizar el taladrado).

5) $I_{TS} = 1s$

Es importante que si $I_{TS} = 1s$, entonces la operación de soldadura debe ser realizada simultáneamente por los robots R_3 y R_4 .

Cabe señalar que el intervalo de tiempo secundario es en realidad una variable representativa y, el hecho de que $I_{TS} = 0$ no implica que no existan tiempos secundarios.

2.3 Caracterización de ciclos operativos

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

“Todo ciclo operativo de una máquina integrada 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 marcaje, soldadura y taladrado son principales y las de transporte se denominan secundarias).

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos fijos y secundarios sobre el ciclo operativo del robot R_3 :

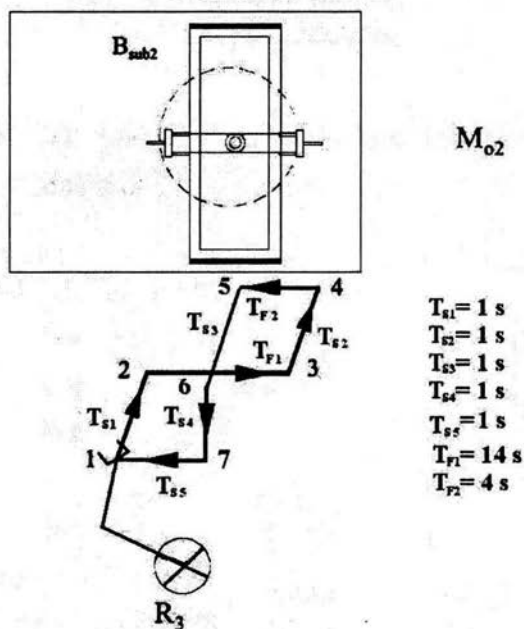
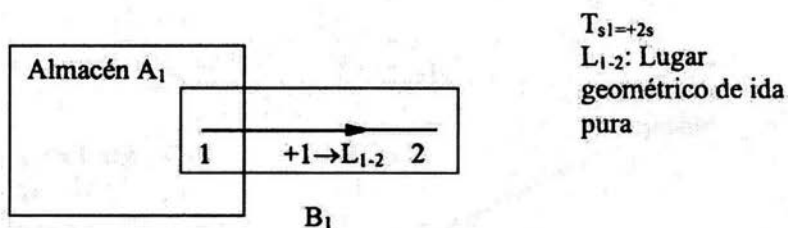


Figura 2.2. Tiempos de proceso asociados a un ciclo de producción

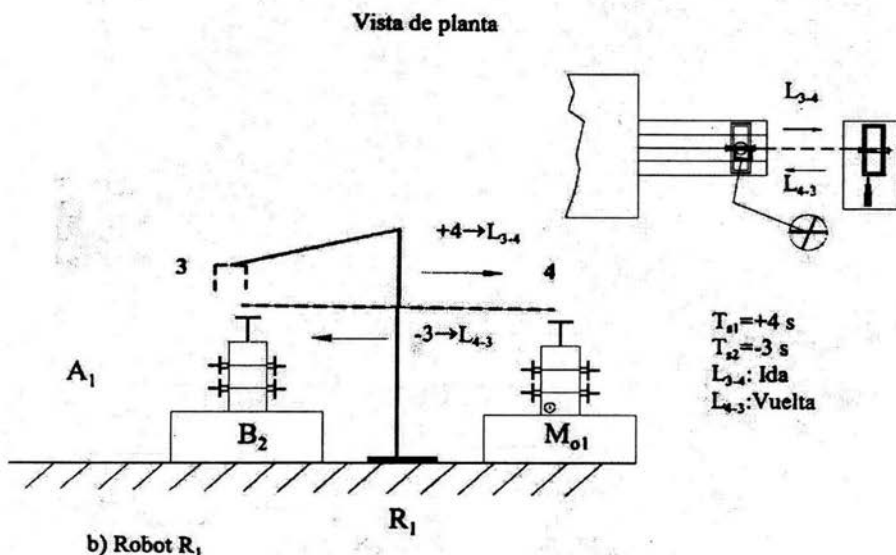
Cabe señalar que los tiempos T_{s1} , T_{s2} , T_{s3} , T_{s4} y T_{s5} han sido asignados, y en los capítulos posteriores, dichos tiempos serán evaluados o fijados de acuerdo con la sincronización de procesos.

De acuerdo con la figura 2.2, el tiempo total de ciclo de operación asociado con el robot R_3 es de 23s. La figura siguiente muestra los ciclos operativos de la maquinaria de trabajo relacionado con el sistema productivo motivo de estudio, así como los tiempos de proceso (como se recordará los tiempos secundarios son asignados de forma arbitraria):

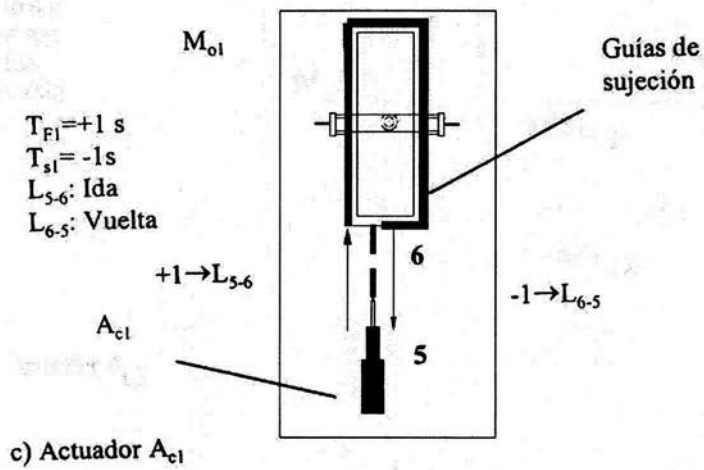
Observe en la figura 2.3 que se ha colocado el símbolo “+” a los tiempos de ida y el símbolo, “-“ para los tiempos de vuelta. Por otro lado, las bandas síncronas también se caracterizan por operar a través de ciclos. En el caso de las bandas B_1 , B_2 , B_3 y B_4 asociadas al sistema productivo motivo de estudio solo se considera lugar geométrico de “ida pura”.



a) Banda B_1

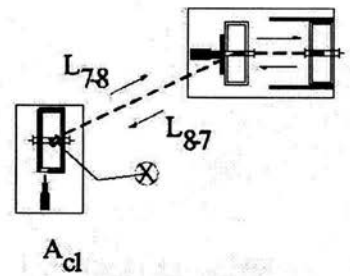


b) Robot R_1

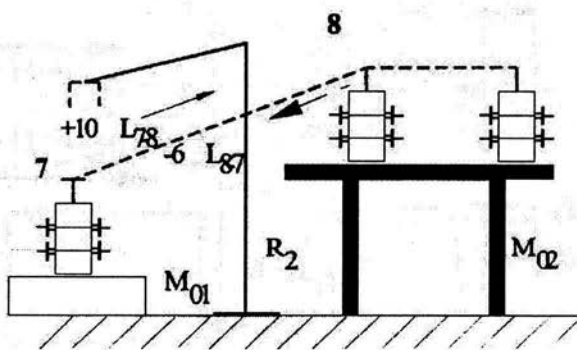


$T_{s1} = +10 \text{ s}$
 $T_{s2} = -6 \text{ s}$
 L_{7-8} = Ida
 L_{8-7} = Vuelta

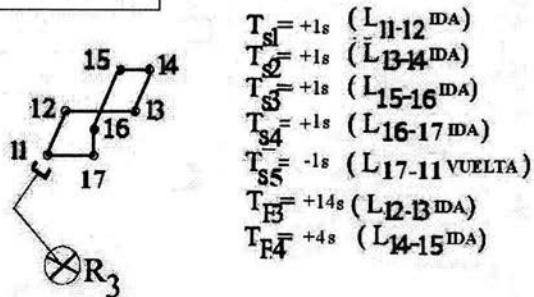
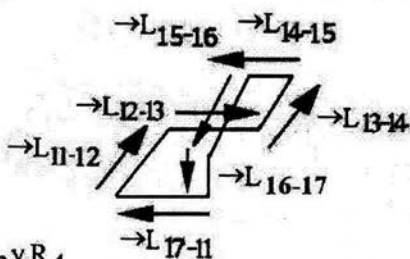
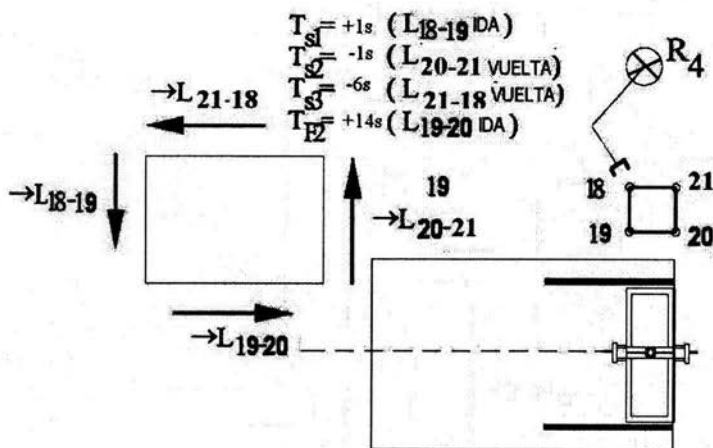
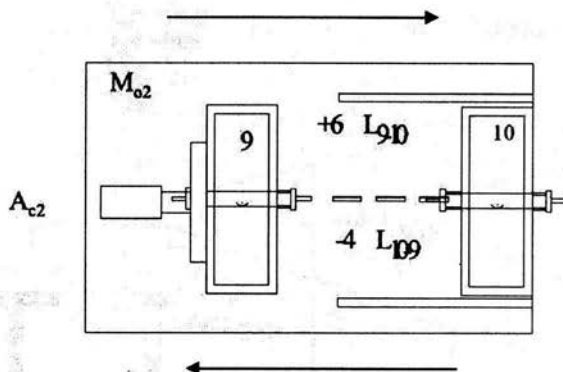
Vista de planta



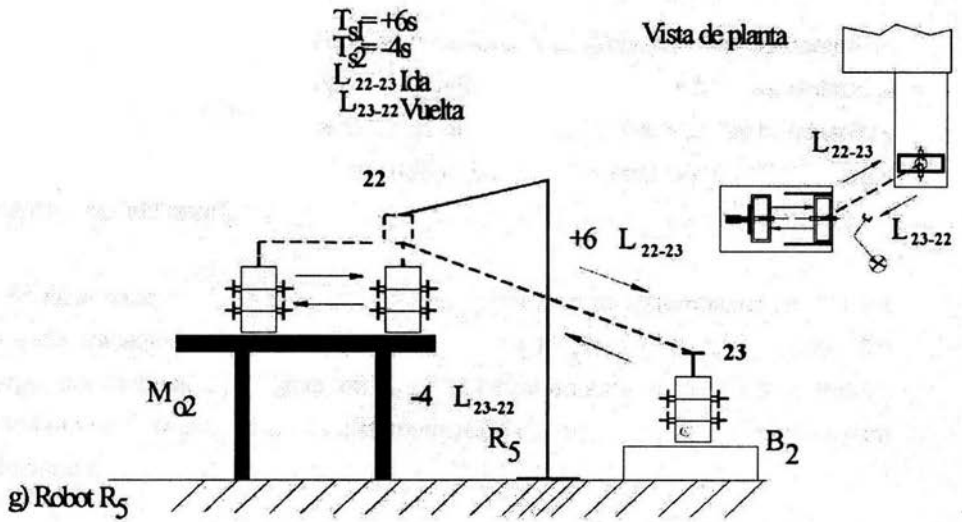
d) Robot R_2



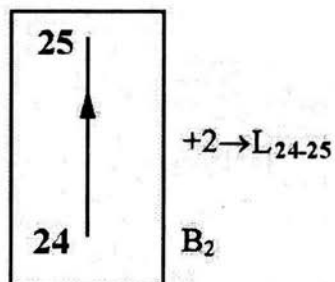
$T_{S1} = +6s$
 $T_{S2} = -4s$
 $L_{9-10} = \text{Ida}$
 $L_{10,9} = \text{Vuelta}$



f) Robots R_3 y R_4

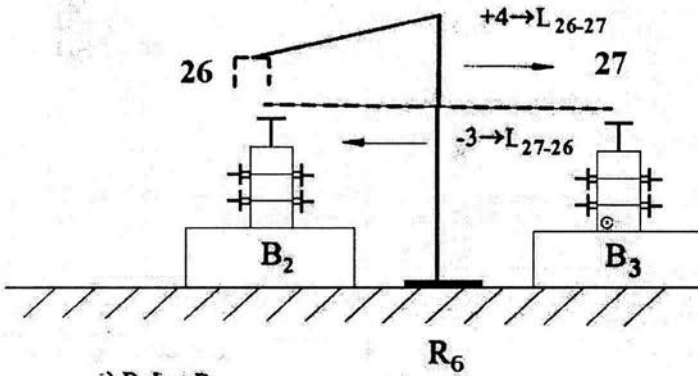


$T_{sl} = +2s$
 L_{24-25} Ida pura

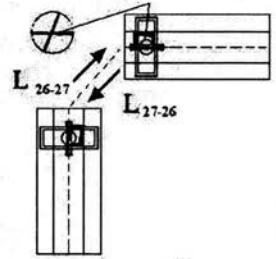


h) Banda B_2

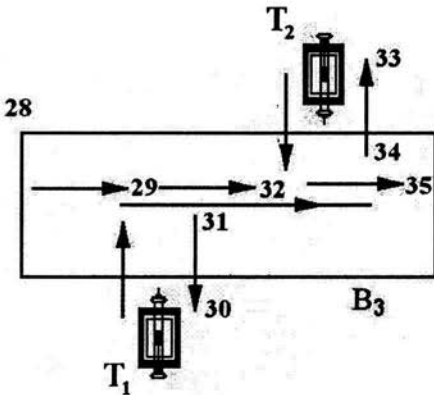
Vista de planta



i) Robot R₆



$T_{s1} = +4 \text{ s}$
 $T_{s2} = -3 \text{ s}$
 L_{26-27} : Ida
 L_{27-26} : Vuelta



$T_{s1} = +1 \text{ s} \rightarrow L_{28-29}$: Ida
 $T_{r5} = +10 \text{ s} \rightarrow L_{30-31}$: Ida
 $T_{s2} = -1 \text{ s} \leftarrow L_{31-30}$: Vuelta
 $T_{s3} = +1 \text{ s} \rightarrow L_{29-32}$: Ida
 $T_{r6} = +10 \text{ s} \rightarrow L_{33-34}$: Ida
 $T_{s4} = -1 \text{ s} \leftarrow L_{34-33}$: Vuelta
 $T_{s5} = +1 \text{ s} \rightarrow L_{32-35}$: Ida

j) Banda B₃ y taladros

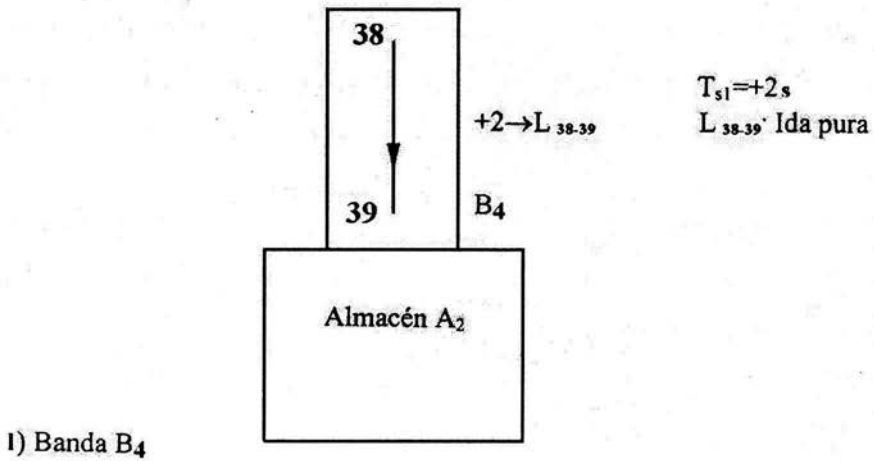
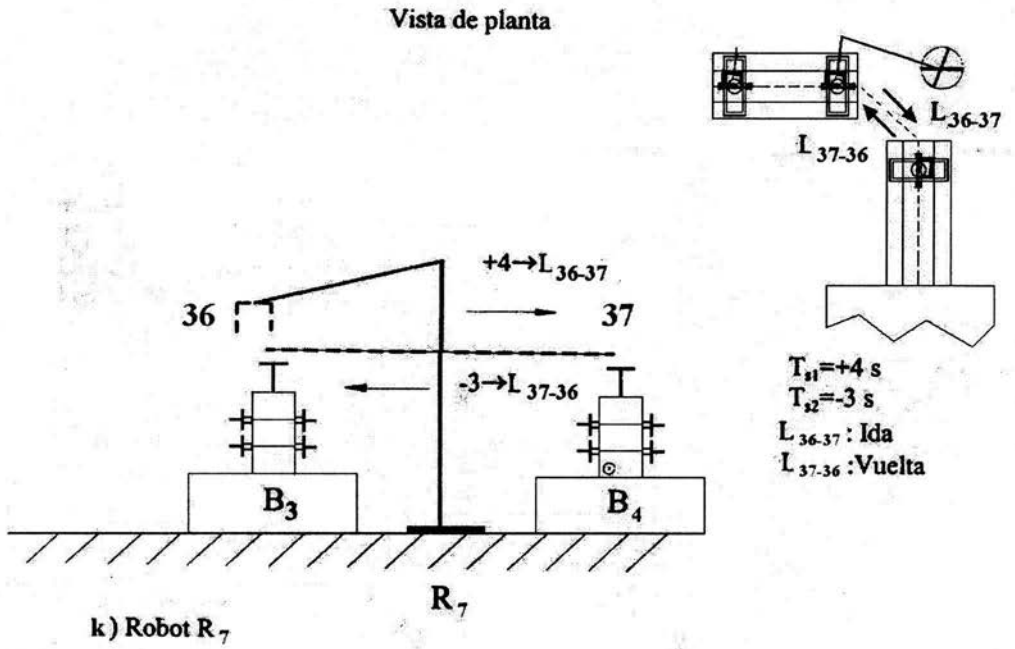


Figura 2.3 Lugares geométricos y tiempos de proceso de la maquinaria de trabajo

Capítulo 3

Selección y distribución de elementos de sensado

Introducción. En este capítulo se presenta el problema de control de procesos asociado con el sistema productivo motivo de estudio. Se propone una caracterización apropiada de sensores y su distribución a lo largo del sistema de manufactura [1,3,7]. Son definidos dos tipos de órdenes bajo las cuales se fundamenta la 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 en el capítulo anterior.

