

01173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

SINCRONIZACIÓN LOCAL DE UNA LÍNEA DE  
MANUFACTURA REAL UTILIZANDO EL MÉTODO  
DEL VORTICE

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
(ÁREA MECÁNICA)  
P R E S E N T A :  
ING. OCTAVIO HITO BARRERA



ASESOR: M. EN I. EUSEBIO JIMÉNEZ LÓPEZ

MÉXICO, D. F. CIUDAD UNIVERSITARIA

2004

m. 344625



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.

# Índice

<b>Prólogo</b>	I
<b>Resumen</b>	III
<b>Indice</b>	IV
<b>Introducción</b>	1
<b>Capítulo 1 Definición del problema y restricciones</b>	11
1.1 Definición del problema y restricciones	11
1.2 Hipótesis y sistema de axiomas	12
1.3 La línea MIDCOM INC.	13
<b>Capítulo 2 El método del vórtice y el proceso de sincronización local</b>	19
2.1 Definición de sincronización modular y los tiempos de la terna sincronizable	19
2.2 El método del vórtice	21
2.3 El procedimiento de sincronización local o modular	24

<b>Capítulo 3 Sincronización local del módulo de embobinado de una línea de producción</b>	<b>27</b>
3.1 Definición del problema y restricciones	27
3.2 Descripción de los datos conocidos	29
3.3 Sincronización del módulo de embobinado	33
<b>Capítulo 4 Sincronización local del módulo de soldadura y moldeo de una línea de producción</b>	<b>49</b>
4.1 Definición del problema y restricciones	50
4.2 Descripción de los datos conocidos	52
4.3 Sincronización del módulo de soldadura	59
4.4 Sincronización del módulo de moldeo	65
<b>Conclusiones</b>	<b>74</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>76</b>

# Prólogo

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

En la empresa MIDCOM INC., localizada en Ciudad Obregón, Sonora, se manufacturan en una línea de producción serial, componentes electrónicos usados para la industria de las telecomunicaciones. La línea de producción tiene problemas de operación, entre ellos, la no sincronabilidad de la maquinaria, lo cual se traduce al incumplimiento de los volúmenes de producción.

Recientemente, se ha desarrollado una técnica geométrica denominada "vórtice" con la cual, ha sido posible sincronizar celdas de manufactura didácticas. En este trabajo de tesis se propone utilizar la técnica del vórtice para solucionar el problema de la sincronización local en la línea de producción MIDCOM INC.

La tesis aquí expuesta, forma parte de los proyectos:

- 1) Representación por ecuaciones de forma de las transformaciones geométricas y de manufactura del componente electrónico.
- 2) Representación por primitivas del componente electrónico.
- 3) Caracterización de la línea de producción, en términos de la distribución de maquinaria, usando "circunferencias de distribución".
- 4) Análisis de una trayectoria continua para la aplicación de soldadura por inmersión de estaño.
- 5) Modelación de la trayectoria de soldadura mediante un robot cartesiano.
- 6) Sincronización local, usando el método del vórtice de la línea de producción.
- 7) Sincronización global, usando el CBOR de la línea de producción.

Este trabajo de tesis forma parte del proyecto 6. Asimismo, los resultados obtenidos serán utilizados en el proyecto 7 para sincronizar, globalmente, el sistema productivo aquí estudiado. La idea principal es verificar si la metodología del vórtice puede ser implementada para la solución de problemas de sincronización reales.

Este trabajo de tesis forma parte de la línea de investigación “Simulación de manufactura” desarrollada en la Sección de Mecánica de la DEPMI, UNAM y está integrada al acervo científico–tecnológico del Laboratorio de Mecatrónica localizado en dicha sección.

# Resumen

En este trabajo de tesis fue aplicada una metodología para sincronizar localmente tres módulos de producción relacionados con un sistema de manufactura de la empresa MIDCOM INC. El método usado fue el Vórtice.

Se sincronizaron tres módulos:

- 1) Embobinado-Empapelado
- 2) Soldadura
- 3) Inyección-montaje

El volumen de producción unitaria fue fijado y el tiempo de producción unitaria fue establecido también como un número entero y discretizable unitariamente. Fue utilizado el sistema de módulos proporcionados por la empresa. Finalmente, los resultados obtenidos serán aplicados en otro trabajo para realizar el procedimiento de la sincronización global.

**Palabras clave:** Control, Sincronización, Sistemas de manufactura.

# Introducción

En este trabajo de tesis se tratarán de cumplir los objetivos siguientes:

- Describir los pasos de la metodología del vórtice para sincronización local.
- Utilizar el método del vórtice para sincronizar, localmente, tres módulos de producción de la línea MIDCOM INC.

## I.1 El motivo de la investigación

Lo que motiva a la indagación o investigación en este trabajo de tesis se sintetiza de la siguiente manera:

*“ Recientemente, se ha desarrollado una metodología paso a paso orientada a la sincronización local de sistemas productivos seriales [1]. Dicha técnica, denominada ‘vórtice’, ha sido aplicada en celdas didácticas y para construir simuladores de sistemas productivos [2,3,4]. ”*

Por otro lado, en las industrias manufactureras, generalmente presentan problemas de sincronización de la maquinaria, como el caso de la línea de producción MIDCOM INC., la cual produce componentes electrónicos para la industria de las telecomunicaciones [5]. El problema particular en dicha línea, es la sincronización de operaciones y procesos de manufactura, lo cual ha conducido a no satisfacer, en términos de volúmenes de producción, la demanda del mercado.

El objetivo en este trabajo de tesis es probar la técnica del vórtice para analizar la sincronización local de la línea MIDCOM INC. y justificar, en términos de aplicación, la metodología del vórtice desarrollada en [1,3,4].



## **I.2 Los procedimientos de la sincronización de sistemas productivos**

Para que un sistema productivo pueda satisfacer los volúmenes de producción requeridos, es necesario que todos los elementos de trabajo que integran las líneas de producción funcionen en forma sincronizada [1]. Sin embargo, el hecho real es que, la mayor parte de las líneas de producción tienen problemas de sincronización pues, por lo general, en sistemas productivos semiautomáticos y automáticos, coordinar la maquinaria en términos funcionales y de control no es una tarea fácil [6].

Para poder realizar en forma sistemática los procedimientos de sincronización, es necesario, en primera instancia, definir un concepto de referencia y, a partir de él, determinar los elementos primitivos requeridos y sus relaciones para extender el problema de la sincronización.

La sincronización en sistemas productivos se define de la siguiente manera [1]:

*“ Es un conjunto de procedimientos lógicos y sistemáticos orientados a distribuir los tiempos de proceso sobre las rutas de trabajo de la maquinaria que integra un sistema productivo de tal forma que el volumen de producción sea satisfecha en términos temporales y de control. ”*

De la definición anterior se pueden caracterizar los siguientes elementos primitivos de la sincronización:

- 1) Distribución de tiempos de proceso.
- 2) Rutas de trabajo de la maquinaria.
- 3) El volumen de producción.
- 4) El sistema de control.
- 5) Un sistema de manufactura.

Un parámetro de fundamental importancia es el tiempo de producción unitaria ( $TpU$ ) [7], el cual es derivado de la relación  $(Vp, J)$  donde  $Vp$  es el volumen de producción y  $J$  la jornada de trabajo anual. Así, un sistema de manufactura se dice sincronizado en términos del tiempo si el tiempo de producción unitario es satisfecho.

En términos de manufactura la sincronización se divide en [1,8]:

- Sincronización local o modular.
- Sincronización global.

La sincronización local se realiza en módulos de producción relacionados con una línea de producción. Aquí, la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de la maquinaria se realiza en términos del  $TpU$  y de un sistema de sensado denominado “sensado de ida” [1].

Para poder realizar el procedimiento de la sincronización local, es necesario modularizar las líneas de producción. Así, cada módulo se sincroniza independientemente a  $TpU$ , tomando en cuenta un sistema de sensado de ida para cada módulo.

El procedimiento de la sincronización global se realiza tomando en cuenta todos los módulos de producción y un sistema de sensado tipo bandera y de sincronización, así como el sensado de ida. En este procedimiento se debe garantizar que todos los módulos de producción operen a  $TpU$  y que la diferencia temporal entre la primera y la segunda pieza de trabajo terminada por el sistema sea precisamente el  $TpU$ .

### **1.3 El método del vórtice**

El método del vórtice es una técnica geométrica que relaciona, sistemáticamente, las máquinas que integran un módulo de producción [1,2,3]. Dicha relación permite construir grupos de máquinas de tal forma que cada grupo sea sincronizado

individualmente a TpU. El grupo 1 lo integra la máquina de máxima jerarquía del módulo (generalmente la más lenta) y una máquina sucesora o antecesora. El último grupo lo conforman todas las máquinas que integran el módulo de producción.

Para aplicar el método del vórtice se requiere de [1]:

- 1) Un sistema de módulos.
- 2) Un sistema de sensado de ida.
- 1) La selección de la máquina de máxima jerarquía de cada módulo.
- 2) El tiempo de producción unitaria.
- 3) Los tiempos de las operaciones principales de manufactura.

La figura siguiente muestra un vórtice que relaciona máquinas en un módulo de producción.

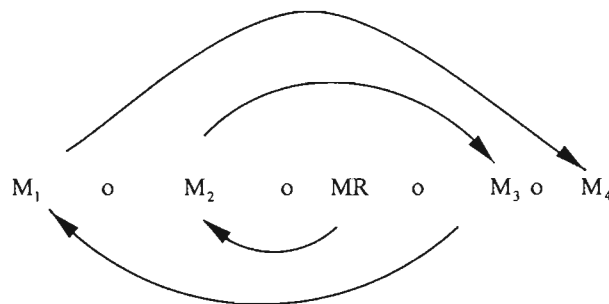


Figura I.1 Configuración de un vórtice

Los grupos de máquinas que se forman por medio del vórtice mostrado en la figura I.1 son:

- 1)  $G_1 = \{M_2, M_R\}$
- 2)  $G_2 = \{G_1, M_3\} = \{M_2, M_R, M_3\}$
- 3)  $G_3 = \{M_1, G_2\} = \{M_1, G_1, M_3\} = \{M_1, M_2, M_R, M_3\}$
- 4)  $G_4 = \{G_3, M_4\} = \{M_1, G_2, M_4\} = \{M_1, G_1, M_3, M_4\} = \{M_1, M_2, M_R, M_3, M_4\}$

Cabe señalar que  $M_R$  denota la máquina referencial o de máxima jerarquía. Además,  $S_1 \dots S_4$  es el sistema de sensado de ida.

Así, primero se distribuyen los tiempos de producción sobre la máquina referencial de tal forma que no se rebase el  $TpU$ , posteriormente se distribuyen los tiempos sobre las máquinas del grupo 2 hasta completar el último grupo.

Una vez que el último grupo ha sido sincronizado, se dice que el módulo de producción ha sido sincronizado localmente a  $TpU$ .

#### **1.4 EL CBOR**

Una vez sincronizados localmente cada módulo de producción que conforman una línea de producción, el paso siguiente para sincronizar totalmente un sistema de manufactura consiste en tomar como caso de análisis todos los módulos en un “supermódulo” y sincronizar la maquinaria sobre la base del  $TpU$  [1].

Recientemente se ha desarrollado un esquema operacional denominado Código Binario Operacional Referencial el cual es utilizado para caracterizar los nodos operacionales de la maquinaria en código binario [1,3,7]. Con dicho esquema se simplifican los procedimientos de la sincronización global y el diseño del control operacional de la maquinaria que integran un sistema productivo.

El CBOR toma los resultados de la sincronización local para distribuir los tiempos de proceso y el sistema de sensado sobre una matriz tiempo – sensado – maquinaria. Con dicha matriz se determinan las ecuaciones de estado que controlan un sistema productivo por medio de PLC(s). La figura siguiente muestra un CBOR relacionado con una celda de producción compuesta por dos módulos [1]:

<b>Matriz de Código Binario Operacional Referencial</b>														
<b>Matriz Tiempo – Sensado</b>								<b>Matriz Maquinaria - Tiempo</b>						
<b>Sensores</b>								<i>Maquinaria</i>						
<b>Sincronización (*)</b>				→										
<b>Sensado de ida</b>				<b>Bandera</b>				<i>Recorrido de ida</i>						
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>c1</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>c2</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>B1</sub>	S <sub>B2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	
T <sub>0</sub>														T <sub>0</sub>
T <sub>1</sub>														T <sub>1</sub>
T <sub>2</sub>														T <sub>2</sub>
cTk <sub>1</sub>														cTk <sub>1</sub>
T <sub>3</sub>														T <sub>3</sub>
T <sub>3,4</sub>														T <sub>3,4</sub>
T <sub>4</sub>														T <sub>4</sub>
cTk <sub>2</sub>														cTk <sub>2</sub>

Figura I.2 El CBOR

Cabe mencionar que en diversos trabajos se ha estudiado la sincronización de operaciones. Por ejemplo, en [9] se propone un método basado en las reglas de Petri para diseñar el sistema de control de una celda de manufactura flexible didáctica. En [10,11], se utiliza Inteligencia Artificial para planear automáticamente el sistema de control de operaciones de un sistema de manufactura. En [12] se utilizan redes neuronales para diseñar un sistema modular de control de procesos. En [8] se utiliza una computadora personal para imitar el comportamiento de un PLC. En [9] se analizan las ventajas entre un PLC y un DSC (sistema de control distribuido) en el diseño de control de procesos de sistemas de manufactura. También, los sensores son elementos de control utilizados para generar señales binarias emitidas por los elementos de trabajo. Las señales son procesadas en PLC's (Programing Logic Control) o en microprocesadores, elementos utilizados para el control de operaciones en los sistemas productivos [13,14]. Por otra parte el método del vórtice, hace que cada uno de los elementos de trabajo que componen las líneas de producción en el sistema de manufactura, estén relacionados de manera directa con el tiempo de producción unitaria. De hecho, es este parámetro uno de los mas importantes que se debe tomar en cuenta en los procedimientos de sincronización.

## I.5 El problema de la línea MIDCOM INC. y módulos de producción

La empresa MIDCOM INC, ubicada en Ciudad Obregón, Sonora, manufactura componentes electrónicos para la industria de las telecomunicaciones. En una de las líneas de producción se producen o, más bien dicho, se manufacturan transformadores eléctricos. La línea está totalmente automatizada. La figura siguiente muestra el componente manufacturado por la línea MIDCOM INC.

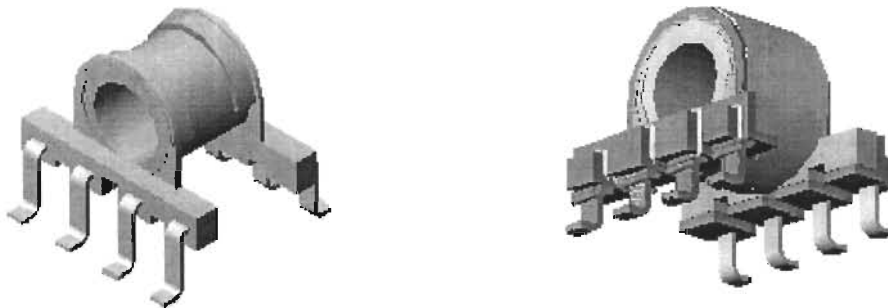


Figura I.3 Materia prima y producto terminado

El producto mostrado en la figura I.3 es manufacturado por medio de dispositivos, máquinas y robots. La línea MIDCOM INC. está compuesta por 5 módulos de producción:

- 1) Dos módulos de embobinado – empapelado.
- 2) Dos módulos de soldadura.
- 3) Un módulo de inyección de plástico y montaje.

El principal problema que se presenta en la línea es la no sincronabilidad de los módulos de producción. Ciertos módulos operan en un cierto tiempo y otros se mantienen inactivos. Una vez que los módulos terminan operaciones, estos se paran e inician otros.

Por tanto, la línea de producción no está sincronizada ni local ni globalmente. Lo cual origina el no cumplimiento de los volúmenes de producción y la inactividad de máquinas generando con esto, pérdidas económicas y de mercado.

## **I.6 La metodología general**

En este trabajo de tesis se usarán los pasos generales del Método Científico los cuales son [15,16,17]:

- 1) El motivo de la investigación.
- 2) Definición del problema.
- 3) Restricciones.
- 4) Hipótesis.
- 5) Premisas.
- 6) Conclusión.

La conclusión del problema será, precisamente los resultados del procedimiento de sincronización. La idea es enmarcar la presente tesis en el Método Científico con el objetivo de impulsar dicho método al planteamiento y solución de problemas en la Ingeniería Mecánica y campos afines.

El Método Científico es la aplicación general y sistemática de la Lógica [16]. En esta tesis dicha aplicación será, en consecuencia, la metodología del vórtice desarrollada en [1] para resolver el problema de la sincronización local de la línea de producción MIDCOM INC.

## **I.7 Resumen de tesis y capitulado**

En esta tesis se aplicarán los pasos de la metodología desarrollada en [1] para sincronizar localmente tres módulos de producción de la línea MIDCOM INC. Dichos módulos son los siguientes:

- 1) Módulo de embobinado – empapelado.
- 2) Módulo de Soldadura.
- 3) Módulo de inyección de plástico y montaje.

El tiempo de producción unitario considerado en esta tesis no corresponde con un tiempo real de la línea. Dicho tiempo fue modificado para cumplir con aspectos de confidencialidad solicitada por la empresa.

Se partirá de la metodología real de la línea y de un tiempo de producción unitario fijo y representable por un número entero. De hecho, la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo será en términos discretos. Asimismo, solo se considerarán las rutas principales de trabajo de la maquinaria.

Los resultados obtenidos en esta tesis, serán utilizados en otro trabajo para sincronizar globalmente, usando al CBOR, la línea de producción de MIDCOM INC.

Este trabajo de tesis consta de 4 capítulos los cuales se resumen a continuación:

En el Capítulo 1 se define el problema y sus restricciones, así como una hipótesis y un sistema de premisas básicas.

En el Capítulo 2 se presentan los pasos de la Metodología del Vórtice la cual será utilizada en los capítulos 3 y 4 para realizar el procedimiento de la sincronización local.



En el Capítulo 3 se aplican los pasos de la metodología para sincronizar, localmente, el módulo de embobinado – empapelado.

En el Capítulo 4 se aplican, al igual que en el capítulo 3, los pasos de la metodología para sincronizar los módulos de soldadura y montaje, respectivamente.

Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo de tesis.

# Capítulo 1

## Definición del problema

**Introducción.** En este capítulo se define el problema por solucionar en esta tesis, sus restricciones así como un sistema de premisas básicas. El objetivo es utilizar los pasos del Método Científico para enmarcar el problema [16,17] y, definir el procedimiento de sistematización del modelo. Dicha sistematización será realizada usando la metodología paso a paso desarrollada por [1].