La nomenclatura utilizada en el capítulo es la siguiente:

TpU = Tiempo de producción unitaria.
V_P = Volumen de producción.
PLC = Programing logic control.
D_P = Distribución de planta.
C_{OM} = Ciclos operativos de maquinaria.
T_{Fi} = Tiempos fijos.
D = Producto o pieza.
T_{SAP} = Tiempos secundarios.
RC = Restricciones de control.
S_C = Termino funcional.
S = Conjunto de sensores.
E_T = Conjunto de elementos de trabajo.
B = Conjunto del dominio de manufactura.
R_{SP} = Relación de sensado primario.
R_{SS} = Relación de sensado secundario.
N_{LE} = Número de lugares estratégicos.
η_T = Número de elementos de transporte.
T_{Sci} = i-ésimo tiempo entre la finalización de las operaciones.
O_{OTI} = Orden de operación total de ida.

(A,D) = Indices "A" activado, "D" Desactivado.
L_G = Lugares geométricos.
R_A = Relación de activación.
E_{T1}^A = Activación del elemento E_{T1}.
E_{T1}^D = Desactivación del elemento E_{T1}.
R_i = Robots.
B_i = Bandas.
A_{CI} = Actuador neumático.
M_{Oi} = Mesa de operación.
B_{SUBi} = Subparte generada por la operación de manufactura.
S_{SP} = Sensores principales.
PT = Producto terminado.
S_{CI} = Sensores de completud.
T₀ = Tiempo inicial.
T_{IDAj} = j-ésimo tiempos de ida de la de la maquinaria de trabajo.
K = Factor que depende del número de elementos de trabajo.

3.1 El problema de 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 de control de procesos [7].

Los PLC's y microprocesadores, así como los elementos de sensado y maquinaria de procesos constituyen, por decirlo así, los elementos primitivos de un sistema de control. Sin embargo, al ser necesario satisfacer el volumen de producción, se requiere integrar como elementos primitivos los tiempos de proceso.

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 [6]:

- 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 con el 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 esta tesis solo se estudiará la primera consideración, puesto que la segunda está relacionada con la sistematización de perfiles de trayectoria[14,15].

Para finalizar esta sección es necesario aclarar los pasos por 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.

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 [1,7].

Existen diversos tipos de sensores; ópticos, inductivos y capacitivos, entre otros. En esta tesis se utilizarán sensores genéricos, es decir, se usará un símbolo para denotar a un sensor específico sin interesar su característica.

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 :

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

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

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

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

son llamadas relación de sensado primario (R_{SP}) y relación de sensado secundario (R_{SS}), respectivamente [16] y. 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 con la entidad de manufactura que sensa o por la forma de distribución sobre las líneas de producción [7]. Por ejemplo, se denominan sensores primarios aquellos elementos que sensan piezas. Los sensores secundarios están asociados con 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 esta tesis [1,7]:

- 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, 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 componentes de B sobre la línea de producción.

Los sensores de completud, como su nombre lo indica, completa la emisión de señales necesarias para que todos los elementos de trabajo sean activados y recorran las trayectorias de ida, 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 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 T_pU entre la primera pieza de trabajo que recorre la línea de producción y su sucesora. El número de sensores de este tipo no pueden 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 se 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 $T_P U$.

El primer tipo está relacionado con la transición de la primera pieza de trabajo sobre la línea de producción. Por otro lado, el orden $T_P U$, 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 fundamental para el diseño del control de procesos, pues de él depende el orden $T_P U$, más precisamente la sincronización de las operaciones.

Considere ahora la siguiente proposición [7]:

“Si la primera 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 con la proposición anterior, el orden de ida se define de la manera siguiente [7]:

“El orden de ida es la distribución ordenada de sensores principales y de completud de tal forma que todos lo elementos de trabajo que componen una línea de producción sean activados (en sus trayectorias de ida) por el paso de la primera 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 con los transportes, juegan un papel fundamental para identificar los lugares estratégicos.

Considere ahora la siguiente afirmación [2]:

“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 o alguna 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 elementos 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:

$$N_{LE} = 12 + 1 = 13$$

Aquí, $\eta_T = 12$ es el número de elementos de transporte asociados con el sistema productivo. Las localizaciones de los lugares estratégicos (L_{Gi}) relacionados con el sistema de manufactura estudiado en esta tesis se muestra en la figura siguiente:

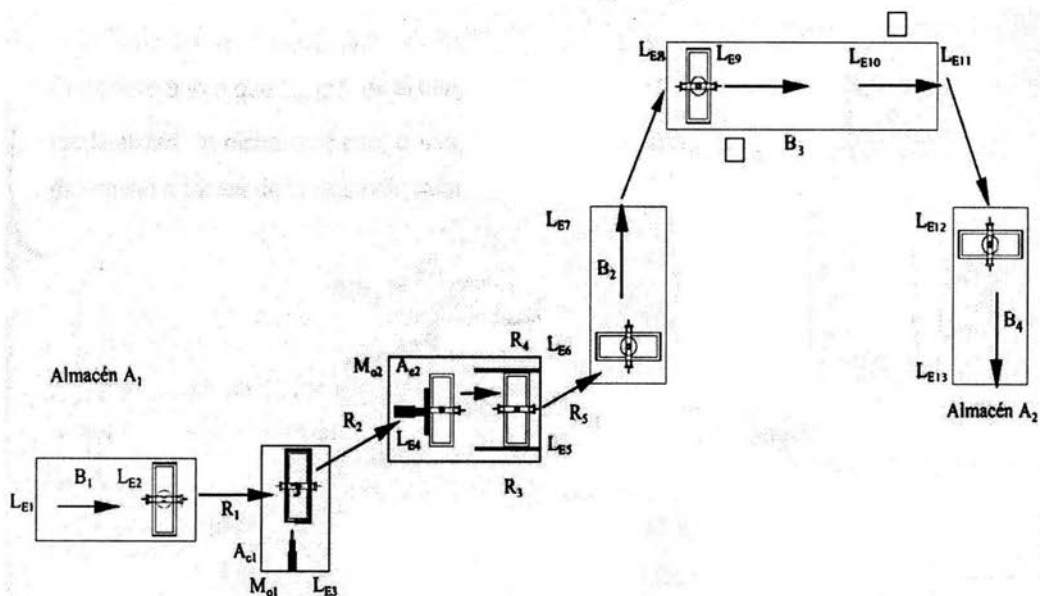


Figura 3.1. Localización de los lugares estratégicos

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 [2,7]:

“Para cada lugar estratégico existe al menos un sensor principal el cual sensorará componentes 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 por un lugar estratégico.

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 13. Dichos sensores y los componentes a los cuales sensoran, se muestran en la figura siguiente:

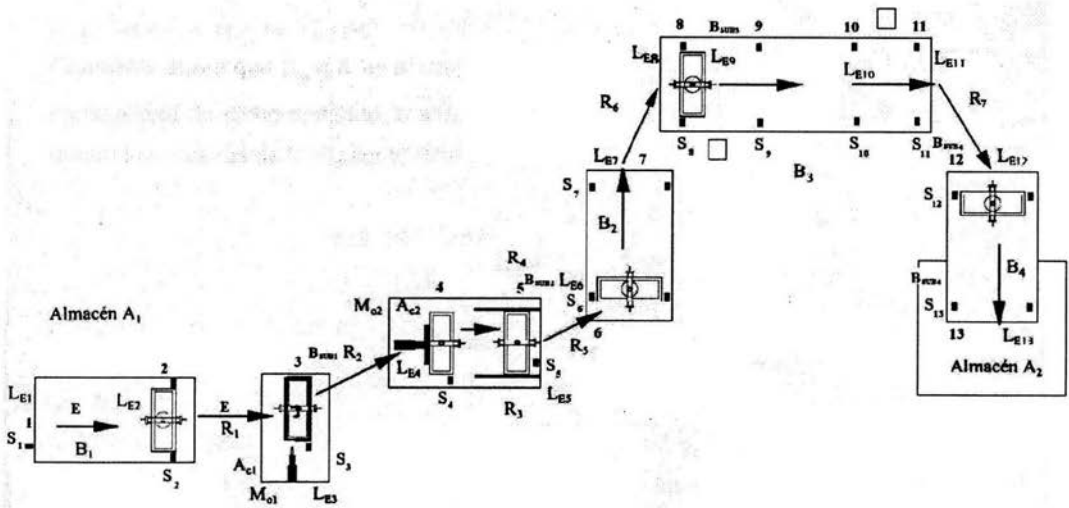


Figura 3.2. Distribución de sensores principales y elementos de dominio B sensorados

Para finalizar esta sección es necesario establecer una relación entre los sensores principales y la activación de los elementos de trabajo. Por ello considere las siguientes definiciones [2,7]:

- “Orden de operación de la maquinaria principal: En una línea de producción secuenciada el orden de operación de la maquinaria principal satisface la orden 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 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 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) $R_A(A, E_{TI}) = 1 \Leftrightarrow E_{TI}^A; A \in I \text{ y } \forall E_{TI} \in E_T$
- 2) $R_A(D, E_{TI}) = 0 \Leftrightarrow E_{TI}^D; D \in I \text{ y } \forall E_{TI} \in E_T$

es llamada relación de activación de la maquinaria de trabajo. Aquí, E_{TI}^A representa una activación del elemento E_{TI} y E_{TI}^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 $R_{SP}(S_1, PT) = 1 \Rightarrow E_{TI}^A; \forall S_1 \in S; PT \in B.$

2) Si $R_{SP}(S_1, PT) = 0 \Rightarrow E_{TI}^D; \forall S_1 \in S; PT \in B.$

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

“El orden de emisión de señales del tipo $R_{SP}(S_1, PT) = 1$ 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 [6,7]:

“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 proceso esta relacionada con las figuras 2.3 y 3.2:

“El componente “E” se localiza sobre el lugar estratégico L_{E1} . En dicho lugar se encuentra el sensor S_1 el cual activa a la banda B_1 transportando a “E” de L_{E1} a L_{E2} . En L_{E2} el sensor S_2 detecta a “E” y activa al robot R_1 el cual transporta a “E” de L_{E2} a L_{E3} localizado en M_{01} . El sensor S_3 detecta a “E” y activa al actuador AC_1 . Dicho actuador realiza la operación de marcaje en “E” produciendo la subparte B_{SUB1} . Posteriormente, el robot R_2 transporta de L_{E3} a L_{E4} la subparte B_{SUB1} . El sensor S_4 ubicado en L_{E4} detecta a la pieza (B_{SUB1}) y envía

señal al actuador A_{C2} . Dicho actuador desplaza a B_{SUB1} de L_{E4} a L_{E5} . En L_{E5} se localiza el sensor S_5 el cual detecta a B_{SUB1} y activa a los robots R_3 y R_4 . Los robots aplican simultáneamente los cordones de soldadura a B_{SUB1} produciendo B_{SUB2} . Posteriormente, el robot R_5 transporta a B_{SUB2} de L_{E5} a L_{E6} . En L_{E6} se localiza el sensor S_6 el cual detecta a B_{SUB2} y envía señal de actuación a la banda B_2 . Dicha banda transporta a B_{SUB2} de L_{E6} a L_{E7} . En L_{E7} se ubica el sensor S_7 el cual sensa a la pieza y envía señal de activación al robot R_6 . El robot R_6 transporta al subproducto B_{SUB2} de L_{E7} a L_{E8} . En L_{E8} se localiza el S_8 el cual sensa al subproducto B_{SUB2} y envía la señal de activación a la banda B_3 transportandolo de L_{E8} a L_{E9} . En L_{E9} se encuentra S_9 el cual sensa al subproducto B_{SUB2} y envía señal para realizar la operación de taladrado T_1 obteniendo así el subproducto B_{SUB3} . Posteriormente, la banda B_3 transporta el subproducto B_{SUB3} de L_{E9} a L_{E10} . En L_{E10} se ubica el sensor S_{10} el cual sensa el subproducto B_{SUB3} y envía señal para realizar la operación de taladrado T_2 de este modo se obtiene la subparte B_{SUB4} . Posteriormente, la banda B_3 transporta el subproducto B_{SUB4} del L_{E10} al L_{E11} . En L_{E11} se encuentra el sensor S_{11} el cual sensa el subproducto B_{SUB4} (PT) y manda señal de activación al robot R_7 . El robot R_7 transporta a PT del lugar L_{E11} al L_{E12} . En el lugar L_{E12} se encuentra el sensor S_{12} el cual sensa al PT y envía señal de activación a la banda B_4 . La banda B_4 transporta del lugar L_{E12} al lugar L_{E13} que es el almacén de producto terminado. En el lugar L_{E13} se encuentra el sensor S_{13} el cual sensa al PT. Con la activación de S_{13} termina el proceso”.

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

- 1) El robot R_2 .
- 2) El robot R_5 .
- 3) El taladro T_1 .
- 4) El taladro T_2 .

El principal motivo por el cual dichos robots y taladros 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 de trabajo asociado con 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 cuatro sensores de completud los cuales serán llamados SC_1 , SC_2 , SC_3 y SC_4 , respectivamente. Las ubicaciones preliminares de dichos sensores se muestran en la figura 3.3.

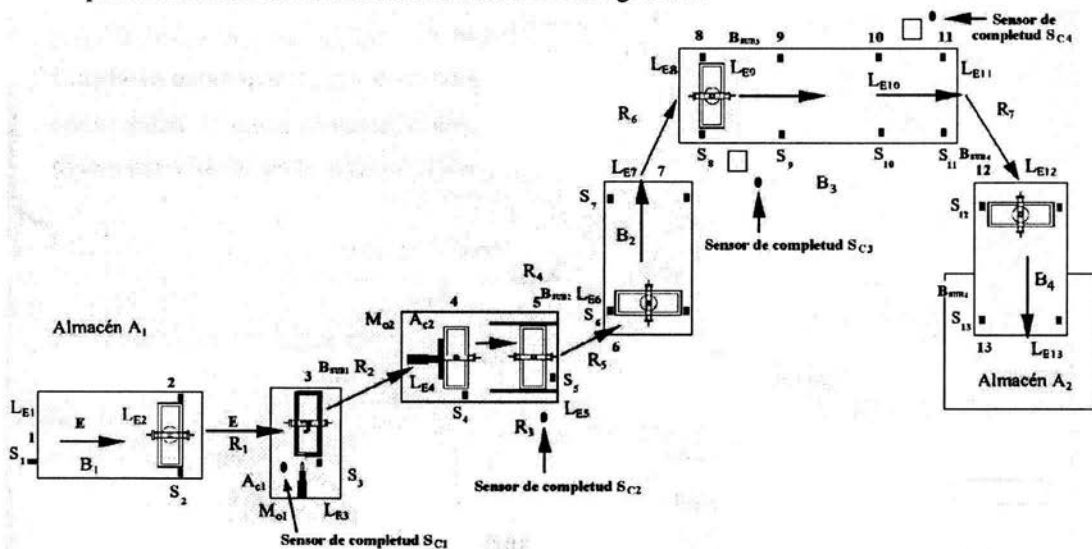


Figura 3.3. Localización de sensores de completud

Observe en la figura anterior que, el sensor SC_1 ha sido colocado sobre la trayectoria de vuelta del actuador A_{C1} . Además, la activación de SC_1 indica que la operación de marcaje ha sido realizada y, al mismo tiempo, envía señal al robot R_2 para transportar la subparte B_{SUB1} .

Por otro lado, de acuerdo con la figura 3.3, el sensor SC_2 se ha ubicado sobre la trayectoria de vuelta del robot R_3 . Dicho sensor indica finalización de la operación de soldadura y envía señal de activación al robot R_5 .

Según la figura 3.3, los sensores S_{C3} y S_{C4} se han ubicado sobre la trayectoria de vuelta de los taladros. Estos sensores indican la finalización de la operación de taladrado y envía señal de activación a la banda B_3 .