### 1.1 Definición del problema y restricciones

Considere el siguiente problema:

*“ Se requiere demostrar que la técnica del vórtice usada para propósitos didácticos, puede ser implementada para modelar el procedimiento de la sincronización local en una línea de producción real; en este caso, un sistema de manufactura de la empresa MIDCOM INC. ”*

Las restricciones del problema son las siguientes:

- 1) La distribución de planta (DP) es fija y es conocida ( $R_1$ ).
- 2) El sistema de módulos ( $M^o$ ) de la línea de producción es fijo y conocido ( $R_2$ ).
- 3) Solo se sincronizan tres módulos de producción de los 5 que componen la línea ( $R_3$ ).
- 4) El tiempo de producción unitaria ( $T_{pU}$ ) real es modificado por cuestiones de confidencialidad ( $R_4$ ).
- 5) Los tiempos fijos ( $T_F$ ) de las operaciones son fijos y conocidos ( $R_5$ ).

- 6) Los lugares geométricos ( $\tau_T$ ) relacionados con las rutas de trabajo son fijos y conocidos ( $R_6$ ).

El problema definido anteriormente y sus restricciones se sintetizan de la siguiente manera:

*“ Conocidos  $D^P$ ,  $T_F$ ,  $TpU$ ,  $M^o$ ,  $\tau_T$ , realice el método del vórtice, en tres módulos de la línea MIDCOM INC, tal que:*

$$1) R_1 = \hat{R}_1$$

$$2) R_2 = \hat{R}_2$$

$$3) R_3 = \hat{R}_3$$

$$4) R_4 = \hat{R}_4$$

$$5) R_5 = \hat{R}_5$$

$$6) R_6 = \hat{R}_6$$

sean satisfechas. ”

## **1.2 Hipótesis y sistema de axiomas**

Considere la siguiente hipótesis:

*“ En toda línea de producción serial compuesta por  $F$  – módulos existe un conjunto de tiempos de proceso distribuidos sobre las rutas de trabajo de la maquinaria. La distribución de los tiempos de proceso y el procedimiento de la sincronización local en cada máquina o en su conjunto, depende del tiempo de producción unitaria y de la correcta aplicación de la metodología del vórtice. ”*

Por otro lado, el sistema de premisas básicas es el siguiente:

- 1) El  $T_{pU}$  es perfecto y representable por un número entero.
- 2) El procedimiento de la sincronización local satisface la relación:

$$T_{pU} = \sum_{i=1}^k T_{IDAi}$$

- 3) El método utilizado es el vórtice.

Aquí,  $k$  es el número de máquinas que integran un módulo de producción y  $T_{IDAi}$  es el  $i$ -ésimo tiempo de ida de cada máquina que compone un módulo.

### **1.3 La línea MIDCOM INC.**

La línea de producción de la empresa MIDCOM INC. está compuesta por 5 módulos:

- 1) Dos módulos de ensamble y empapelado
- 2) Dos módulos de soldadura de estaño
- 3) Un módulo de inyección y montaje

La distribución de planta de la línea se muestra en la figura 1.1 y en la figura 1.2 se muestra el componente manufacturado, que en este caso, es un transformador eléctrico utilizado para la industria de las telecomunicaciones [18].

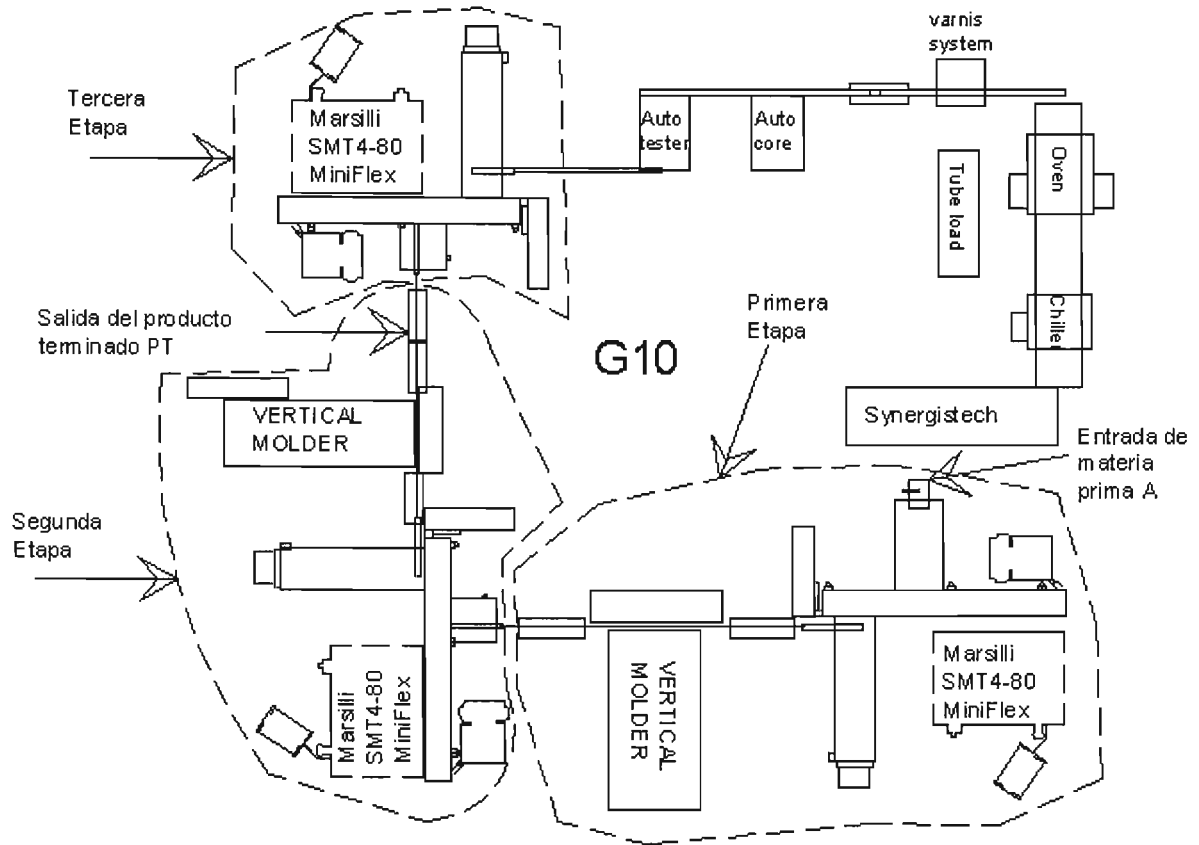


Figura 1.1 Distribución de planta

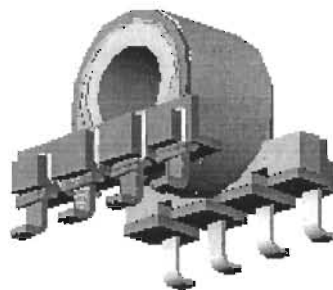


Figura 1.2 Componente

Por otro lado la tabla 1.1 presenta las operaciones de manufactura realizadas sobre la pieza [5].












Operación	Operador booleano	Elemento geométrico de B <sub>MAE</sub>	Nomenclatura
O <sub>1</sub> (Montaje de bobina 1)	M,B ∩		B <sub>1</sub>
O <sub>2</sub> (Montaje de empapelado 1)	M,P ∩		C <sub>1</sub>
O <sub>3</sub> (Recubrimiento de flux 1)	R ∩		D <sub>1</sub>
O <sub>4</sub> (Recubrimiento por soldadura de estaño 1)	S ∩		S <sub>1</sub>
O <sub>5</sub> (Excedente de soldadura 1)	E		F <sub>1</sub>
O <sub>6</sub> (Montaje de pieza)	M ∩		M
O <sub>7</sub> (Montaje de bobina 2)	M,B ∩		B <sub>2</sub>
O <sub>8</sub> (Montaje de empapelado 2)	M,P ∩		C <sub>2</sub>
O <sub>9</sub> (Recubrimiento de flux 2)	R ∩		D <sub>2</sub>
O <sub>10</sub> (Recubrimiento por soldadura de estaño 2)	S ∩		S <sub>2</sub>
O <sub>11</sub> (Excedente de soldadura 2)	E		F <sub>2</sub>

Tabla 1.1 Operaciones de manufactura

Asimismo, la descripción de la maquinaria y su nomenclatura se presenta en la tabla 1.2 [19].

<b>Máquina</b>	<b>Descripción</b>
T <sub>RI</sub>	Transportador de riel vibratorio
A <sub>C1</sub>	Dispositivo mecánico de 3 GDL (transportador)
M <sub>EN11</sub>	Máquina empapeladora
M <sub>12</sub>	Máquina embobinadora
M <sub>T1</sub>	Dispositivo transportador Giratorio
R <sub>A1</sub>	Recipiente alimentador de 8 piezas
T <sub>B1</sub>	Transportador de banda 2 GDL
A <sub>C2</sub>	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)
M <sub>A1</sub>	Manipulador cartesiano de 3GDL
E <sub>F1</sub>	Estación de pasta para soldadura 1
E <sub>S1</sub>	Estación de soldadura 1

$T_{R2}$	Transportador de riel vibratorio
$A_{C3}$	Dispositivo mecánico de 1GDL (transportador)
$M_{MD1}$	Estación de moldeo (ensamble)
$R_{A2}$	Recipiente alimentador de 4 productos
$M_{T2}$	Dispositivo transportador giratorio
$A_{C4}$	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)
$T_{R3}$	Transportador de riel vibratorio
$A_{C5}$	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)
$M_{EN21}$	Máquina empapeladora 2
$M_{EN22}$	Máquina de embobinado 2
$M_{T3}$	Dispositivo transportador giratorio
$R_{A3}$	Recipiente alimentador de 8 piezas
$T_{B2}$	Transportador de banda 2GDL
$A_{C6}$	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)



$M_{A2}$	Manipulador cartesiano de 3GDL
$E_{F2}$	Estación de pasta para soldadura 1
$E_{S2}$	Estación de soldadura 1
$T_{R4}$	Transportador de riel vibratorio

Tabla 1.2 Descripción de la maquinaria

# Capítulo 2

## El método del vórtice y el proceso de sincronización local

**Introducción.** En este capítulo se presenta el método del vórtice utilizado para sincronizar localmente módulos de producción [1]. Se definen algunas relaciones básicas utilizadas 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  $TpU$ , grupos de máquinas [3,4].

### 2.1 Definición de sincronización modular y los tiempos de la terna sincronizable

El proceso de la sincronización local o modular se puede definir de la siguiente manera [1]:

*“ Es un conjunto de procedimientos lógicos y sistemáticos 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  $TpU$  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  $TpU$ .

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

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

si y solo si,  $TpU > \sum T_F$ .

Aquí,  $T_{DIS}$  es un tiempo de distribución asociado con  $I_{TS}$  y  $\sum T_F$  es la sumatoria de tiempos fijos relacionada 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:

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

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

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

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  $TpU$  es igual a la sumatoria de los tiempos de ida de la terna mínima sincronizable.

La condición:

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

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 permisibles.

Por otro lado, una condición tal que:

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

implicará que:

- Pueden ser agregadas máquinas antecesoras y/o sucesoras a la terna sincronizable mínima.
- 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:

*“ 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. ”*

## **2.2 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 [1,2,3]. El origen del vórtice es la máquina referencial y su término es 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.

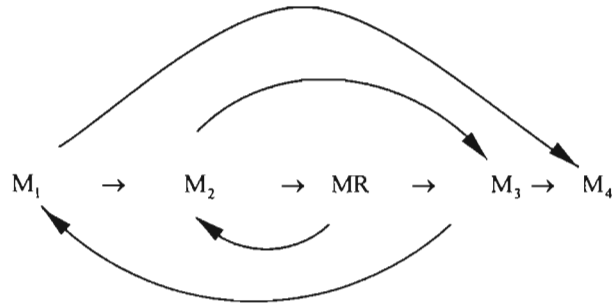


Figura 2.1 Representación geométrica de un vórtice

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:

- Vórtices perfectos.
- Vórtices extendidos.

Un vórtice perfecto es aquel en donde su extremo final conecta exactamente la primera máquina del módulo o la última [1,2]. Un vórtice extendido se caracteriza por una conexión lineal en un conjunto de máquinas sucesoras o antecesoras extremas. La figura siguiente muestra un vórtice extendido.

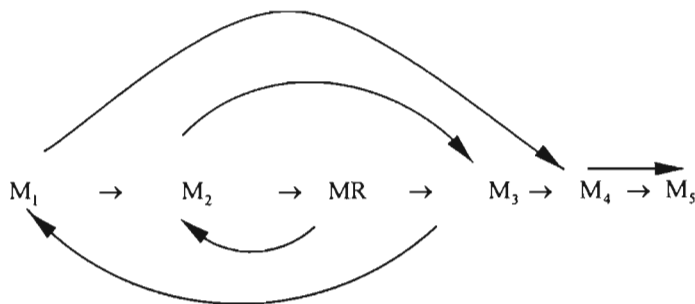


Figura 2.2 Representación de un vórtice extendido

Un ejemplo de vórtice perfecto es el mostrado en la figura 2.1. Por otro lado, los vórtices se subclasifican en [2]:

- Vórtices antecesores.
- Vórtices sucesores.

Un vórtice es antecesor si la primer máquina de conexión con la máquina referencial es antecesora. Si la primer máquina de conexión con la referencial es sucesora, entonces el vórtice es sucesor. Las figuras 2.1 y 2.2 muestran dos vórtice antecesores.

Es importante señalar que las máquinas que integran el módulo deben estar relacionadas y ordenadas de acuerdo con el recorrido de ida. El vórtice es usado para generar grupos de máquinas para su posterior sincronización. Así, los grupos de máquinas asociados con el vórtice mostrado en la figura 2.1 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 [1]:

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

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.

### 2.3 El procedimiento de sincronización local o modular

En esta sección se proponen los pasos generales para sincronizar a  $T_{pU}$  los grupos de máquinas relacionados con el vórtice; esto es [1]:

1. Determinar  $T_{DIS}$  para el cual el  $T_{pU}$  y el  $T_F$  o la  $\sum T_F$  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  $T_{pU}$ .
3. El  $T_{DIS}$  debe ser particionado y distribuido sobre:
  - 3.1. La ruta de acercamiento.
  - 3.2. La ruta de retiro primario.
  - 3.3. 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  $T_{pU}$ , 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:

8.1. 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.

8.2. La suma de los tiempos de ida de la máquina referencial y la sucesora o antecesora debe ser igual al  $TpU$ .

8.3. 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 cualesquier de las dos máquinas.

Cabe señalar que si los pasos del punto 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:

9.1. Descomponer el tiempo de ida de la máquina antecesora o sucesora del grupo 1 en dos proporciones.

9.2. 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.

9.3. La suma de los tiempos de ida de las máquinas del grupo 2 debe ser igual al  $TpU$ .



9.4. Los tiempos de vuelta de las máquinas antecesora o sucesora del grupo 1 y del grupo 2 se determinan según el paso 8.3.

Si los pasos del punto 9 son satisfechos, entonces la terna mínima ha sido sincronizada a  $T_{pU}$ .

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

10.1. 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.

10.2. Usar los pasos 9.1, 9.2, y 9.4 para distribuir los tiempos.

10.3. 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 máquinas antecesoras y sucesoras de todos los grupos anteriores. Además, la siguiente restricción debe ser satisfecha:

$$T_{pU} = \sum_{i=1}^k T_{IDA} ; \text{ para el grupo "n"}$$

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 a las máquinas antecesoras o sucesoras no implica que los rangos de operación de dichas máquinas sobrepasen los parámetros permisibles.

# Capítulo 3

## Sincronización local del módulo de embobinado de una línea de producción

**Introducción.** En este capítulo se sincroniza localmente el módulo de embobinado de una línea de producción serial compuesta por cinco módulos. En este trabajo de tesis solo se tomarán en cuenta los módulos: Embobinado, Soldadura y Moldeo. Se utiliza el método del vórtice para relacionar máquinas distribuidas sobre los módulos de acuerdo con el recorrido de ida [1,2,3]. Con dichas relaciones se generarán grupos de máquinas los cuales se sincronizan localmente a  $TpU$ . Los datos conocidos son: la distribución de maquinaria, el sistema de sensado de ida, los lugares geométricos de los ciclos operacionales de la maquinaria, los tiempos fijos y el  $TpU$ .

### 3.1 Definición del problema y restricciones

En esta parte se define el problema por solucionar, así como sus restricciones fundamentales. Esto es:

" Datos;  $D_p$ ,  $M^0$ ,  $T_F$ ,  $TpU$ ,  $S_{IDA}$  y  $L_T$ , encuentre:

$$SL = SL (M^0, T_F, TpU, S_{IDA}, L_T)$$

tal que:

$$1) R_1 = \hat{R}_1$$

$$2) R_2 = \hat{R}_2$$

$$3) R_4 = \hat{R}_4$$

$$4) R_5 = \hat{R}_5$$

$$5) R_6 = \hat{R}_6$$

sean satisfechas. "

La hipótesis es la siguiente:

*"En toda línea de producción serial compuesta por F – módulos existe un conjunto de tiempos de proceso distribuidos sobre las rutas de trabajo de la maquinaria. La distribución de los tiempos de proceso y la sincronización de operaciones en cada máquina o en un conjunto de máquinas (módulo) dependen del tiempo de producción unitaria y del sistema de sensado de ida."*

Por otro lado, las premisas básicas son:

- 1) El TpU es perfecto y representable por un número entero.
- 2) El proceso de sincronización local satisface:

$$TpU = \sum_{i=1}^K T_{IDAi}$$

Aquí, K es el número de máquinas que integran un módulo de producción y  $T_{IDA}$  es el tiempo de ida de cada máquina.

### 3.2 Descripción de los datos conocidos

La distribución de planta ( $D_p$ ) asociada con el sistema productivo motivo de estudio [1, 4, 5] se muestra en la figura 3.1 [19].