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 la sección 2.1.1. Antes de proceder a describir la crónica, es necesario fijar un tiempo de partida sobre el primer lugar estratégico y, a 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 con el lugar estratégico L_{E1} , entonces el tiempo total de recorrido de ida (T_{TRI}) se determina por la siguiente expresión:

$$T_{TRI} = \sum_{j=1}^n T_{IDAj} + T_{SC}$$

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. De acuerdo con la figura 2.3 y 3.3 el tiempo $T_{TRI} = 90s$

3.4.4.1 Crónica preliminar de recorrido de ida

"En el tiempo t_0 el componente "E" se localiza en L_{E1} (dentro de A_1). El sensor S_1 detecta a "E" y activa a la banda B_1 . En t_2 la pieza "E" se ubica en L_{E2} . El sensor S_2 detecta a "E" y envía señal de activación a R_1 . En t_6 el componente "E" se localiza sobre L_{E3} . El sensor S_3 detecta a "E" y da salida a A_{C1} . En t_7 el actuador A_{C1} ha realizado la operación de marcaje sobre "E" produciendo B_{SUB1} . En t_8 el actuador A_{C1} regresa a su punto de partida. En dicho punto se localiza el sensor S_{C1} el cual detecta el retorno de A_{C1} y envía señal al robot R_2 . En t_{18} el componente B_{SUB1} se localiza en L_{E4} . El sensor S_4 detecta llegada de B_{SUB1} y envía señal al actuador A_{C2} . En t_{24} la subparte B_{SUB1} se ubica en L_{E5} . El sensor S_5 detecta a B_{SUB1} y activa los robots R_3 y R_4 . En t_{46} los robots finalizan la operación de soldadura. En t_{47} el sensor S_{C2} detecta el regreso de R_3 y envía señal a R_5 . En t_{53} el producto B_{SUB2} se localiza en L_{E6} . El sensor S_6 detecta a B_{SUB2} y envía señal a B_2 . En t_{55} el componente B_{SUB2} se ubica en L_{E7} . En t_{59} el robot R_6 transporta a B_{SUB2} del L_{E7} al L_{E8} . El sensor S_8 detecta al

B_{SUB2} y envía señal a B_3 . En t_{60} el componente B_{SUB2} se ubica en L_{E9} . El sensor S_9 detecta al componente B_{SUB2} y envía señal al taladro T_1 . En t_{61} el taladro se acerca al componente B_{SUB2} . En t_{71} se realiza la operación de taladrado, de esta forma se obtiene el componente B_{SUB3} . En dicho punto se localiza el sensor S_{C3} el cual detecta el retorno de T_1 y envía señal a la banda B_3 . En t_{72} el componente B_{SUB3} se localiza en L_{E10} . El sensor S_{10} detecta el componente B_{SUB3} y manda señal al taladro T_2 . En t_{73} el taladro se acerca al componente B_{SUB3} . En t_{83} el taladro realiza la operación de taladrado, de esta forma se obtiene el componente B_{SUB4} . En este punto se localiza el sensor S_{C4} el cual detecta el retorno de T_2 y envía señal a la banda B_3 . En t_{84} el componente B_{SUB4} (PT) se ubica en L_{E11} . El sensor S_{11} detecta a PT y envía señal al robot R_7 . En t_{88} el robot R_7 transporta a PT del L_{E11} al L_{E12} . El sensor S_{12} detecta al PT y envía señal a la banda B_4 . En t_{90} la banda B_4 transporta a PT del L_{E12} al L_{E13} . El sensor S_{13} detecta al PT. El sensor S_{13} finaliza el proceso”.

La figura 3.4. muestra la distribución de sensores principales y de completud, sobre el recorrido de ida.

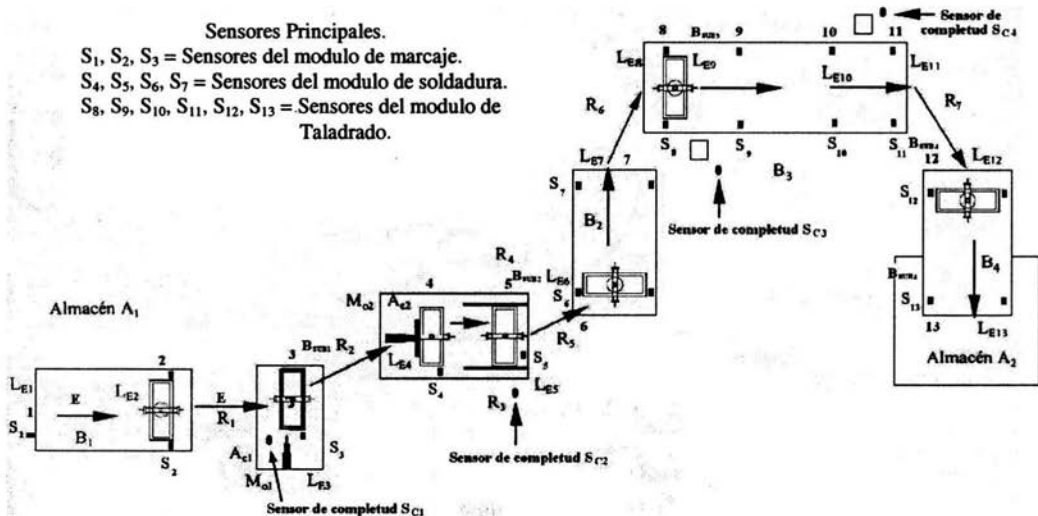


Figura 3.4. Distribución de sensores sobre el recorrido de ida

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 [6,7]. Son caracterizados sensores de sincronización en cada módulo con el propósito de satisfacer el orden TpU .

La nomenclatura que se utiliza en el capítulo es la siguiente:

TpU = Tiempo de producción unitaria.
máxima.

P_{TRI} = Particiones unitarias de transporte inicial.

P_{TRK} = Particiones unitarias de transporte finales.

Maq_{ANT} = Máquina antecésora.

S_4 = Sensor de entrada.

R_i = Robots.

B_{SUBi} = Subparte generada por la operación de manufactura.

$\sum T_{CO}$ = Sumatoria de los tiempos asociados al ciclo operativo.

T_{CO} = Tiempo de ciclo de la máquina.

Maq_{SU} = Máquina sucesora.

$V_{0\ max}$ = Velocidad de operación

SO = Sincronización de operaciones.

T_{0min} = Tiempo de operación mínimo.

\rightarrow = Orden de operación de ida.

S_7 = Sensor de salida.

S_{Ci} = Sensor de completud.

A_{Ci} = Actuador neumático.

PT = Producto terminado.

BcM = Balanceo cinemático.

$T_{0\ max}$ = Tiempo de operación máximo.

Maq_{OP} = Máquina en operación.

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". En control de procesos existen diferentes tipos de particiones[6]:

- 1) Unitaria.
- 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 por procesar o por 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 existe más de dos P_{OP} y más de tres P_{TRi} , entonces:

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

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

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 línea de producción.

La figura 4.1 muestra algunos ejemplos graficos de las particiones antes mencionadas:

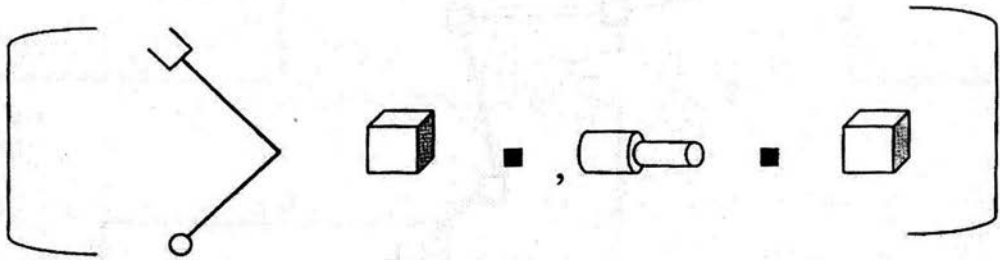
Máquina



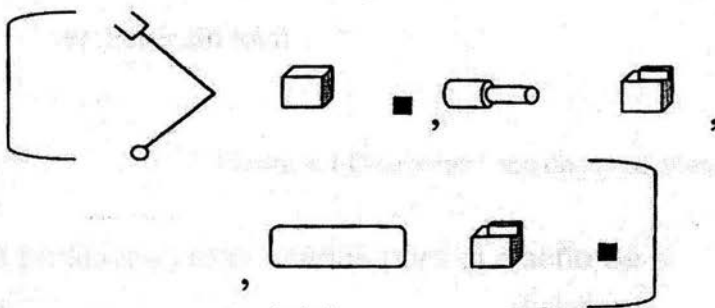
■ Sensor

Componente

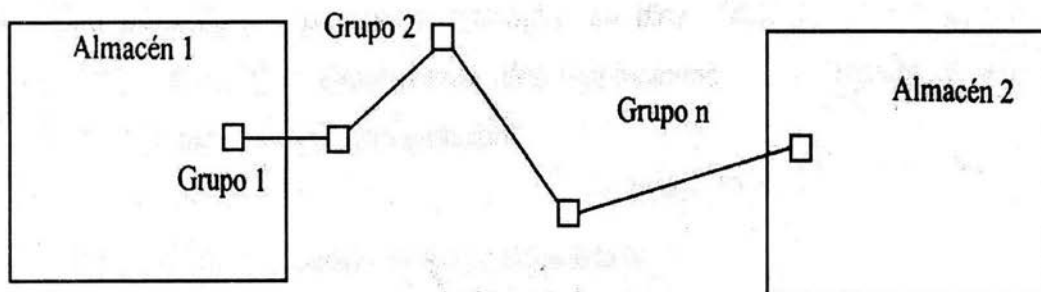
a) Partición unitaria



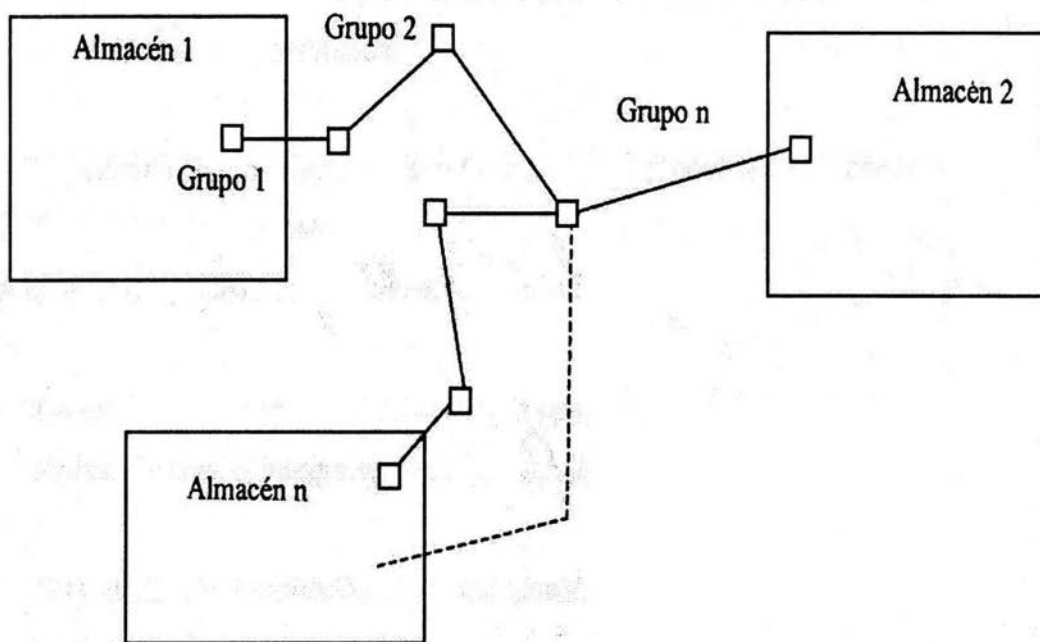
b) Partición grupal



c) Partición por operación principal



d) Partición por línea de producción



e) Partición total

Figura 4.1 a) , b), c), d), e). Diferentes tipos de particiones

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 esta tesis [2,6] :

- “Una partición por proceso u operación se dice “módulo de producción unitario” si existe exactamente dos operaciones de transporte y una operación principal en dicha partición”.
- “Un módulo de producción es una partición tal que:
 - 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 en 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 marcaje.
- 2) Módulo de soldadura.
- 3) Módulo de taladrado.

Puesto que existen, exactamente, tres módulos y, de acuerdo con la distribución de planta mostrada en la figura 3.4; el módulo de marcaje o punzonado es inicial, el de soldadura es principal y el de taladrado es el final. La figura siguiente muestra la modularización del sistema de manufactura en estudio:

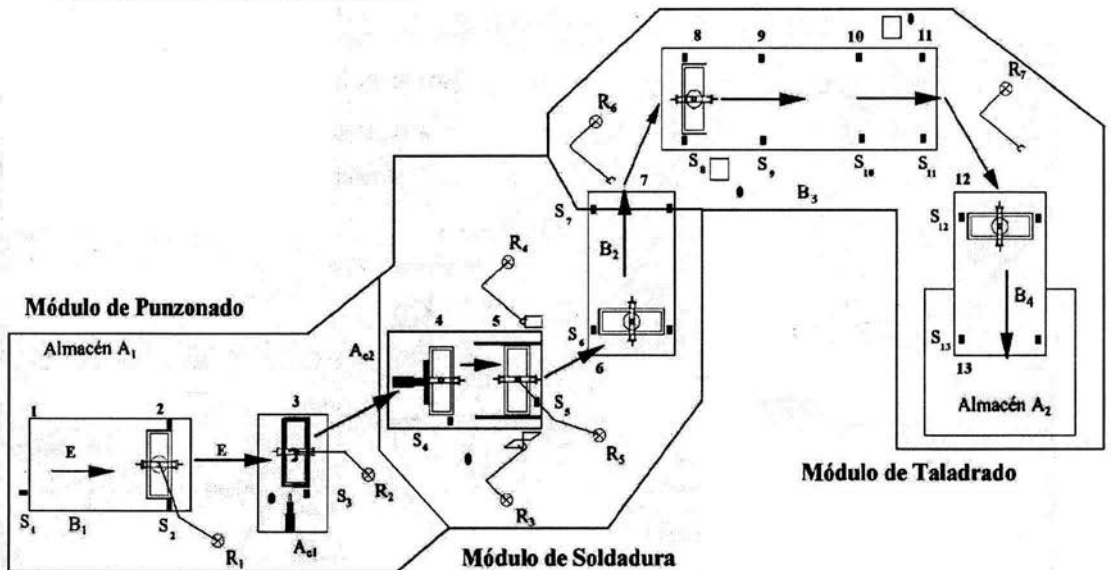


Figura 4.2. Modularización de sistema productivo

Nótese en la figura anterior que, el sensor principal S_4 representa la interacción de los módulos de producción y, al mismo tiempo, dicho sensor caracteriza salida del módulo de marcaje e inicio del módulo de soldadura. De la misma forma el sensor S_7 representa la intersección de los módulos de producción y, al mismo tiempo, dicho sensor caracteriza salida del módulo de soldadura e inicio del módulo de taladrado. Por otro lado, cada módulo integra las siguientes particiones:

- 1) Módulo de marcaje: 2 particiones unitarias de transporte y una de operación principal.
- 2) Módulo de soldadura: 3 particiones unitarias de transporte y una operación principal.
- 3) Módulo de taladrado : 6 particiones unitarias de transporte y dos operaciones principales.

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

Módulo	Partición unitaria	Descripción de operación
Marcaje	(S ₁ ,B ₁ ,E,S ₂)	Transporte
Marcaje	(S ₁ ,R ₁ ,E,S ₃)	Transporte
Marcaje	(S ₃ ,A _{C1} ,B _{SUB1} ,S _{C1})	Principal
Marcaje	(S _{C1} ,R ₂ ,B _{SUB1} ,S ₄)	Transporte
Soldadura	(S ₄ ,A _{C2} ,B _{SUB1} ,S ₅)	Transporte
Soldadura	(S ₅ ,R ₃ ,B _{SUB2} ,S _{C2})	Principal
Soldadura	(S ₅ ,R ₄ ,B _{SUB2} ,S _{C2})	Principal
Soldadura	(S _{C2} ,R ₅ ,B _{SUB2} ,S ₆)	Transporte
Soldadura	(S ₆ ,B ₂ ,B _{SUB2} ,S ₇)	Transporte
Taladrado	(S ₇ , R ₆ , B _{SUB2} , S ₈)	Transporte
Taladrado	(S ₈ , B ₃ , B _{SUB2} , S ₉)	Transporte
Taladrado	(S ₉ , T ₁ , B _{SUB3} , S _{C3})	Principal
Taladrado	(S _{C3} , B _{SUB3} , B ₃ , S ₁₀)	Transporte
Taladrado	(S ₁₀ , B _{SUB4} , T ₂ , S _{C4})	Principal
Taladrado	(S _{C4} , B _{SUB4} , B ₃ , S ₁₁)	Transporte
Taladrado	(S ₁₁ , B _{SUB4} , R ₇ , S ₁₂)	Transporte
Taladrado	(S ₁₂ , PT,B ₄ , S ₁₃)	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 [2,6]:

- “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 existe 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”.

De acuerdo con las definiciones descritas anteriormente, el módulo de soldadura es el de máxima jerarquía y, además, por ser un módulo principal, tiene un módulo antecesor (el marcaje) y uno sucesor (el taladrado).

4.4 Sincronización de procesos

Una de las tareas más complicadas de la planeación operacional es la sincronización de operaciones y procesos, pues de ella depende que el orden TpU sea satisfecho.

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, es su caso, fijar los tiempos secundarios de tal forma que el volumen de producción sea satisfecho. Considere la siguiente definición [7]:

“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 [1,2,6,7]:

- 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.