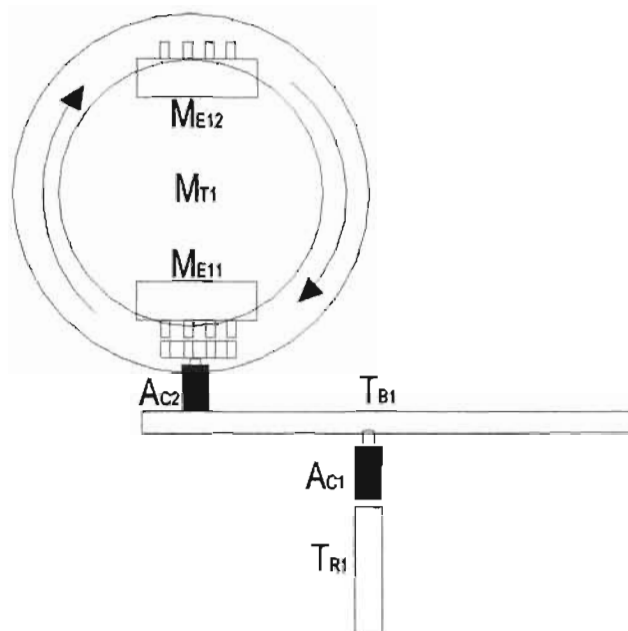


Figura 3.1 Distribución de planta

La tabla siguiente describe cada uno de los elementos y dispositivos de trabajo que componen la distribución de planta [19]:

Nomenclatura	Descripción
$T_{R1}$	Transportador del riel vibratorio
$A_{C1}$	Dispositivo mecánico de 3GDL
$T_{B1}$	Transportador de banda
$A_{C2}$	Dispositivo mecánico de 3GDL
$M_{E12}$	Máquina embobinadora
$M_{T1}$	Dispositivo transportador giratorio
$M_{E11}$	Máquina empapeladora

Tabla 3.1 Descripción de los elementos de trabajo

Las operaciones y procesos del sistema productivo se describen en la crónica siguiente:

Crónica:

*TR<sub>1</sub> transporta de Lugar geométrico 1 (L<sub>τ1</sub>) a L<sub>τ2</sub> 8 componentes. De L<sub>τ2</sub> a L<sub>τ3</sub> el Ac<sub>1</sub> carga TB<sub>1</sub>. Posteriormente de L<sub>τ3</sub> a L<sub>τ4</sub>, TB<sub>1</sub> transporta 8 componentes de L<sub>τ4</sub> a L<sub>τ4</sub>, carga 4 componentes sobre MT<sub>1</sub>, enseguida MT<sub>1</sub> gira de L<sub>τ4</sub> a L<sub>τ5</sub>. En L<sub>τ5</sub> ME<sub>12</sub> embobina 4 componentes simultáneamente (al mismo tiempo Ac<sub>2</sub> carga a MT<sub>1</sub> otros 4 componentes). Al finalizar la operación de embobinado suceden 2 eventos: Por un lado MT<sub>1</sub> transporta 4 componentes de L<sub>τ5</sub> a L<sub>τ6</sub> (Máquina empapeladora ME<sub>11</sub>) y por otro lado MT<sub>1</sub> transporta 4 componentes de L<sub>τ4</sub> a L<sub>τ5</sub>. En el L<sub>τ6</sub> la máquina ME<sub>11</sub> empapela 4 componentes y durante esa operación TB<sub>1</sub> regresa a L<sub>τ3</sub> y toma 8 componentes y los traslada a L<sub>τ4</sub>. Después de terminar en L<sub>τ6</sub> la operación de empapelado, Ac<sub>2</sub> carga 4 piezas en L<sub>τ4</sub> y descarga 4 piezas empapeladas en L<sub>τ7</sub> sobre TB<sub>1</sub>. Posteriormente MT<sub>1</sub> transporta de L<sub>τ4</sub> a L<sub>τ5</sub> 4 piezas y al mismo tiempo transporta 4 piezas embobinadas de L<sub>τ5</sub> a lugar geométrico L<sub>τ6</sub>. En L<sub>τ5</sub> la máquina ME<sub>11</sub> se realiza la operación de embobinado a las siguientes 4 piezas. Posteriormente MT<sub>1</sub> transporta de MT<sub>5</sub> al L<sub>τ6</sub> las segundas piezas embobinadas. En L<sub>τ6</sub> la máquina ME<sub>11</sub> realiza el empapelado a las segundas 4 piezas. Una vez terminada dicha operación Ac<sub>2</sub> transporta las 4 piezas empapeladas a L<sub>τ7</sub>, completándose 8 piezas L<sub>τ7</sub> sobre TB<sub>1</sub>, posteriormente TB<sub>1</sub> transporta de L<sub>τ7</sub> a L<sub>τ8</sub> 4 piezas.”*

Las piezas descritas en la crónica anterior se muestran en la Figura 3.1. Por otro lado, la figura siguiente muestra la distribución del sentido de ida relacionado con el sistema productivo:

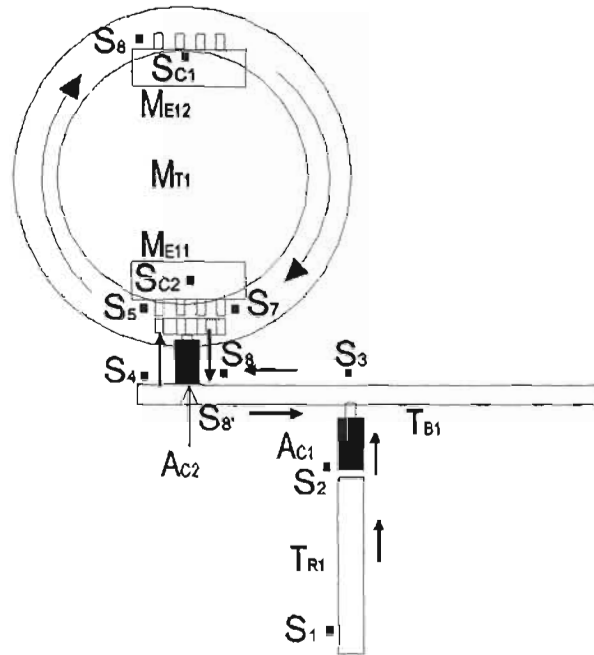


Figura 3.2 Distribución del sensado de ida

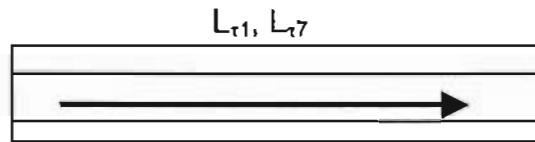
En la tabla 3.2 se describen los tipos de sensores y sus relaciones de activación asociadas con la maquinaria.

Nomenclatura	Máquina de relación	Descripción
S <sub>1</sub>	T <sub>R1</sub>	S <sub>1</sub> activa a R <sub>1</sub>
S <sub>2</sub>	AC <sub>1</sub>	S <sub>2</sub> activa a AC <sub>1</sub>
S <sub>3</sub>	T <sub>B1</sub>	S <sub>3</sub> activa a T <sub>B1</sub>
S <sub>4</sub>	AC <sub>2</sub>	S <sub>4</sub> activa a AC <sub>2</sub>
S <sub>5</sub>	M <sub>T1</sub>	S <sub>5</sub> activa a M <sub>T1</sub>
S <sub>6</sub>	M <sub>E12</sub>	S <sub>6</sub> activa a M <sub>E12</sub>
S <sub>C1</sub>	M <sub>E12</sub>	S <sub>C1</sub> detecta fin de tarea en M <sub>E12</sub>
S <sub>7</sub>	M <sub>E11</sub>	S <sub>7</sub> activa a M <sub>E11</sub>
S <sub>C2</sub>	M <sub>E11</sub>	S <sub>C2</sub> detecta fin de tarea en M <sub>E11</sub>
S <sub>8</sub>	AC <sub>2</sub>	S <sub>8</sub> activa a AC <sub>2</sub>
S <sub>8'</sub>	AC <sub>2</sub>	S <sub>8'</sub> activa a AC <sub>2</sub>

S<sub>1</sub> : sensor principal, S<sub>Ci</sub>: sensor de completud

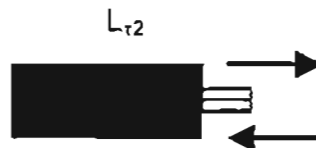
Tabla 3.2 Descripción del sensado de ida

Por otro lado, el tiempo fijo asociado con la operación de embobinado ( $T_{Fmax}$ ) es de 20 segundos. Dicho tiempo está integrado a  $T_F$ . Además, el  $T_{pU} = 58$  s/pza. La figura 3.4 muestra el sistema de lugares geométricos ( $L_{\tau}$ ) asociado con cada una de las máquinas que componen el sistema productivo [20].



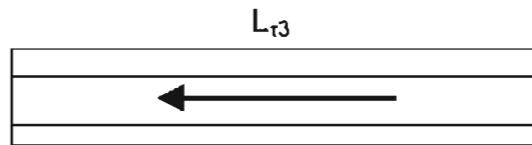
$T_{R1}$

a) Transportador de riel vibratorio  $T_{R1}$



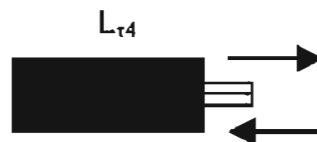
$A_{C1}$

b) Dispositivo mecánico de 3GDL  $A_{C1}$



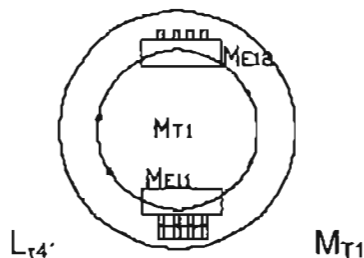
$T_{B1}$

c) Transportador de banda  $T_{B1}$



$A_{C2}$

d) Dispositivo mecánico de 3GDL  $A_{C2}$



e) Dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$

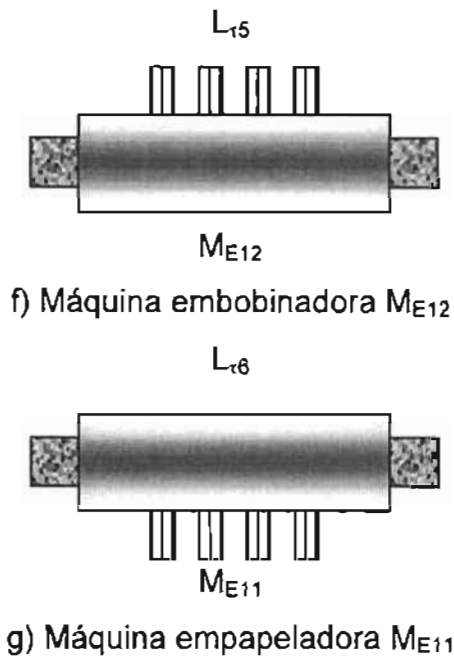


Figura 3.3 Lugares geométricos de los ciclos operacionales

### 3.3 Sincronización del módulo de embobinado

En esta sección se utiliza el método del vórtice para sincronizar localmente el módulo de embobinado descrito en la sección anterior [1,2,3]. De acuerdo con la figura 3.3, el módulo de embobinado está integrado por: el transportador de riel vibratorio  $T_{R1}$ , el dispositivo mecánico 3GDL  $A_{C1}$ , el transportador  $T_{B1}$ , el dispositivo mecánico de 3GDL  $A_{C2}$ , máquina empapeladora  $M_{E11}$ , dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$  y máquina embobinadora. La colocación de dicha maquinaria en términos del recorrido y sensado de ida se muestra en la figura siguiente:

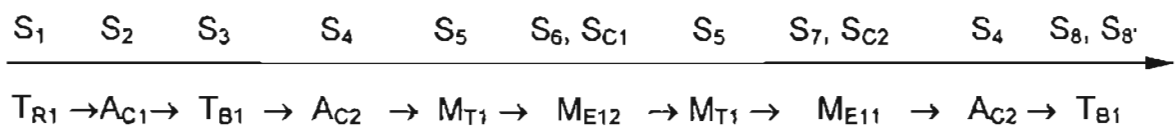


Figura 3.4 La maquinaria del módulo de embobinado colocada en términos del recorrido y sensado de ida



La máquina referencial (MR) es  $M_{E12}$ , ya que dicha máquina requiere del máximo tiempo fijo ( $T_{FM} = 20s$ ).

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

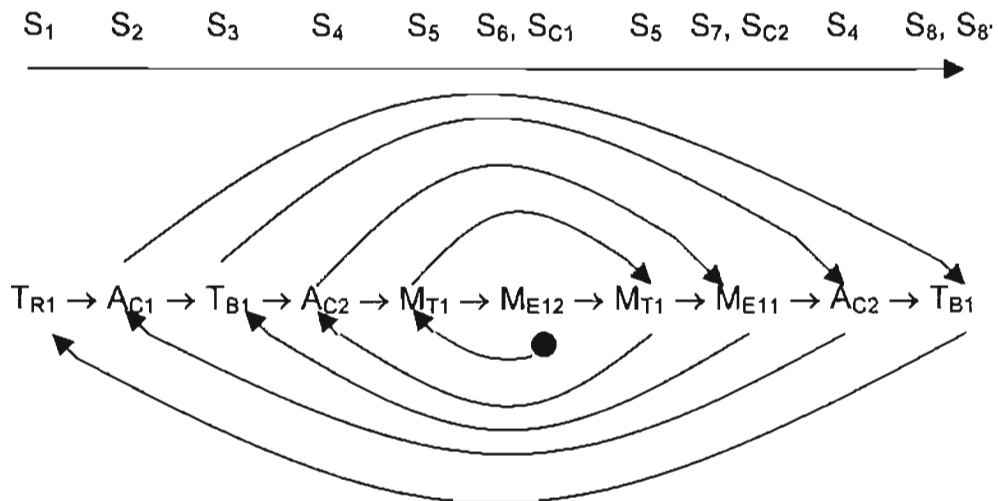


Figura 3.5 Vórtice antecesor del módulo de embobinado y sistema de sensado

Para poder determinar el número de grupos de sincronización, es necesario usar la relación  $N_{GS} = k - 1$ . Puesto que  $k = 10$ , entonces  $N_{GS} = 9$ . Dichos grupos son:

- 1)  $G_1 = \{M_{T1}, M_{E12}\}_{SA}$
- 2)  $G_2 = \{G_1, M_{T1}\} = \{M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}\}_{SB}$
- 3)  $G_3 = \{AC_2, G_2\} = \{AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}\}_{SC}$
- 4)  $G_4 = \{G_3, M_{E11}\} = \{AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}\}_{SD}$
- 5)  $G_5 = \{TB_1, G_4\} = \{TB_1, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}\}_{SE}$
- 6)  $G_6 = \{G_5, AC_2\} = \{TB_1, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, AC_2\}_{SF}$
- 7)  $G_7 = \{AC_1, G_6\} = \{AC_1, TB_1, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, AC_2\}_{SG}$
- 8)  $G_8 = \{G_7, TB_1\} = \{AC_1, TB_1, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, AC_2, TB_1\}_{SH}$
- 9)  $G_9 = \{TR_1, G_8\} = \{TR_1, AC_1, TB_1, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, AC_2, TB_1\}_{SI}$

Nótese que, cada grupo está controlado por el sistema de sensado  $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F, S_G, S_H$  y  $S_I$ , es decir:

$$S_A = \{S_5, S_6, S_{C1}\}$$

$$S_B = \{S_5, S_A\} = \{S_5, S_8, S_{C1}\}$$

$$S_C = \{S_4, S_B\} = \{S_4, S_5, S_6, S_{C1}\}$$

$$S_D = \{S_C, S_7\} = \{S_4, S_5, S_6, S_{C1}, S_7, S_{C2}\}$$

$$S_E = \{S_3, S_D\} = \{S_3, S_4, S_5, S_6, S_{C1}, S_7, S_{C2}\}$$

$$S_F = \{S_E, S_4\} = \{S_3, S_4, S_5, S_6, S_{C1}, S_7, S_{C2}\}$$

$$S_G = \{S_2, S_F\} = \{S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_{C1}, S_7, S_{C2}\}$$

$$S_H = \{S_1, S_G\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_{C1}, S_7, S_{C2}\}$$

$$S_I = \{S_G, S_8\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_{C1}, S_7, S_{C2}, S_8, S_8\}$$

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 2.3, esto es:

1. El  $TpU = 58$  s/pza,  $T_F(M_{E12}) = 20$  s y  $T_{Dis} = 38$  s
2. La distribución de los tiempos de proceso sobre las rutas de trabajo de la máquina referencial  $M_{E12}$  se muestra en la figura siguiente:

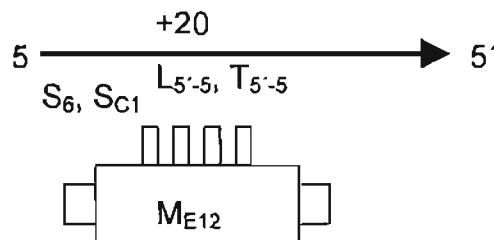


Figura 3.6 Distribución de tiempos sobre las rutas de la máquina referencial

Note en la figura anterior que:

$$a) T_{5',5} = T_{IDA}(M_{E12}) = 20 \text{ s}$$

- b) El recorrido de ida junto con los tiempos de ida está controlado por los sensores  $S_6$  y  $S_{C1}$ .
- c)  $T_{DIS} = 38$  s
- d) La máquina embobinadora  $M_{E12}$  se considera de ida “pura”.

3. Se considera que los rangos admisibles de las máquinas ( $R_A(M)$ ) se satisfacen, es decir:

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

Cabe señalar que toda distribución de tiempos debe satisfacer:

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

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. Sin embargo, las activaciones del sensor  $S_6$  y  $S_{C1}$  deben gobernar el  $T_{IDA}(M_{E12})$ , cualesquiera que sea la distribución de  $T_{DIS}$ .

- 4. La distribución de tiempos sobre las rutas de  $M_{E12}$  es la asociada con el paso 2 y es controlada por  $S_6$  y  $S_{C1}$ .
- 5. La máquina  $M_{E12}$  ha sido sincronizada individualmente a  $TpU$ . Además,
  - 5.1 Si  $T_{CICLO}(M_{E12}) < TpU$ , entonces  $M_{E12}$  opera a ciclo intermitente.
  - 5.2 Si  $T_{CICLO}(M_{E12}) = TpU$ , entonces  $M_{E12}$  opera a ciclo continuo.

Aquí,  $T_{CICLO}$  es el tiempo de ciclo. Se considerará que  $T_{CICLO}(M_{E12}) = TpU$  y, por tanto,  $M_{E12}$  operará a ciclo continuo, es decir, sin detenerse.

6. El grupo 1 está compuesto por:

$$G_1 = \{M_{T1}, M_{E12}\}_{SA}$$

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

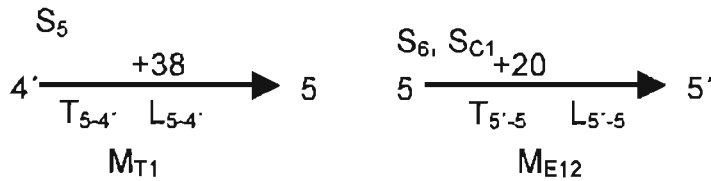


Figura 3.7 Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 1

Note en la figura anterior que:

- $T_{IDA}(M_{T1}) = T_{5,4'} = 38$  s
- $T_{pU} = T_{IDA}(M_{E12}) + T_{IDA}(M_{T1})$
- $T_{5,4'}$  es el tiempo de ida de  $M_{T1}$
- La máquina embobinadora  $M_{T1}$  se considera de ida "pura"

Obsérvese que el grupo 1 ha sido sincronizado a  $T_{pU}$  y el sensado de control es  $S_A$ .