La sincronización global consiste en analizar todas las líneas de producción que componen a un sistema de manufactura. Cada línea de producción debe integrar 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 marcaje, soldadura y taladrado, respectivamente.

Cada módulo de producción contiene particiones unitarias de cuatro tipos [1]:

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

El primer tipo de partición 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 al 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 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.

Capítulo 5

Método del vórtice para sincronización local

Introducción. En este capítulo se da una metodología para sincronizar localmente módulos de producción. Dicha metodología se basa sobre la técnica del “vórtice perfecto” [1,6,7]. Se utiliza el método del vórtice para relacionar máquinas distribuidas sobre los módulos de acuerdo con el recorrido de ida. Con dichas relaciones se generarán grupos de máquinas los cuales se sincronizan localmente a T_{pU} . Se definen algunas relaciones básicas usadas para determinar el número de máquinas que pueden integrar un módulo. Es discutido el método del vórtice y se dan los pasos generales para sincronizar, a T_{pU} , grupos de máquinas.

La nomenclatura utilizada en el capítulo es la siguiente:

T_{pU} = Tiempo de producción unitario

$\sum T_F$ = Sumatoria de tiempos fijos.

T_{FMAX} = Tiempo máximo fijo asociado.

MR = Máquina de referencia.

K = Número de máquinas asociadas.

P_{OP} = Particiones de operación.

BcM = Balanceo cinemático.

R_i = Robots.

P_{TRS} = Partición de transporte de la salida (sucesora).

$T_{IDA(MR)}$ = Tiempo de ida de la máquina de referencia.

T_{DIS} = Tiempo de distribución.

I_{TS} = Intervalo de tiempos fijos.

M_i = Máquinas.

N_{GS} = Número de grupos de sincronización.

$\sum T_{CU}$ = Sumatoria de los tiempos asociados.

P_{TRE} = Partición de transporte de entrada (antecesora).

$T_{IDA(ANT)}$ = Tiempo de ida de la máquina antecesora.

$T_{IDA(SUC)}$ = Tiempo de ida de la máquina sucesora.

5.1 Definición de sincronización modular y los tiempos de la terna sincronizable

El proceso de la sincronización local o modular se puede definir de la manera siguiente[7]:

“Es un conjunto de procedimientos lógicos y sistemático orientados a distribuir los tiempos de proceso sobre las rutas o ciclos de operación de la maquinaria que integran un módulo de producción de tal forma que el T_{pU} sea satisfecho en términos temporales, de control y de operatividad permisible de la maquinaria”.

De la definición anterior se puede deducir que la sincronización local es simplemente una distribución de tiempos controlada que debe satisfacer los rangos operativos admisibles de la maquinaria y el T_{pU} .

Un módulo de producción se dice sincronizable si la siguiente relación se satisface:

$$T_{DIS} = T_{pU} - \sum T_F$$

si y solo si, $T_{pU} > \sum T_F$.

Aquí, T_{DIS} es un tiempo de distribución asociado con I_{TS} y $\sum T_F$ es la sumatoria de tiempos fijos relacionados con el módulo. En particular, si T_{FMAX} es el tiempo máximo fijo asociado con la máquina de máxima jerarquía, entonces una condición necesaria para que el módulo sea sincronizable es la siguiente [6]:

$$T_{DIS} = T_{pU} - T_{FMAX}$$

Un módulo aumenta su grado de sincronabilidad si T_{DIS} es grande y disminuye su sincronabilidad si T_{DIS} es pequeño. Un módulo se dice con "grado de sincronabilidad mínima, pero funcional, si

$$T_{pU} = T_{IDA(ANT)} + T_{IDA(MR)} + T_{IDA(SUC)}$$

Aquí, $T_{IDA(ANT)}$ es el tiempo de ida de la máquina antecesora, $T_{IDA(MR)}$ es el tiempo de ida de la máquina de referencia y $T_{IDA(SUC)}$ es el tiempo de ida de la máquina sucesora; es decir, el T_{pU} es igual a la sumatoria de los tiempos de ida de la terna mínima sincronizable.

La condición:

$$T_{pU} < T_{IDA(ANT)} + T_{IDA(MR)} + T_{IDA(SUC)}$$

implicará que:

- 1) El suministro y/o retiro de las piezas de la máquina referencial no puede ser realizado.
- 2) Una de las máquinas de la terna o dos de ellas o la terna completa no puede satisfacer los rangos de operación permisible.

Por otro lado, una condición tal que:

$$T_{pU} > T_{IDA(ANT)} + T_{IDA(MR)} + T_{IDA(SUC)}$$

implicará que:

- 1) Puede ser agregadas máquinas antecesoras y/o sucesoras a la terna sincronizable mínima.

- 2) Se tenga un T_{DIS} que permita distribuir tiempos en la terna sincronizable mínima tal que los parámetros operacionales de las máquinas tiendan a ser satisfechos en rangos amplios.

Por tanto, es posible proponer la siguiente afirmación [7]:

“El número de máquinas que puede integrar un módulo de producción está en función de la diferencia entre el T_{pU} y el tiempo máximo fijo de operación principal”.

5.2 El método del vórtice

El método del vórtice es una representación geométrica usada para relacionar la máquina de referencia sus antecesoras y sucesoras que integran un módulo de producción formando grupos de sincronización [6,7]. El origen del vórtice es en la máquina referencial y su término es en la última máquina ya sea una antecesora inicial o una sucesora final. La figura siguiente muestra un vórtice el cual relaciona 5 máquinas asociadas con un módulo de producción.

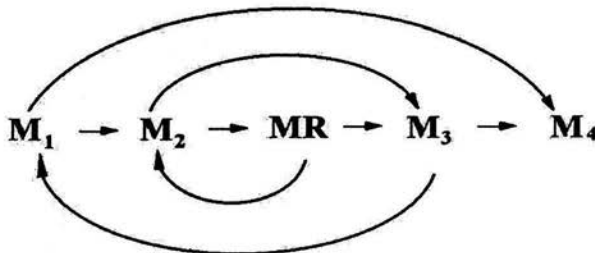


Figura 5.1 Representación geométrica de un vórtice

Observe en la figura anterior que, las máquinas M_1 y M_4 son antecesora inicial y sucesora final, respectivamente. En tanto la terna mínima sincronizable es (M_2, MR, M_3) si y solo si M_2 y M_3 son máquinas de transporte.

Los vórtices se pueden clasificar en:

- 1) Vórtices perfectos.

2) Vértices extendidos.

Un vértice perfecto es aquel en donde su extremo final conecta exactamente la primera máquina del módulo o la última. Un vértice extendido se caracteriza por una conexión lineal en un conjunto de máquinas sucesoras o antecesoras extremas. La figura siguiente muestra un vértice extendido:

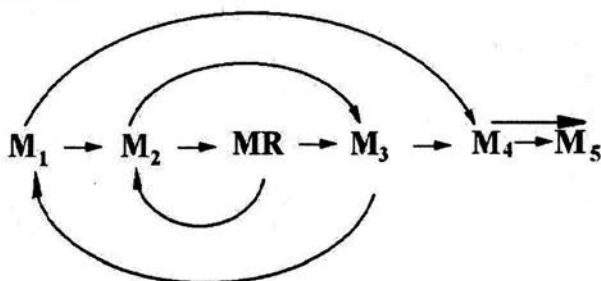


Figura 5.2 Representación de un vértice extendido

Un ejemplo de vértice perfecto es el mostrado en la figura 5.1. Por otro lado, los vértices se subclasifican en:

- 1) Vértices antecesores.
- 2) Vértices sucesores.

Un vértice es antecesor si la primera máquina de conexión con la máquina referencial es antecesora. Si la primera máquina de conexión con la referencial es sucesora, entonces el vértice es sucesor. La figura 5.1 y 5.2 muestran dos vértices antecesores.

Es importante señalar que las máquinas que integran el módulo deben estar relacionadas y ordenadas de acuerdo con el recorrido de ida. El vértice es usado para generar grupos de máquinas para su posterior sincronización. Así, los grupos de máquinas asociados con el vértice mostrado en la figura 5.1 son:

- 1) Grupo 1 = $\{M_2, M_R\}$
- 2) Grupo 2 = $\{M_2, M_R, M_3\}$
- 3) Grupo 3 = $\{M_1, M_2, M_R, M_3\}$
- 4) Grupo 4 = $\{M_1, M_2, M_R, M_3, M_4\}$

Por tanto, si el grupo es inicial, dicho grupo contiene exactamente dos máquinas. El número de grupos de sincronización (N_{GS}) satisface la siguiente relación [6,7]:

$$N_{GS} = K - 1$$

siendo “K” el número de máquinas asociadas con el módulo. Es importante señalar que el último grupo de sincronización deberá integrar todas las máquinas del módulo.

5.3 El procedimiento de sincronización local o modular

En esta sección se proponen los pasos generales para sincronizar a TpU los grupos de máquinas relacionados con el vórtice; esto es [7]:

- 1) Determinar T_{DIS} para el cual el TpU y el T_F o la ΣT_F son datos conocidos.
- 2) Distribuir los tiempos de procesos sobre las rutas de trabajo de la máquina referencial tal que la suma de dichos tiempos sea menor o igual al TpU.
- 3) El T_{DIS} debe ser particionado y distribuido sobre:
 - a) La ruta de acercamiento.
 - b) La ruta de retiro primario.
 - c) La ruta de retiro secundario de la máquina referencial.
- 4) En la distribución de las particiones de T_{DIS} sobre las rutas de la máquina referencial, se debe tomar en cuenta los rangos permisibles operacionales de la máquina.
- 5) La distribución del T_{DIS} no es única.
- 6) Una vez distribuidos los tiempos en las rutas de la máquina referencial, dicha distribución debe ser fijada y la suma de los tiempos de ida de la máquina se controlan por dos sensores; uno localizado al inicio de la ruta y otro localizado en la intersección de las rutas de retiro primario y secundario (si se da el caso que la máquina sucesora a la referencial requiera de un sensor).
- 7) La máquina referencial se dice “sincronizada individualmente” si los pasos anteriores han sido satisfechos. Por otro lado, si la suma de los tiempos de ciclo es igual al TpU, entonces dicha máquina “opera a ciclo continuo”; es decir, sin detenerse. Si la suma de los tiempos es

menor al TpU , entonces la máquina opera a ciclo intermitente; es decir, se detiene en cada ciclo en su punto de partida.

- 8) Seleccionar el grupo 1 y sincronizarlo usando los pasos siguientes:
- Asignar el tiempo de vuelta secundario (tomando en cuenta si el ciclo es intermitente, el tiempo en el que se detiene la máquina) de la máquina referencial a la ruta de ida de la máquina antecesora o sucesora del grupo.
 - La suma de los tiempos de ida de la máquina referencial y la sucesora o antecesora debe ser igual al TpU .
 - El tiempo de vuelta de la máquina antecesora o sucesora debe ser menor o igual a la diferencia entre el TpU y el tiempo de ida de cualquier de las dos máquinas.

Cabe señalar que si los pasos del inciso 8) han sido satisfechos, entonces el grupo 1 ha sido sincronizado a TpU y dicha sincronización se controla por sensores; es decir, con los asociados a la máquina referencial y otro localizado al inicio del ciclo de operación de la máquina antecesora o al final de la ruta de ida de la sucesora.

- 9) Seleccionar el grupo 2 y sincronizarlo usando los pasos siguientes:
- Descomponer el tiempo de ida de la máquina antecesora o sucesora del grupo 1 en dos proporciones.
 - Una proporción es asignada a la ruta de ida de la máquina antecesora o sucesora del grupo 1, la otra es reasignada a las rutas de ida de la máquina antecesora o sucesora del grupo 1.
 - La suma de los tiempos de ida de las máquinas del grupo 2 debe ser igual al TpU .
 - Los tiempos de vuelta de las máquinas antecesoras o sucesora del grupo 1 y del grupo 2 se determinan según el paso 8-c)

Si los pasos del inciso 9) son satisfechos, entonces la terna mínima ha sido sincronizada a TpU .

- 10) Seleccionar el grupo 3 y sincronizarlo usando los pasos siguientes:

- a) Descomponer el tiempo de ida de la máquina antecesora o sucesora del grupo 2 o sumar los tiempos de ida de ambas máquinas y generar tres nuevas proporciones.
- b) Usar los pasos 9-a), 9-b), y 9d) para distribuir los tiempos.
- c) La suma de los tiempos de ida del grupo 3 debe ser igual al T_{pU} .

11) Tomar el grupo “n” y usar el paso 10) las veces que sean necesarias generando proporciones de tiempos a partir de la suma de los tiempos de ida de las máquina antecesora y sucesora de todos los grupos anteriores. Además, la siguiente restricción debe

ser satisfecha: $T_{pU} = \sum_{i=1}^k T_{IDA}$; para el grupo “n”.

Cabe señalar que si “n” es el último grupo de máquinas, entonces se dirá que el módulo ha sido sincronizado localmente a T_{pU} . Dicha sincronización es gobernada por el sistema de sensado de ida. Además, en cada proceso de sincronización grupal se deben verificar si las asignaciones de los tiempos de ida de las máquinas antecesoras o sucesoras no implica que los rangos de operación de dichas máquinas sobrepasen los parámetros permisibles.

Capítulo 6

Sincronización local del módulo de soldadura

Introducción: En este capítulo se sincroniza localmente el módulo de soldadura. Se utiliza el método del vórtice para relacionar máquinas distribuidas sobre los módulos de acuerdo con el recorrido de ida. Con dichas relaciones se generarán grupos de máquinas los cuales se sincronizarán localmente a T_{pU} [1,7].

La nomenclatura que se utiliza en el capítulo es la siguiente:

T_{pU} = Tiempo de producción unitaria.

T_F = Tiempo fijo.

L_T = Lugares de trabajo.

R_i = Restricción.

T_{IDA} = Tiempo de ida de cada máquina.

T_{FM} = Tiempo fijo máximo.

S_i = Sensores.

T_{DIS}^L = Número de distribución de tiempos

L = Número de distribuciones.

L_{ij} = Lugares de operación.

P_i = Proporciones de vuelta.

D_P = Distribución de planta.

S_{IDA} = Sensado de ida.

SL = Sincronización local.

F = Número de módulos.

MR = Máquina de referencia.

N_{GS} = Número de grupos de sincronización.

S_A = Conjunto de sensores que gobierna el grupo N.

T_{ij} = Tiempos de operación.

6.1. El proceso de sincronización local del módulo de soldadura

En esta sección se utiliza el método del vórtice para sincronizar localmente el módulo de soldadura descrito en la sección anterior [7]. De acuerdo con la figura 4.2, el módulo de soldadura está integrado por: 1) el actuador AC_2 , 2) los robots R_3 y R_4 , 3) el robot R_5 y la banda B_2 . La colocación de dicha maquinaria en términos del recorrido y sensado de ida se muestra en la figura siguiente:

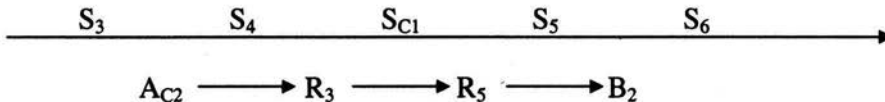


Figura 6.1. La maquinaria del módulo de soldadura colocada en términos del recorrido de ida

6.2 El vórtice y grupos de sincronización

La máquina referencial (MR) es R_3 , ya que dicha máquina requiere del máximo tiempo fijo ($T_{FM} = 18s$). Cabe señalar que el robot R_4 no es considerado pues,

$$T_{FM}(R_3) > T_{FM}(R_4)$$

La figura siguiente muestra el vórtice de sincronización local relacionado con la maquinaria del módulo de soldadura:

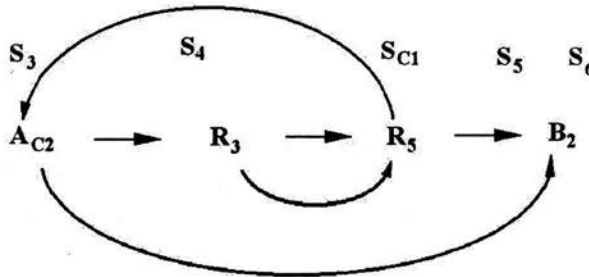


Figura 6.2. Vórtice de sincronización sucesor del módulo de soldadura y sistema de sensado

Para poder determinar el número de grupos de sincronización, es necesario usar la relación $N_{GS} = k - 1$. Puesto que $k = 4$, entonces $N_{GS} = 3$. Cabe señalar que el robot R_4 no fue considerado en el cálculo. Dichos grupos son:

- 1) $G_1 = \{R_3, R_5\}_{S_A}$
- 2) $G_2 = \{A_{C2}, G_1\} = \{A_{C1}, R_3, R_5\}_{S_B}$
- 3) $G_3 = \{G_2, B_2\} = \{A_{C1}, G_1, B_2\} = \{A_{C2}, R_3, R_5, B_2\}_{S_C}$

Nótese que, cada grupo está controlado por el sistema de sensado S_A , S_B y S_C ; es decir:

- i) $S_A = \{S_4, S_{C1}\}$
- ii) $S_B = \{S_4, S_A\} = \{S_3, S_4, S_{C1}\}$
- iii) $S_C = \{S_B, S_6, S_7\} = \{S_3, S_4, S_{C1}, S_5, S_6\}$

Para poder distribuir los tiempos de proceso sobre los lugares geométricos o rutas de trabajo, se hará uso de los pasos descritos en la sección 5.3; esto es:

- 1) El $T_{pU} = 39s/pieza$, $T_F(R_3) = 18s$ y $T_{DIS} = 4s$
- 2) La distribución de los tiempos de proceso sobre las rutas de trabajo de la máquina referencial R_3 se muestra en la figura siguiente:

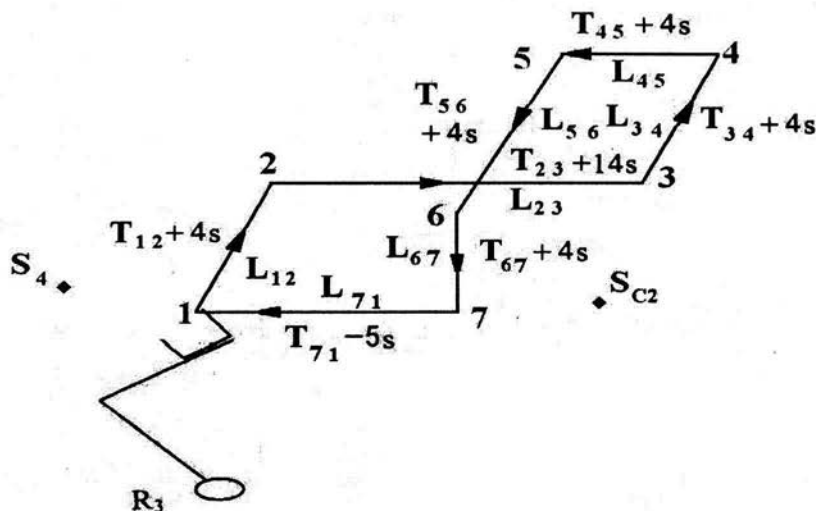


Figura 6.3. Distribución de tiempos sobre las rutas de la máquina referencial

Note en la figura anterior que:

- a) $T_{12} + T_{23} + T_{34} + T_{45} + T_{56} + T_{67} = T_{IDA}(R_3)$
 - b) $T_{71} = T_{VUELTA}(R_3)$
 - c) T_{12} y T_{34} son tiempos de acercamiento.
 - d) T_{23} y T_{45} son tiempos de operación principal.
 - e) T_{34} es un tiempo de retiro primario.
 - f) T_{56} es un tiempo de retiro secundario.
 - g) El recorrido de ida junto con los tiempos de ida está controlado por los sensores S_4 (primario) y S_{C2} (de completud).
 - h) $T_{DIS} = T_{12} + T_{34} + T_{56} + T_{67} + T_{71}$
- 3) Se considera que los rangos permisibles de las máquinas se satisfacen; es decir:

$$R_A(M) = \hat{R}_A(M)$$

4) Otra distribución de tiempos sobre las rutas de la máquina referencial se muestra en la figura siguiente:

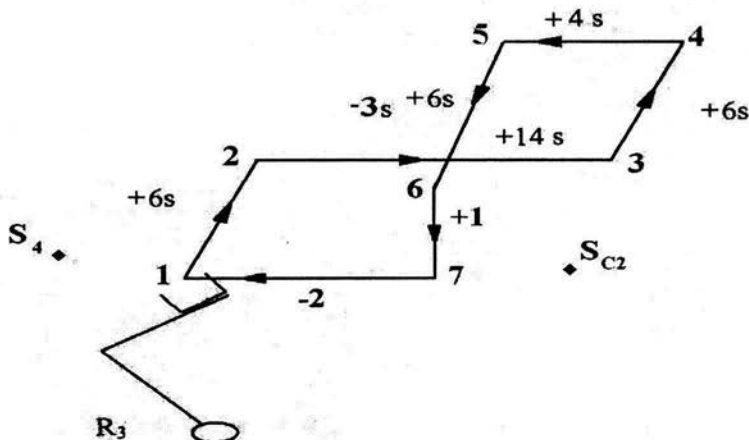


Figura 6.4. Otra distribución de tiempos

Cabe señalar que toda distribución de tiempos debe satisfacer:

- 1) $T_{DIS} = T_{DIS}' = T_{DIS}'' \dots T_{DIS}^L$
- 2) $R_A(M) = R_A'(M) = R_A''(M) \dots R_A^L$

Aquí, L es el número de distribuciones. Por otro lado, es claro que una distribución T_{DIS} funcional es aquella donde tiempo de vuelta secundario sea el máximo posible. Además, es conveniente aclarar que la posición del sensor S_4 no es fija; es decir, se puede recorrer sobre la ruta L_{12} . Sin embargo, las activaciones de los sensores S_5 y S_{C1} deben gobernar el $T_{IDA}(R_3)$, cualesquiera que sea la distribución de T_{DIS} .

- 5) La distribución de tiempos sobre las rutas de R_3 es la asociada con el paso 2 y es controlada por S_4 y S_{C2} .
- 6) La máquina R_3 ha sido sincronizada individualmente a T_{pU} . Además,
 - 6.1) Si $T_{CICLO}(R_3) < T_{pU}$, entonces R_3 opera a ciclo intermitente.
 - 6.2) Si $T_{CICLO}(R_3) = T_{pU}$, entonces R_3 opera a ciclo continuo.

Aquí, T_{CICLO} es el tiempo de ciclo. Se considerará que $T_{\text{CICLO}}(R_3) = T_{pU}$ y, por tanto, R_3 operará a ciclo continuo; es decir, sin detenerse.

7) El grupo 1 es:

$$G_2 = \{R_3, R_5\}_{S_A}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 1:

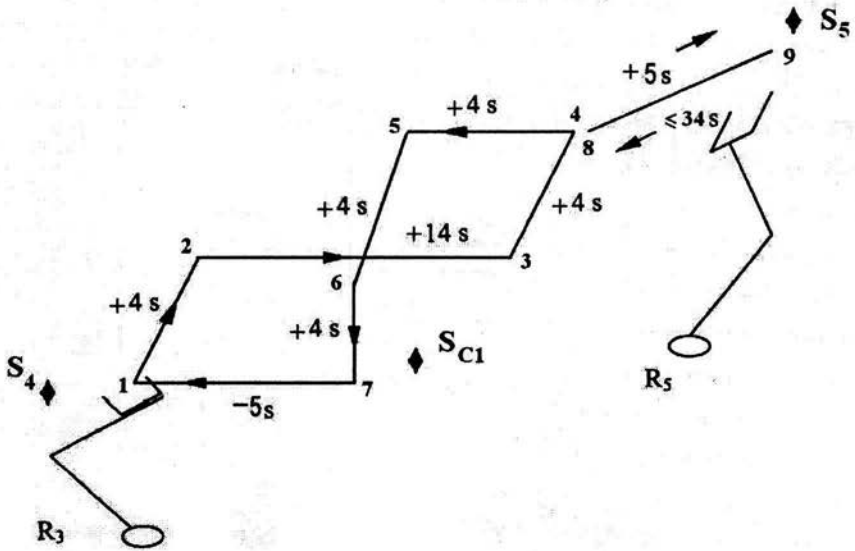


Figura 6.5. Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 1

Note en la figura anterior que:

- 1) $T_{\text{IDA}}(R_5) = T_{\text{VUELTA}}(R_3) = T_{71} = 5s$
- 2) $T_{pU} = T_{\text{IDA}}(R_3) + T_{\text{IDA}}(R_5)$.
- 3) T_{89} es el tiempo de ida de R_5 .
- 4) T_{98} es el tiempo de vuelta de R_5 .
- 5) $T_{89} \leq 34s$; es decir, $T_{89} \leq T_{pU} - T_{98}$.

En este trabajo $T_{89} = 5s$ y R_5 operará a ciclo intermitente. Además, el grupo 1 ha sido sincronizado a T_{pU} y el sensado de control es S_A .

8) El grupo 2 está compuesto por:

$$G_2 = \{AC_2, G_1\} = \{AC_2, R_3, R_5\}_{SB}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 2:

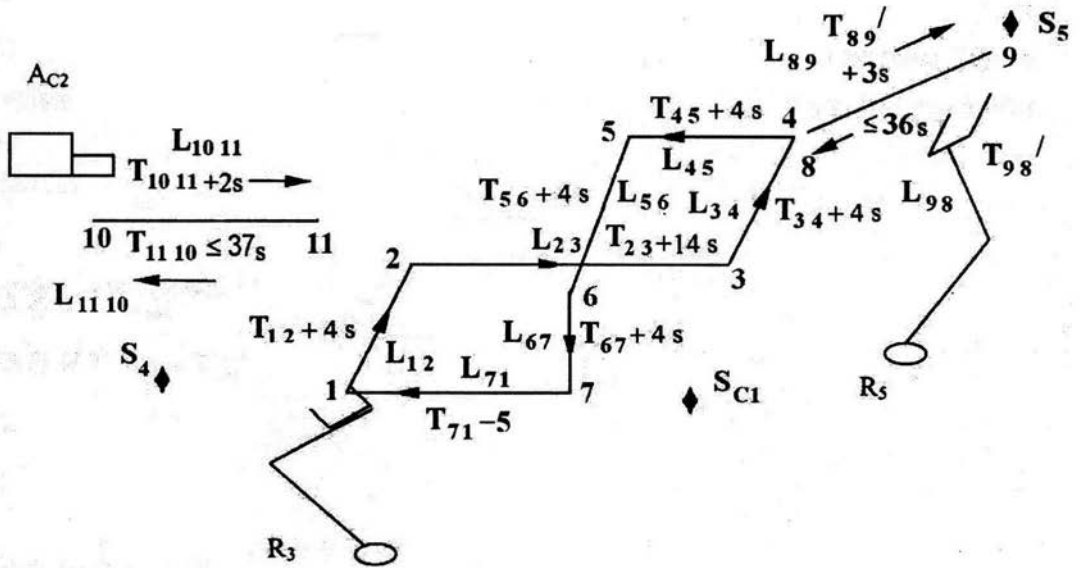


Figura 6.6. Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 2

Note en la figura anterior que:

- 1) $T_{pU} = T_{1011} + T_{IDA}(R_3) + T_{89}'$
o, equivalentemente:
 $T_{pU} = T_{IDA}(AC_2) + T_{IDA}(R_3) + T_{IDA}'(R_5)$
- 2) $T_{IDA}(AC_2) + T_{IDA}'(R_5) = 5s$
- 3) Las proporciones de $T_{VUELTA}(R_3)$ usadas para los tiempos de ida de la sucesora (R_5) y antecesora (AC_2) fueron:

$$P_1 = 2s ; P_2 = 3s$$

- 4) $T_{1011} \leq 37$; pues $T_{1011} \leq T_{pU} - T_{1110}$
- 5) $T_{89}' \leq 36$; ya que $T_{89} \leq T_{pU} - T_{98}'$

Cabe señalar que los símbolos “/” y “//” se usan para indicar los tiempos redistribuidos. Por otro lado, los tiempos $T_{1011} = 2s$ y $T_{89} = 3s$ y, por tanto, las máquinas A_{C2} y R_5 operarán a ciclo intermitente. Además, la terna mínima sincronizable es (A_{C2}, R_3, R_5) la cual es sensada por S_B .

9) Las máquinas del grupo 3; es decir, el grupo final son:

$$G_3 = \{G_2, B_2\} = \{A_{C2}, G_1, B_2\} = \{A_{C2}, R_3, R_5, B_2\}_{SC}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 3:

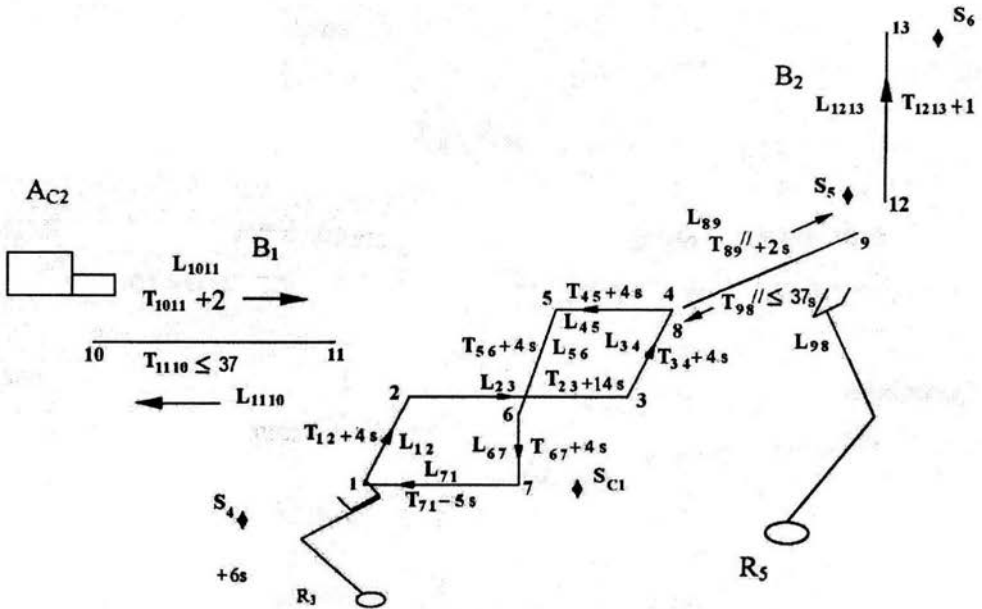


Figura 6.7. Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 3

Note en la figura anterior que:

$$1) T_{pU} = T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}(R_3) + T_{IDA}''(R_5) + T_{IDA}(B_2)$$

o, equivalentemente:

$$T_{pU} = T_{1011} + T_{IDA}(R_3) + T_{89} + T_{1213}$$

$$2) T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}''(R_5) + T_{IDA}(B_2) = T_{71} = 5s$$

3) Las proporciones usadas fueron las siguiente:

$$P_1 = 2s \quad P_2 = 2s \quad P_3 = 1s$$

$$4) T_{1011}' \leq T_{pU} - T_{1110}'$$

$$5) T_{89}'' \leq T_{pU} - T_{98}''$$

6) La banda B₂ se considera de ida "pura".

Se considerarán los tiempos de vuelta siguientes: $T_{1110} = 3s$ y $T_{98} = 5s$. Por tanto, A_{C2} y R₅ operan a ciclo intermitente. Además, el módulo de soldadura ha sido sincronizado a T_{pU} y dicha sincronización es gobernada por el sistema de sensado S_C.

Capítulo 7

Sincronización local del módulo de marcaje

Introducción: En este capítulo se sincroniza, localmente, el módulo de marcaje descrito en la sección 4.2 usando el método del vórtice [1,6,7]. Dicho módulo está compuesto por las máquinas: 1) B_1 , 2) R_1 , 3) A_{C1} y 4) R_2 .

La nomenclatura utilizada en el capítulo es la siguiente:

K = Número de máquinas asociadas.

G_i = Grupos de sincronización.

S_i = Grupo de sensores.

T_{ij} = Tiempos de operación.

T_{pU} = Tiempo de producción unitario.

B_i = Bandas.

N_{GS} = Número de grupos de sincronización.

L_{ij} = Lugares de operación.

T_E = Tiempo de espera.

A_{C1} = Actuador neumático.

7.1 El vórtice del módulo de soldadura y grupos de sincronización

La figura 7.1 muestra la colocación de la maquinaria de acuerdo con el recorrido y sentido de ida.

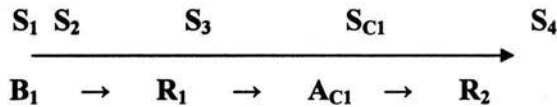


Figura 7.1. La maquinaria del módulo de marcaje colocada en el recorrido de ida

Nótese, en la figura 7.1 que, la máquina referencial es, A_{C1} , puesto que dicha máquina es de operación principal. La figura 7.2 muestra el vórtice de sincronización relacionado con las máquinas del módulo de marcaje:

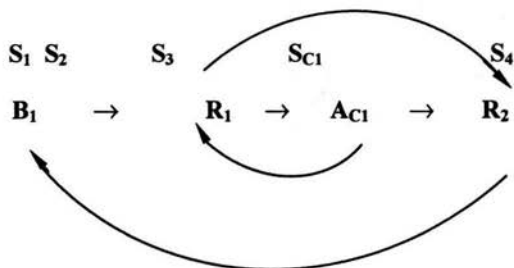


Figura 7.2. Vértice antecesor del módulo de marcaje

Obsérvese en la figura anterior que $k = 4$ y, por tanto, $N_{GS} = 3$. Dichos grupos de sincronización son:

- 1) $G_1' = \{R_1, AC_1\}_{SA'}$
- 2) $G_2' = \{G_1', R_2\} = \{R_1, AC_1, R_2\}_{SB'}$
- 3) $G_3' = \{B_1, G_2'\} = \{B_1, G_1', R_2\} = \{B_1, R_1, AC_1, R_2\}_{SC'}$

Aquí:

- i) $SA' = \{S_3, SC_1\}$
- ii) $SB' = \{SA', S_4\} = \{S_3, SC_1, S_4\}$
- iii) $SC' = \{S_1, S_2, SB'\} = \{S_1, S_2, SA', S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, SC_1, S_4\}$

7.2 Uso de la metodología para sincronizar el módulo de marcaje

Al igual que el capítulo 6, se usarán los pasos de la sección 5.3 para sincronizar el módulo de marcaje. Esto es:

- 1) El $TpU = 39s/pieza$, $T_F(A_{C1}) = 1s$ y $T_{DIS} = 38s$
- 1) La distribución de tiempo de proceso sobre las rutas de trabajo de la máquina referencial (A_{C1}) se muestran en la figura siguiente:

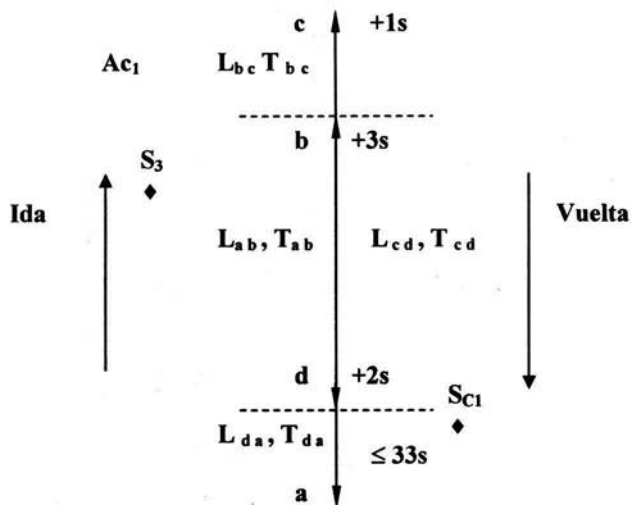


Figura 7.3. Rutas de trabajo y distribución de tiempos en la máquina referencial

La tabla siguiente describe los valores de las variables mostradas en la figura anterior.