7. El grupo 2 está compuesto por:

$$G_2 = \{G_1, M_{T1}\} = \{M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}\}_{SB}$$

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

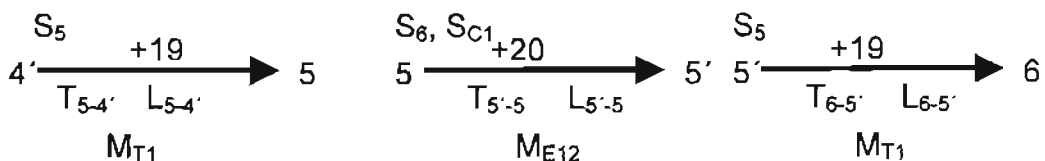


Figura 3.8 Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 2

Note en la figura anterior que:

$$a) T_{pU} = T_{5,4}' + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{6,5}'$$

o, equivalentemente:

$$T_{pU} = T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{IDA}'(M_{T1})$$

$$b) T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}'(M_{T1}) = 38 \text{ s}$$

Cabe señalar que el símbolo "I" se usa para indicar los tiempos redistribuidos. Por otro lado, la terna mínima sincronizable es  $(M_{T1}, M_{E12}, M_{T1})$  la cual es sensada por  $S_B$ .

8. El grupo 3 está compuesto por:

$$G_3 = \{A_{C2}, G_2\} = \{A_{C2}, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}\}_{SC}$$

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

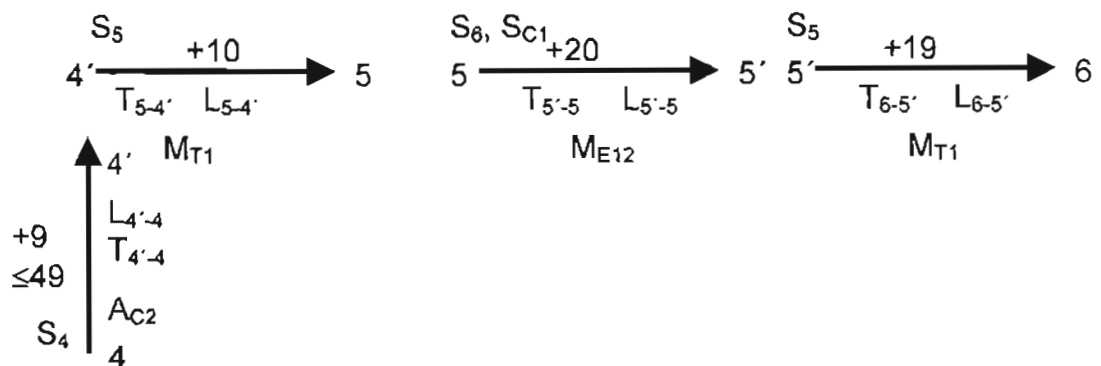


Figura 3.9 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 3

Note en la figura anterior que:

- a)  $T_{pU} = T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{IDA}(M_{T1})$   
o, equivalentemente:  
 $T_{pU} = T_{4,4}' + T_{5,4}' + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{6,5}'$
- b)  $T_{IDA}'(A_{C2}) = 9$  s
- c)  $T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{T1}) = 38$  s
- d) Las proporciones usadas fueron las siguientes:  
 $P_1 = 9$  s para  $T_{IDA}'(A_{C2})$ ;  $P_2 = 10$  s para  $T_{IDA}'(M_{T1})$ ;  $P_3 = 19$  s para  $T_{IDA}(M_{T1})$
- e)  $T_{4,4}' \leq T_{pU} - T_{4,4}'$
- f) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$  se considera de ida "pura".

Se considerará el tiempo de vuelta siguiente:  $T_{4,4}' = 2$  s. Por tanto,  $A_{C2}$  opera a ciclo intermitente.

9. El grupo 4 está compuesto por:

$$G_4 = \{G_3, M_{E11}\} = \{A_{C2}, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}\}_{SD}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 4:

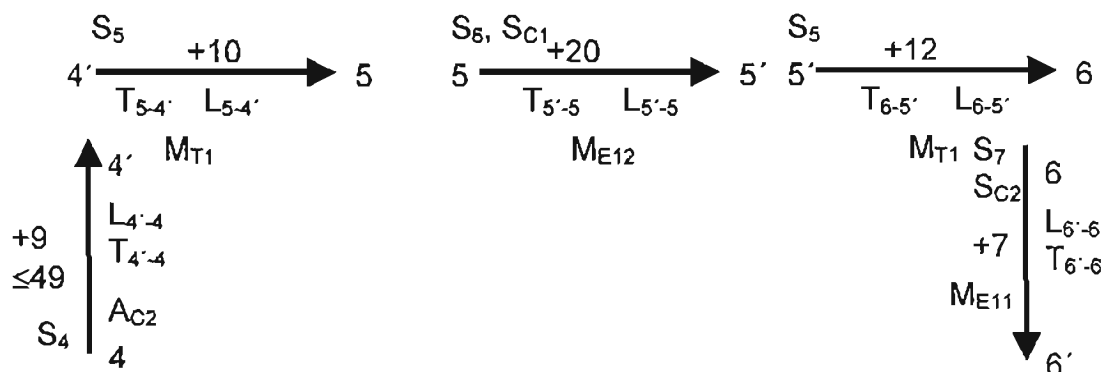


Figura 3.10 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 4

Note en la figura anterior que:

a)  $T_{pU} = T_{IDA}'(AC_2) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}'(M_{E11})$   
 o, equivalentemente:

$$T_{pU} = T_{4'4'} + T_{5,4'} + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{6,5'} + T_{6'6}$$

b)  $T_{IDA}'(M_{E11}) = 7 \text{ s}$

c)  $T_{IDA}'(AC_2) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{T1}) + T_{IDA}'(M_{E11}) = 38 \text{ s}$

d) Las proporciones usadas fueron las siguientes:

$$P_1 = 9 \text{ s para } T_{IDA}'(AC_2); P_2 = 10 \text{ s para } T_{IDA}'(M_{T1}); P_3 = 12 \text{ s para } T_{IDA}(M_{T1}); P_4 = 7 \text{ s para } T_{IDA}(M_{E11})$$

e)  $T_{4,4'} \leq T_{pU} - T_{4',4'}$

f) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$  y la máquina empapeladora  $M_{E11}$  se consideran de ida "pura"

10. El grupo 5 está compuesto por:

$$G_6 = \{G_5, AC_2\} = \{T_{B1}, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, AC_2\}_{SF}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 5:

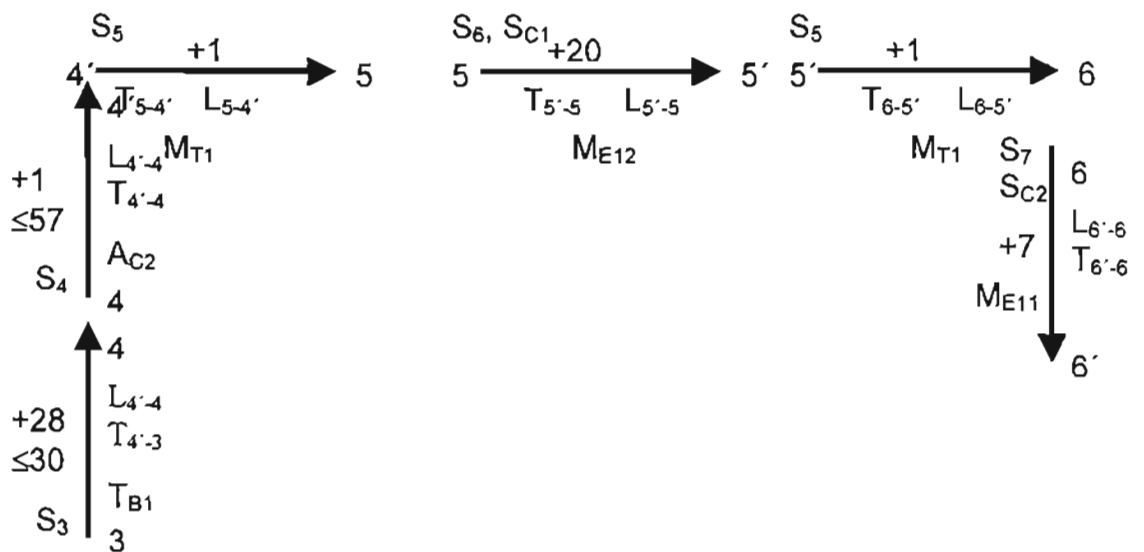


Figura 3.11 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 5

Note en la figura anterior que:

$$a) T_{pU} = T_{IDA}'(T_{B1}) + T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E11}) \text{ o, equivalentemente:}$$

$$T_{pU} = T_{4\cdot3} + T_{4\cdot4}' + T_{5,4}' + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{6,5} + T_{6\cdot6}$$

$$b) T_{IDA}'(T_{B1}) = 28 \text{ s}$$

$$c) T_{IDA}'(T_{B1}) + T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{T1}) + T_{IDA}'(M_{E11}) = 38 \text{ s}$$

d) Las proporciones usadas fueron las siguientes:

$$P_1 = 28 \text{ s para } T_{IDA}'(T_{B1}); P_2 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(A_{C2}); P_3 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(M_{T1}); P_4 = 20 \text{ s para } T_{IDA}(M_{E12}); P_5 = 1 \text{ s para } T_{IDA}(M_{T1}); P_6 = 7 \text{ s para } T_{IDA}(M_{E11}).$$

$$e) T_{3,4}' \leq T_{pU} - T_{4,3}'$$

$$f) T_{4,4}' \leq T_{pU} - T_{4\cdot4}'$$

g) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$  y la máquina empapeladora  $M_{E11}$  se consideran de ida “pura”

Se considerarán los tiempos de vuelta siguientes:  $T_{3,4} = 1$ ,  $T_{4,4\cdot} = 2$  s. Por tanto,  $T_{B1}$  y  $A_{C2}$  operan a ciclo intermitente.