Rutas		Tiempos		Descripción
Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	
L_{ab}	-	$T_{ab}=3s$	-	Acercamiento
L_{bc}	-	$T_{bc}=1s$	-	Operación principal
L_{cd}	-	$T_{cd}=2s$	-	Regreso primario
-	$L_{d,a}$	-	$T_{cd} \leq 33s$	Regreso secundario

Tabla 7.1. Descripción de los tiempos y rutas de la máquina referencial AC_1

Nótese en la figura 7.3. que, el recorrido de ida está sensado por S_3 (sensor principal) y SC_1 (sensor de completud). Además,

$$T_{DIS} = T_{ab} + T_{bc} + T_{cd} = 38s$$

3) Se considerará en este trabajo de tesis que:

$$R_A(M) = \hat{R}_A(M)$$

4) Otra distribución de tiempos relacionado con la máquina referencial AC_1 se muestra en la figura siguiente:

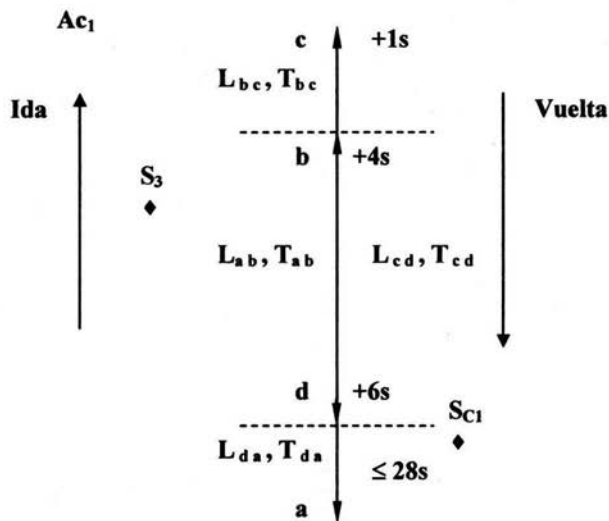


Figura 7.4. Otra distribución de tiempos sobre las rutas de A_{C1}

- 1) La distribución de tiempos que será considerada en este trabajo es la relacionada con el paso 2 y es controlada por S_3 y S_{C1} .
- 6) La máquina A_{C1} ha sido sincronizada individualmente a T_{pU} :
 - 6.1) Si $T_{CICLO}(A_{C1}) < T_{pU}$, entonces A_{C1} opera a ciclo intermitente.
 - 6.2) Si $T_{CICLO}(A_{C1}) = T_{pU}$, entonces A_{C1} opera a ciclo continuo.

Aquí, $T_{CICLO}(A_{C1})$ es el tiempo de ciclo de actuador A_{C1} . Se tomará en cuenta $T_{CICLO}(A_{C1}) < T_{pU}$ con $T_{cd} = 2s$ y, por tanto, A_{C1} permanecerá en su posición inicial (después de haber recorrido un ciclo) $T_E = 31s$ siendo T_E un tiempo de espera tal que:

$$T_{pU} = T_{IDA}(A_{C1}) + T_{cd} + T_E$$

- 7) El grupo G_1' está formado por las siguiente máquinas:

$$G_1' = \{R_1, A_{C1}\}_{SA'}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos de proceso sobre las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 1:

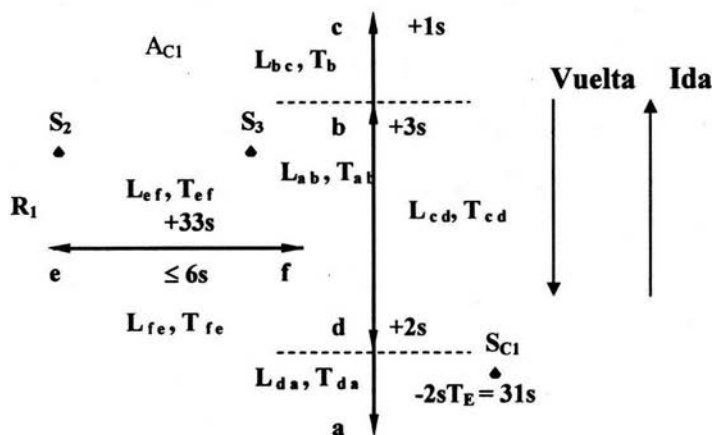


Figura 7.5. Distribución de tiempos en las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 1

De acuerdo con la figura anterior, se tiene que:

- 1) T_{ef} es el tiempo de ida de R_1 .
- 2) T_{fe} es el tiempo de vuelta de R_1 .
- 3) $T_{pU} = T_{IDA}(AC_1) + T_{ef}$
- 4) $T_{fe} \leq T_{pU} - T_{ef}$

8) El grupo 2 del módulo de marcaje está integrado por las máquinas siguientes:

$$G_2' = \{G_1', R_2\} = \{R_1, AC_1, R_2\}_{SB'}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas del grupo G_2' .

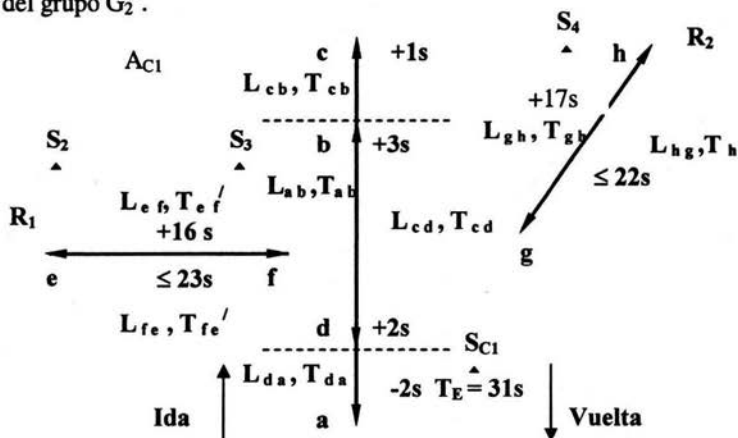


Figura 7.6. Distribución de los tiempos de proceso sobre las rutas de trabajo del grupo G_2'

Note en la figura anterior que:

- 1) T_{gh} es el tiempo de ida de R_3 .
- 2) T_{hg} es el tiempo de vuelta de R_3 .
- 3) $T_{pU} = T_{IDA'}(R_1) + T_{IDA}(A_{C1}) + T_{IDA}(R_3)$
- 4) $T_{IDA'}(R_1)$ es el nuevo tiempo de vuelta de R_1 ; es decir,

$$T_{IDA'}(R_1) = T_{fe} - 16$$
- 5) $T_{fe'} \leq 23$
- 6) $T_{hg} \leq 22$

9) El grupo G_3' ; es decir, el final, está formado por las siguientes máquinas:

$$G_3' = \{B_1, G_2'\} = \{B_1, G_1', R_2\} = \{B_1, R_1, A_{C1}, R_2\}_{SC'}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos de procesos sobre las rutas de las máquinas del grupo G_3' :

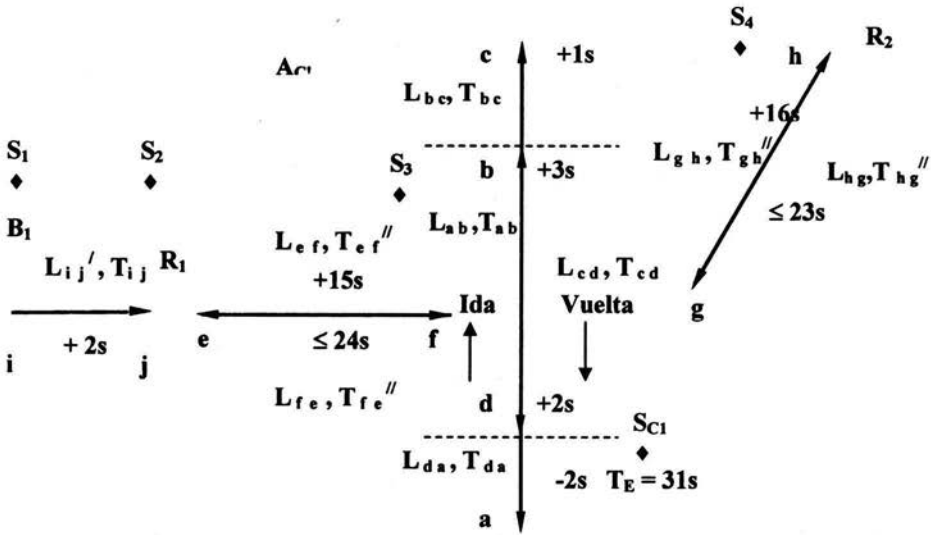


Figura 7.7. Distribución de tiempos de proceso sobre las rutas del grupo G_3'

De acuerdo con la figura anterior, se tiene que:

- 1) T_{ij} es el tiempo de ida de la banda B_1 .
- 2) $T_{pU} = T_{IDA}(B_1) + T_{IDA}''(R_1) + T_{IDA}(A_{C1}) + T_{IDA}''(R_2)$
- 3) $T_{IDA}''(R_1) = T_{ef}'' = T_{ef} - 1$
- 4) $T_{IDA}''(R_2) = T_{gh}'' = T_{gh} - 1$
- 5) $T_{VUELTA}''(R_1) = T_{ef}'' \leq T_{pU} - T_{fe}''$; $T_{fe}'' \leq 24$
- 6) $T_{VUELTA}''(R_2) = T_{gh}'' \leq T_{pU} - T_{hg}''$; $T_{hg}'' \leq 23$
- 7) $T_{VUELTA}(B_1)$ no existe pues la banda B_1 se considera de ida pura.

Aquí, $T_{ef}'' = 15s$ y $T_{gh}'' = 16s$ por lo que R_1 y R_2 operarán a ciclo intermitente con espera de $T_E = 31s$.

Capítulo 8

Sincronización local del módulo de taladrado

Introducción: En este capítulo se sincroniza, localmente, el módulo de taladrado descrito en la sección 4.2 usando el método del vórtice [1,6,7]. Dicho módulo está compuesto por las máquinas: 1) R₆, 2) B₂, 3) T₁, 4) T₂, 5) B₃, 6) B₄, 7) R₇.

La nomenclatura utilizada en el capítulo es la siguiente:

T₁ = Máquina de taladrado (taladro).

K = Número de máquinas asociadas.

G_i = Grupos de sincronización.

S_i = Grupos de sensores.

T_{ij} = Tiempos de trabajo.

PT = Producto terminado.

N_{GS} = Número de grupos de sincronización.

L_{ij} = Lugares de trabajo.

T_E = Tiempo de espera.

8.1 El vórtice y grupos de sincronización

La figura 8.1 muestra la colocación de la maquinaria de acuerdo con el recorrido y sentido de ida.

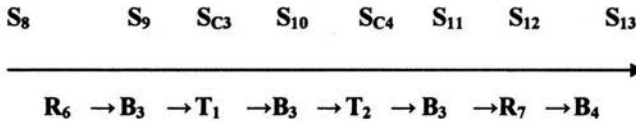


Figura 8.1. La maquinaria del módulo de taladrado colocada en el recorrido de ida

Se observa, que, la máquina referencial es, T₂, puesto que dicha máquina es de operación principal. Nótese que la máquina T₂ produce un subproducto más cercano a PT. La figura 8.2 muestra el vórtice de sincronización relacionado con las máquinas del módulo de marcaje:

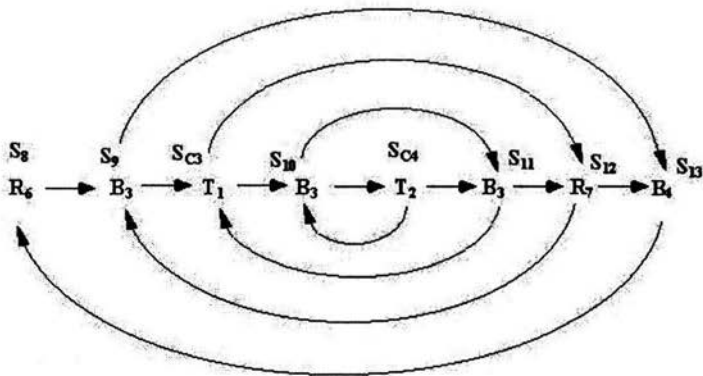


Figura 8.2. Vórtice sucesor del módulo de taladrado

Obsérvese en la figura anterior que $k = 8$ y, por tanto, $N_{GS} = 7$. Dichos grupos de sincronización son:

- 1) $G_1'' = \{T_2, B_3\}_{SA''}$
- 2) $G_2'' = \{B_3, G_1''\} = \{B_3, T_2, B_3\}_{SB''}$
- 3) $G_3'' = \{T_1, G_2''\} = \{T_1, B_3, G_1''\} = \{T_1, B_3, T_2, B_3\}_{SC''}$
- 4) $G_4'' = \{G_3'', R_7\} = \{T_1, G_2'', R_7\} = \{T_1, B_3, G_1'', R_7\} = \{T_1, B_3, T_2, B_3, R_7\}_{SD''}$
- 5) $G_5'' = \{B_3, G_4''\} = \{B_3, G_3'', R_7\} = \{B_3, T_1, G_2'', R_7\} = \{B_3, T_1, B_3, G_1'', R_7\} = \{B_3, T_1, B_3, T_2, B_3, R_7\}_{SE''}$
- 6) $G_6'' = \{G_5'', B_4\} = \{B_3, G_4'', B_4\} = \{B_3, G_3'', R_7, B_4\} = \{B_3, T_1, G_2'', R_7, B_4\} = \{B_3, T_1, B_3, G_1'', R_7, B_4\} = \{B_3, T_1, B_3, T_2, B_3, R_7, B_4\}_{SF''}$
- 7) $G_7'' = \{R_6, G_6''\} = \{R_6, G_5'', B_4\} = \{R_6, B_3, G_4'', B_4\} = \{R_6, B_3, G_3'', R_7, B_4\} = \{R_6, B_3, T_1, G_2'', R_7, B_4\} = \{R_6, B_3, T_1, B_3, G_1'', R_7, B_4\} = \{R_6, B_3, T_1, B_3, T_2, B_3, R_7, B_4\}_{SG''}$

Aquí:

- i) $S_A'' = \{S_{10}, S_{C4}\}$
- ii) $S_B'' = \{S_A'', S_{11}\} = \{S_{10}, S_{C4}, S_{11}\}$
- iii) $S_C'' = \{S_9, S_B''\} = \{S_9, S_A'', S_{11}\} = \{S_9, S_{10}, S_{C4}, S_{11}\}$
- iv) $S_D'' = \{S_C'', S_{12}\} = \{S_9, S_B'', S_{12}\} = \{S_9, S_A'', S_{11}, S_{12}\} = \{S_9, S_{10}, S_{C4}, S_{11}, S_{12}\}$
- v) $S_E'' = \{S_C'', S_D''\} = \{S_{C3}, S_C'', S_{12}\} = \{S_{C3}, S_9, S_B'', S_{12}\} = \{S_{C3}, S_9, S_A'', S_{11}, S_{12}\} = \{S_{C3}, S_9, S_{10}, S_{C4}, S_{11}, S_{12}\}$

$$\begin{aligned}
 \text{vi) } S_F'' &= \{S_E'', S_{13}\} = \{S_{C3}, S_{D''}, S_{13}\} = \{S_{C3}, S_{C''}, S_{12}, S_{13}\} = \{S_{C3}, S_9, S_{B''}, S_{12}, S_{13}\} \\
 &= \{S_{C3}, S_9, S_{A''}, S_{11}, S_{12}, S_{13}\} = \{S_{C3}, S_9, S_{10}, S_{C4}, S_{11}, S_{12}, S_{13}\} \\
 \text{vii) } S_G'' &= \{S_8, S_F''\} = \{S_8, S_E'', S_{13}\} = \{S_8, S_{C3}, S_{D''}, S_{13}\} = \{S_8, S_{C3}, S_{C''}, S_{12}, S_{13}\} \\
 &= \{S_8, S_{C3}, S_9, S_{B''}, S_{12}, S_{13}\} = \{S_8, S_{C3}, S_9, S_{A''}, S_{11}, S_{12}, S_{13}\} \\
 &= \{S_8, S_{C3}, S_9, S_{10}, S_{C4}, S_{11}, S_{12}, S_{13}\}
 \end{aligned}$$

8.2 Sincronización local del módulo de taladrado

Al igual que en el capítulo 7, se usarán los pasos de la sección 5.3 para sincronizar el módulo de taladrado. Esto es:

- 1) El $T_{pU} = 39s/\text{pieza}$, $T_F(T_2) = 10s$ y $T_{DIS} = 29s$
- 2) La distribución de tiempo de proceso sobre las rutas de trabajo de la máquina referencial (T_2) se muestran en la figura siguiente:

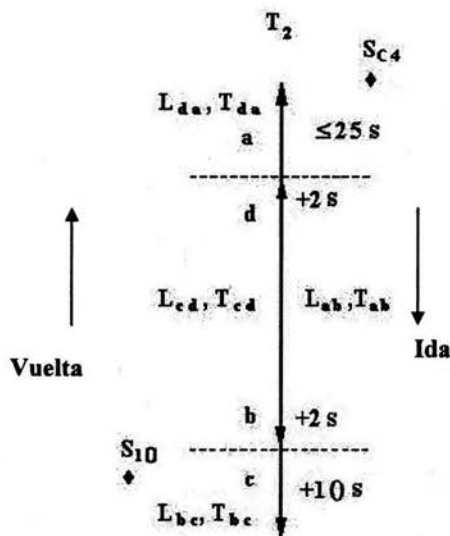


Figura 8.3. Rutas de trabajo y distribución de tiempos en la máquina referencial

La tabla siguiente describe los valores de las variables mostradas en la figura anterior.

Rutas		Tiempos		Descripción
Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	
L_{ab}	–	$T_{ab} = 2s$	–	Acercamiento
L_{bc}	–	$T_{bc} = 10s$	–	Operación principal
L_{cd}	–	$T_{cd} = 2s$	–	Regreso primario
–	$L_{d,a}$	–	$T_{cd} \leq 25s$	Regreso secundario

Tabla 8.1. Descripción de los tiempos y rutas de la máquina referencial T_2

Nótese en la figura 8.3. que, el recorrido de ida está sensado por S_{10} (sensor principal) y S_{c4} (sensor de completud). Además,

$$T_{DIS} = T_{ab} + T_{bc} + T_{cd} = 29s$$

3) Se considerará en este trabajo de tesis que:

$$R_A(M) = \hat{R}_A(M)$$

1) Otra distribución de tiempos relacionado con la máquina referencial AC_1 se muestra en la figura siguiente:

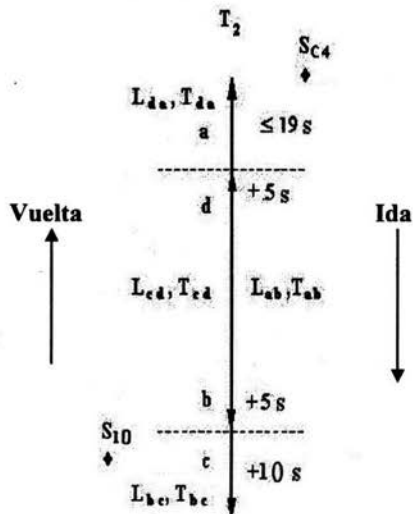


Figura 8.4. Otra distribución de tiempos sobre las rutas de T_2

- 2) La distribución de tiempos que será considerada en este trabajo es la relacionada con el paso 2 y es controlada por S_{10} y S_{C3} .
- 3) La máquina T_2 ha sido sincronizada individualmente a TpU y:
 - 6.1) Si $T_{CICLO}(T_2) < TpU$, entonces T_2 opera a ciclo intermitente.
 - 6.2) Si $T_{CICLO}(T_2) = TpU$, entonces T_2 opera a ciclo continuo.

Aquí, $T_{CICLO}(T_2)$ es el tiempo de ciclo de actuador T_2 . Se tomará en cuenta $T_{CICLO}(T_2) < TpU$ con $T_{cd} = 2s$ y, por tanto, T_2 permanecerá en su posición inicial (después de haber recorrido un ciclo) $T_E = 23s$ siendo T_E un tiempo de espera tal que:

$$TpU = T_{IDA}(T_2) + T_{cd} + T_E$$

- 4) El grupo G_1'' está formado por las siguiente máquinas:

$$G_1'' = \{T_2, B_3\}_{SA''}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos de proceso sobre las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 1:

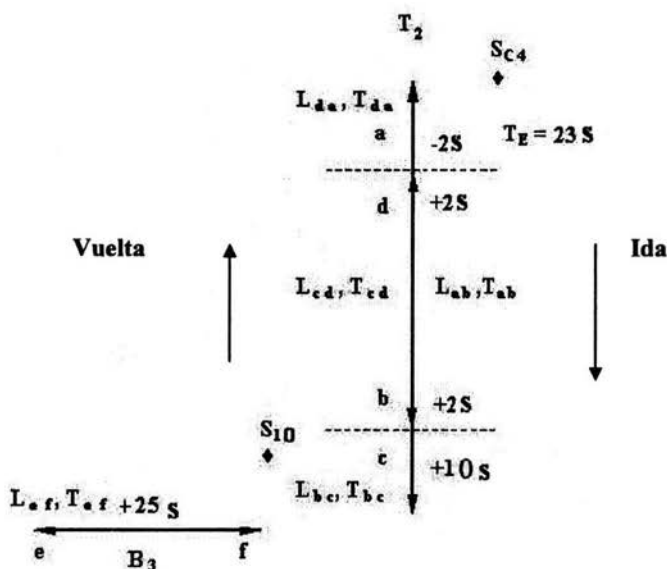


Figura 8.5. Distribución de tiempos en las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 1

De acuerdo con la figura anterior, se tiene que:

- 1) $T_{e f}$ es el tiempo de ida de B_3 .
- 2) Se considera que la banda B_3 tiene tiempo de ida pura.
- 3) $T_{pU} = T_{IDA}(T_2) + T_{IDA}(B_3)$.
- 4) No existe tiempo de vuelta.

5) El grupo 2 del módulo de taladrado está integrado por las máquinas siguientes:

$$G_2'' = \{B_3, G_1''\} = \{B_3 T_2, B_3\}_{SB''}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas del grupo G_2'' :

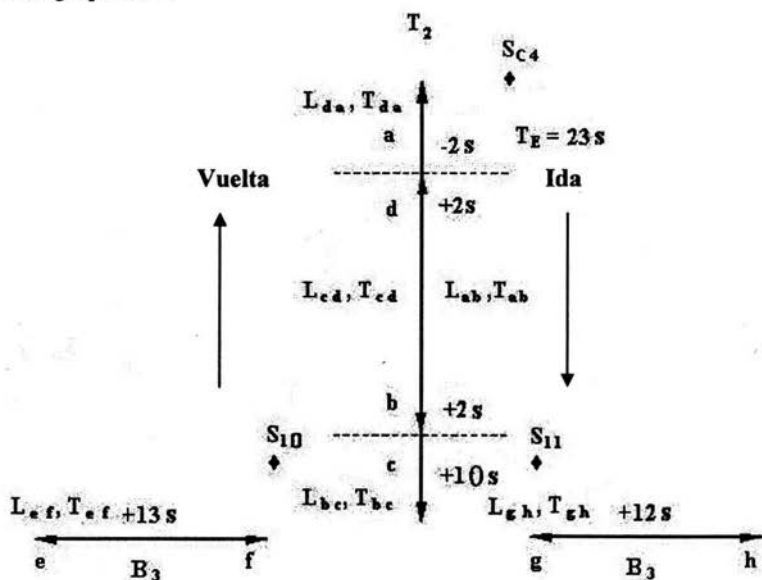


Figura 8.6. Distribución de tiempos en las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 2

Note en la figura anterior que:

- 1) $T_{g h}$ es el tiempo de ida de R_3 .
- 2) No hay tiempo de vuelta.
- 3) $T_{pU} = T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_2) + T_{IDA}(B_3)$

6) El grupo G_3'' , está formado por las siguientes máquinas:

$$G_3'' = \{T_1, G_2''\} = \{T_1, B_3, G_1''\} = \{T_1, B_3, T_2, B_3\}_{SC''}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos de procesos sobre las rutas de las máquinas del grupo G_3'' :

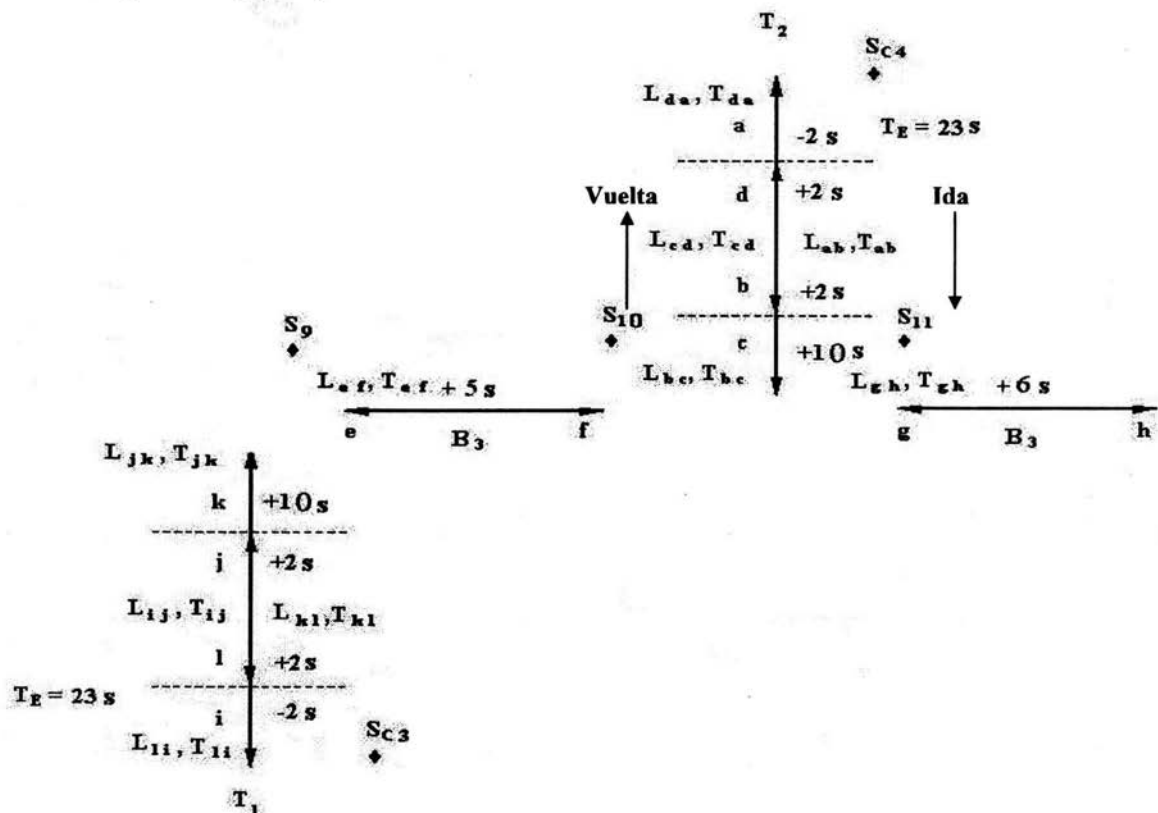


Figura 8.7. Distribución de tiempos en las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 3

La tabla siguiente describe los valores de las variables mostradas en la figura anterior:

Rutas		Tiempos		Descripción
Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	
L_{ij}	–	$T_{ij} = 2s$	–	Acercamiento
L_{jk}	–	$T_{jk} = 10s$	–	Operación principal
L_{kl}	–	$T_{kl} = 2s$	–	Regreso primario
–	L_{li}	–	$T_{kl} \leq 25s$	Regreso secundario

Tabla 8.2. Descripción de los tiempos y rutas de la máquina referencial T_1

De acuerdo con la figura anterior, se tiene que:

- 1) T_{ij}, T_{jk} es el tiempo de ida de la banda T_2 .
- 2) T_{kl}, T_{li} es el tiempo de vuelta de T_2 .
- 3) $T_{pU} = T_{IDA}(T_1) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_2) + T_{IDA}(B_3)$
- 4) $T_{pU} = T_{IDA}(T_2) + T_{kl} + T_E$
- 5) $T_{VUELTA}(B_3)$ no existe pues la banda B_3 se considera de ida pura.
- 7) El grupo G_4'' ; está formado por las siguientes máquinas:
 $G_4'' = \{G_3'', R_7\} = \{T_1, G_2'', R_7\} = \{T_1, B_3, G_1'', R_7\} = \{T_1, B_3, T_2, B_3, R_7\}_{SD''}$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos de procesos sobre las rutas de las máquinas del grupo G_4'' :

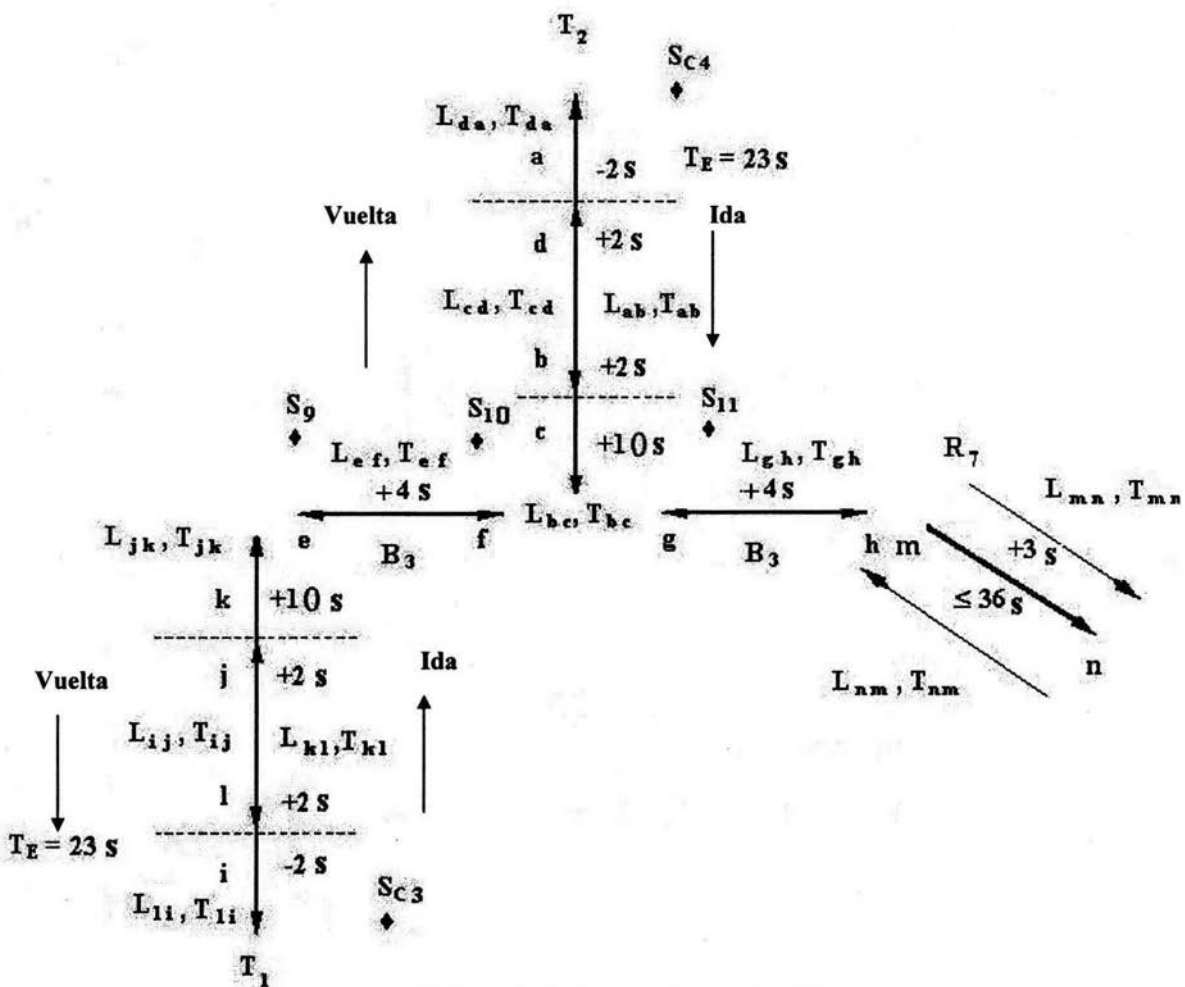


Figura 8.8. Distribución de tiempos en las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 4

De acuerdo con la figura anterior, se tiene que:

- 1) $T_{m n}$ es el tiempo de ida del robot R_7 .
- 2) $T_{n m}$ es el tiempo de vuelta del robot R_7 .
- 3) $T_{pU} = T_{IDA}(T_1) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_2) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(R_7)$
- 4) $T_{n m} \leq T_{pU} - T_{m n}$
- 5) $T_{VUELTA}(B_3)$ no existe pues la banda B_3 se considera de ida pura.
- 8) El grupo G_5'' : está formado por las siguientes máquinas:

$$G_5'' = \{B_3, G_4''\} = \{B_3, G_3'', R_7\} = \{B_3, T_1, G_2'', R_7\} = \{B_3, T_1, B_3, G_1'', R_7\}$$

$$= \{B_3, T_1, B_3, T_2, B_3, R_7\}_{SE''}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos de procesos sobre las rutas de las máquinas del grupo G_5'' :

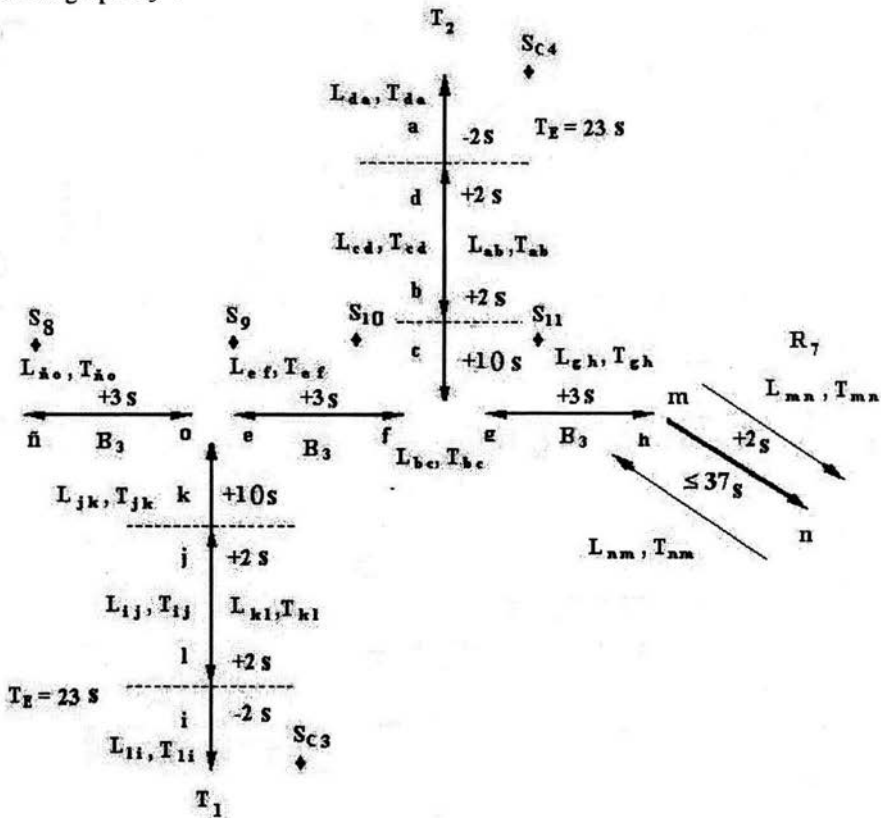


Figura 8.9. Distribución de tiempos en las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 5

De acuerdo con la figura anterior, se tiene que:

- 1) T_{no} es el tiempo de ida del banda B_3 .
- 2) La banda B_3 no tiene tiempo de ida.
- 3) $TpU = T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_1) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_2) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(R_7)$
- 4) $T_{nm} \leq TpU - T_{mn}$

12) El grupo G_6'' : está formado por las siguientes máquinas:

$$G_6'' = \{G_5'', B_4\} = \{B_3, G_4'', B_4\} = \{B_3, G_3'', R_7, B_4\} = \{B_3, T_1, G_2'', R_7, B_4\} \\ = \{B_3, T_1, B_3, G_1'', R_7, B_4\} = \{B_3, T_1, B_3, T_2, B_3, R_7, B_4\}_{SF''}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos de procesos sobre las rutas de las máquinas del grupo G_6'' :

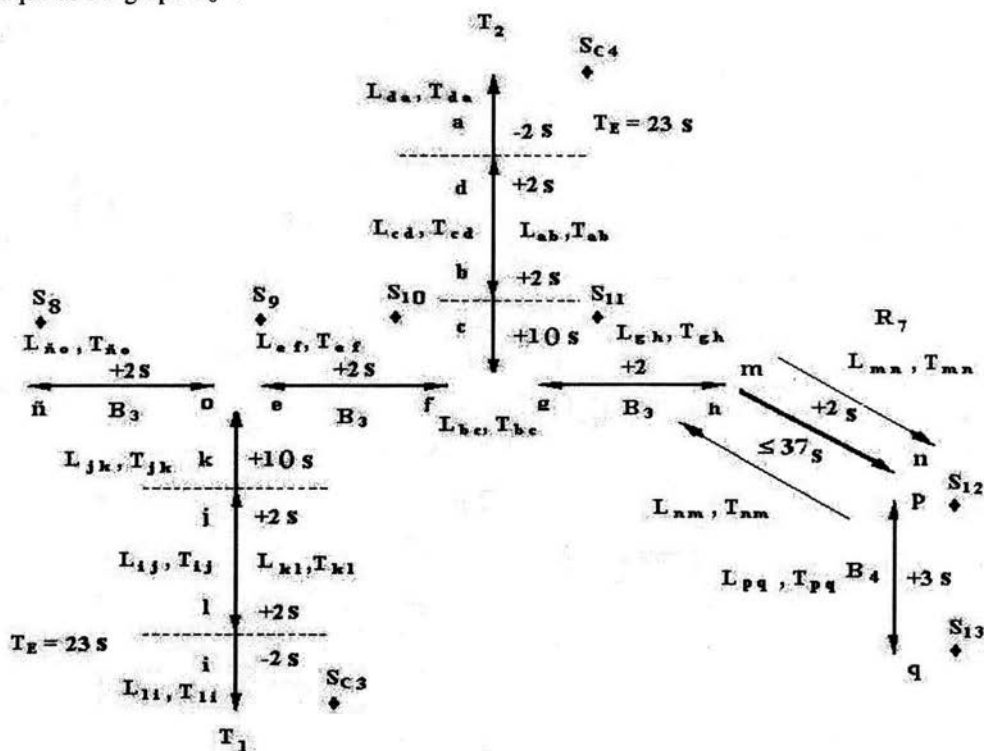


Figura 8.10. Distribución de tiempos en las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 6

De acuerdo con la figura anterior, se tiene que:

- 1) T_{pq} es el tiempo de ida del banda B_4 .
- 2) La banda B_4 no tiene tiempo de ida.
- 3) $T_{pU} = T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_1) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_2) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(R_7) + T_{IDA}(B_4)$
- 4) $T_{mn} \leq T_{pU} - T_{mn}$

12) El grupo G_7'' ; es decir, el final, está formado por las siguientes máquinas:

$$\begin{aligned}
 G_7'' &= \{R_6, G_6''\} = \{R_6, G_5'', B_4\} = \{R_6, B_3, G_4'', B_4\} = \{R_6, B_3, G_3'', R_7, B_4\} \\
 &= \{R_6, B_3, T_1, G_2'', R_7, B_4\} = \{R_6, B_3, T_1, B_3, G_1'', R_7, B_4\} \\
 &= \{R_6, B_3, T_1, B_3, T_2, B_3, R_7, B_4\}_{SG''}
 \end{aligned}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos de procesos sobre las rutas de las máquinas del grupo G7'':

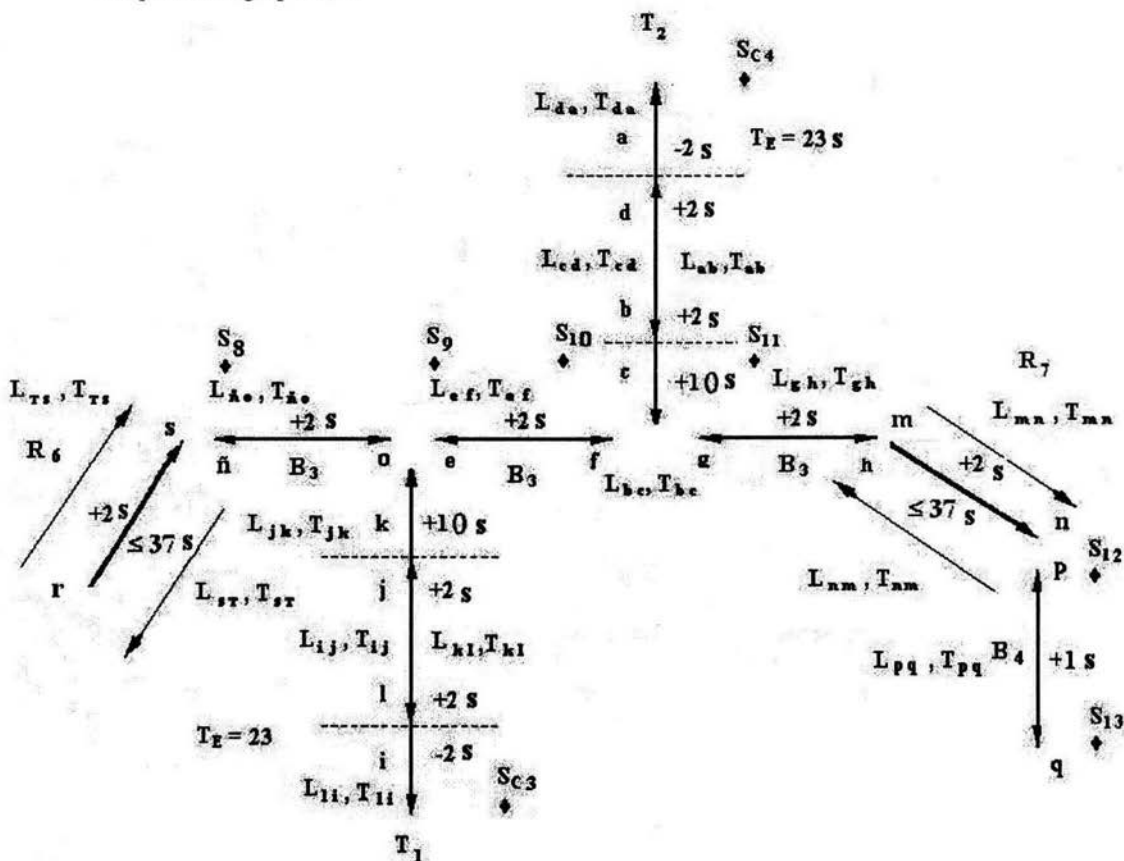


Figura 8.11. Distribución de tiempos en las rutas de trabajo de las máquinas del grupo 7

De acuerdo con la figura anterior, se tiene que:

- 1) T_{rs} es el tiempo de ida del robot R_6 .
- 2) T_{sr} es el tiempo de vuelta del robot R_6 .
- 3) La banda B_4 no tiene tiempo de ida.
- 4) $T_{pU} = T_{IDA}(R_6) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_1) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(T_2) + T_{IDA}(B_3) + T_{IDA}(R_7) + T_{IDA}(B_4)$
- 5) $T_{rs} \leq T_{pU} - T_{sr}$
- 6) $T_{mn} \leq T_{pU} - T_{nm}$

8.3 Resultados de las sincronizaciones locales

En la tabla siguiente se muestran los resultados de la sincronización local de los tres módulos:

Sincronización por medio del TpU de las maquinas del modulo de:	Tiempos de sincronización para la maquina											
	ANTECESORA			PRINCIPAL			SUCESORA			TRANPORTE		
	T IDA	T VUELTA	T ESPERA	T IDA	T VUELTA	T ESPERA	T IDA	T VUELTA	T ESPERA	T IDA	T VUELTA	T ESPERA
SOLDADURA												
Actuador A _{C2}	2s	≤37s	0s									
Robot R ₃				34s	5s	0s						
Robot R ₅							2s	≤37s	0s	2s	≤37s	0s
Banda B ₁										2s	≤37s	0s
Banda B ₂										1s	0s	38s
MARCAJE												
Banda B ₁										2s	0s	37s
Robot R ₁	15s	≤24s	0s									
Actuador A _{C1}				7s	2s	30s						
Robot R ₂							16s	≤23s	0s			
TALADRADO												
Robot R ₆	2s	≤37s	0s									
Banda B ₃										2s	0s	37s
Taladrado T ₁	14s	2s	23s									
Banda B ₃							2s	0s	35s	2s	0s	37s
Taladrado T ₂				14s	2s	23s						
Banda B ₃							2s	0s	33s	2s	0s	37s
Robot R ₇							2	≤37s	0s			
Banda B ₄										1s	0s	38s

Tabla 8.3 Recopilación de los datos del método de sincronización local de los tres módulos del sistema de manufactura caso de estudio.

Conclusiones

En este trabajo de tesis fueron cumplidos los objetivos siguientes:

- Se utilizó el método del vórtice para sincronizar, localmente, una línea de producción serial compuesta por tres módulos.
- El procedimiento de la sincronización local fue explicitado en cada módulo usando una metodología.
- La metodología se utilizó para sincronizar tres módulos, y su alcance puede generalizarse para F-módulos.

En esta tesis se analizó, modeló y sincronizó una línea de producción serial compuesta por 3 módulos. Para tales propósitos se utilizó el método de vórtice y una metodología sistemática. Los resultados y conclusiones derivados de este trabajo se resumen en los puntos siguientes:

- El procedimiento de la sincronización local se realiza, en forma independiente, en cada módulo de producción.
- El procedimiento de la sincronización local es una distribución de tiempos de proceso sobre los ciclos de trabajo de la maquinaria. Dicha distribución está gobernada por el tiempo de producción unitaria.
- El método del vórtice es una técnica geométrica que relaciona grupos de máquinas tomando como base la máquina referencial. La formación de dichos grupos y su análisis, implican el procedimiento de la sincronización local.
- La información de proceso usada en el procedimiento de la sincronización local es mínima, es decir, solo requiere de tiempos de proceso, el TpU y la distribución de maquinaria y sensores.
- La sincronización local de sistemas productivos es, en realidad, una forma referencial de producción, puesto que las máquinas en operación real, no trabajan en forma perfecta.

- Los resultados del procedimiento de la sincronización local se deberán usar para realizar el procedimiento de la sincronización global.
- La técnica del vórtice no se puede aplicar si la diferencia temporal entre el TpU y el tiempo máximo fijo es pequeña.
- La técnica del vórtice para realizar el procedimiento de la sincronización local puede utilizarse para F-módulos siempre y cuando el paso anterior lo permita.

Futuros trabajos por desarrollar relacionados de esta tesis son:

- 1) Sincronización global de una línea de producción serial compuesta por 3 módulos.
- 2) Sincronización local y global de sistemas productivos no seriales.
- 3) Sincronización, local y globalmente, en una línea de producción real.
- 4) Análisis de trayectoria.

Referencias

- [1] Jiménez, L., Reyes, A., Tapia, E., Peón, R., Galindo, F., Pérez, A. *Distribución de sensores sobre una línea de producción serial y sincronización usando el método de vórtice*. SOMIM. 2002 Monterrey N.L. México.
- [2] Jiménez, E., Reyes, L., Torres D., González, I., Islava, M. García I. "Planeación operacional de sistemas de manufactura: diseño del sistema de control de un proceso productivo tipo serial". *Informe interno de investigación DEPMI-SME-MME-DMEC-MAV-01-2001*. UNAM -ITESCA. (En edición).
- [3] Rojas L. *Algunas consideraciones sobre la planeación táctica y operacional*. México. 2000 (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [4] Jiménez E. *Simulación de un proceso de manufactura con obstáculo en la línea de producción*. México. 1998. (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica).UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [5] Jiménez, L., Reyes, A., Esteves I., Mercado M.,E., Pérez A. García D. *Control de una línea de producción usando un código binario de procesos*. SOMIM. 2002 Monterrey N.L. México.
- [6] García D. *Planeación operacional de una celda de manufactura didáctica*. México. 2003. (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica).UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.

- [7] Jiménez, E., Reyes, L., Galindo G., González, I., Torres D., Hito O., Islava. "Sincronización local y global de sistemas productivos seriales". *Informe interno de investigación* (2003). Universidad La Salle Noroeste. (En edición).
- [8] Taholakian A., W. Hales M. PN \Leftrightarrow PLC: A Methodology for Designing, Simulating and Coding PLC Based Control Systems Using Petri Nets. *International Journal and Productions Research*. (1997) Vol 35. N0 6. p.p 1743-1762.
- [9] Castillo L., Fernández J., González A. Intelligent Planning of Grafcet Charts. *Robotics and computer Integrated Manufacturing*. (2000) Vol 16. p.p 225-239.
- [10] Heikkilä A., Koivo H. Modular Control System with Intelligent Scheduling. *Computer in Industry*. (1998) Vol 36. p.p 75-81.
- [11] Castillo L., Fernández J., González A. Automatic Generation of Control Secuencias for Manufacturing Systems Based on Partial Order Planning Techniques. *Artificial Intelligence in Engineering*. (2000) Vol 14. p.p 15-30.
- [12] Rullán A. Programmable Logic controller Versus Personal Computers for Process Control. *Computer in Engineering*. (1997) Vol 36. p.p 421-424.
- [13] La Fauci J. PLC o DCS: Selection and Trends. *ISA Transactions*. (1997) Vol 36. No 1 p.p 21-28.
- [14] Jiménez, E., Reyes, L., Hernández E, Váldez C., Martínez J., González I, Cuenca F. "Modelación cinemática y de trayectoria de un robot cartesiano de dos grados de libertad". *Informe interno de investigación DEPMI-SME-MME-DMEC-MAV-01-2001*. UNAM –ITESCA. (En edición).

- [15] Galindo F. *Análisis, modelación y simulación de una trayectoria continua para la aplicación de soldadura de un transformador eléctrico* México. 2003 . (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica).UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [16] Jiménez E., Reyes L., Torres D., Ruelas J., Danzos A. "Sistematización del álgebra de Boole en el conjunto binario". *Informe interno de investigación DEPFI-SME-MME-DMEC-MAV-01-2001*. UNAM –ITESCA. ISBN 968-36-9840-9.

Apéndice A: Planos de fabricación