11. El grupo 6 está compuesto por:

$$G_5 = \{T_{B1}, G_4\} = \{T_{B1}, A_{C2}, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}\} \text{ SE}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 6:



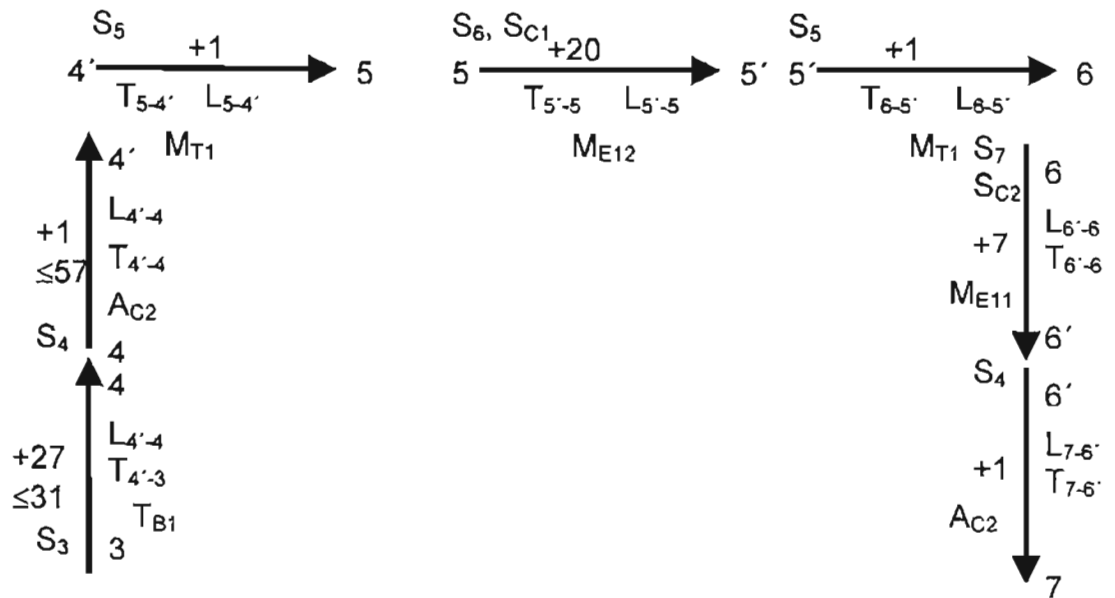


Figura 3.12 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 6

Note en la figura anterior que:

- $$T_{pU} = T_{IDA}'(T_{B1}) + T_{IDA}'(AC2) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E11}) + T_{IDA}'(AC2)$$
 o, equivalentemente:
 
$$T_{pU} = T_{4-3} + T_{4-4}' + T_{5,4}' + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{6,5}' + T_{6-6} + T_{7-6}'$$
- $$T_{IDA}'(AC2) = 1 \text{ s}$$
- $$T_{IDA}'(T_{B1}) + T_{IDA}'(AC2) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{T1}) + T_{IDA}'(M_{E11}) + T_{IDA}'(AC2) = 38 \text{ s}$$
- Las proporciones usadas fueron las siguientes:
 
$$P_1 = 27 \text{ s para } T_{IDA}'(T_{B1}); P_2 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(AC2); P_3 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(M_{T1}); P_4 = 20 \text{ s para } T_{IDA}(M_{E12}); P_5 = 1 \text{ s para } T_{IDA}(M_{T1}); P_6 = 7 \text{ s para } T_{IDA}(M_{E11}); P_7 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(AC2);$$
- $$T_{3,4}' \leq T_{pU} - T_{4,3}'$$
- $$T_{4,4}' \leq T_{pU} - T_{4-4}'$$
- $$T_{6,7}' \leq T_{pU} - T_{6-7}'$$
- El dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$  y la máquina empapeladora  $M_{E11}$  se consideran de ida "pura"

Se considerarán los tiempos de vuelta siguientes:  $T_{3-4} = 1$ ,  $T_{4-4';6'-7} = 2$  s. Por tanto,  $T_{B1}$  y  $A_{C2}$  operan a ciclo intermitente.

12. El grupo 7 está compuesto por:

$$G_7 = \{A_{C1}, G_6\} = \{A_{C1}, T_{B1}, A_{C2}, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, A_{C2}\}_{SG}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 7:

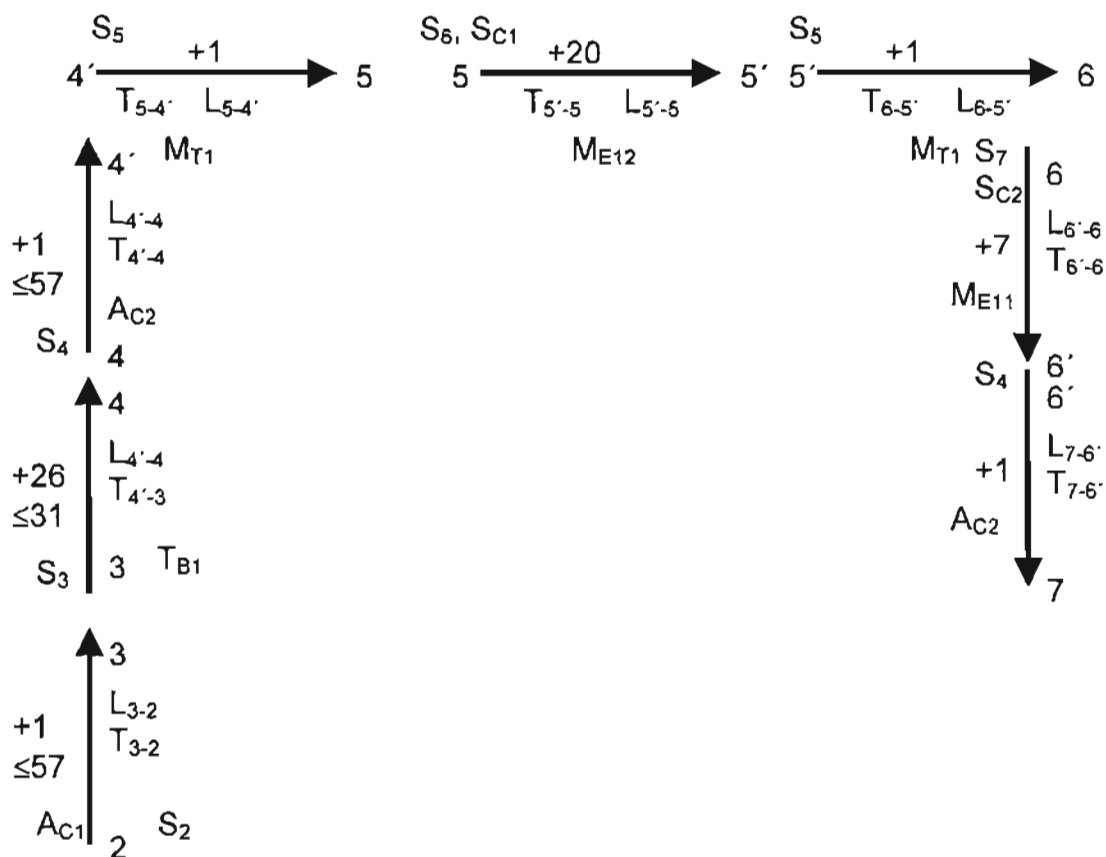


Figura 3.13 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 7

Note en la figura anterior que:

$$\begin{aligned} \text{a) } T_{pU} &= T_{IDA}(A_{C1}) + T_{IDA}'(T_{B1}) + T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E12}) + \\ & T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E11}) + T_{IDA}'(A_{C2}) \text{ o, equivalentemente:} \\ T_{pU} &= T_{3-2} + T_{4'-3} + T_{4'-4}' + T_{5,4}' + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{8,5} + T_{6'-6} + T_{7-6}' \end{aligned}$$

- b)  $T_{IDA}'(AC_1) = 1 \text{ s}$
- c)  $T_{IDA}'(AC_1) + T_{IDA}'(TB_1) + T_{IDA}'(AC_2) + T_{IDA}'(MT_1) + T_{IDA}(MT_1) + T_{IDA}'(ME_{11}) + T_{IDA}'(AC_2) = 38 \text{ s}$
- d) Las proporciones usadas fueron las siguientes:  
 $P_1 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(AC_1)$ ;  $P_2 = 27 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(TB_1)$ ;  $P_3 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(AC_2)$ ;  $P_4 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(MT_1)$ ;  $P_5 = 20 \text{ s}$  para  $T_{IDA}(ME_{12})$ ;  $P_6 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}(MT_1)$ ;  $P_7 = 7 \text{ s}$  para  $T_{IDA}(ME_{11})$ ;  $P_8 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(AC_2)$ ;
- e)  $T_{3,4}' \leq T_{pU} - T_{4,3}'$
- f)  $T_{4,4}' \leq T_{pU} - T_{4,4}'$
- g)  $T_{6,7}' \leq T_{pU} - T_{6,7}'$
- h)  $T_{2,3}' \leq T_{pU} - T_{3,2}'$
- i) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$  y la máquina empapeladora  $M_{E11}$  se consideran de ida "pura"

Se considerarán los tiempos de vuelta siguientes:  $T_{3-4} = 1$ ,  $T_{4-4':6-7} = 2 \text{ s}$ ,  $T_{2,3} = 1$ . Por tanto,  $T_{B1}$ ,  $AC_2$  y  $AC_1$  operan a ciclo intermitente.

13. El grupo 8 está compuesto por:

$$G_8 = \{G_7, T_{B1}\} = \{AC_1, T_{B1}, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, AC_2, T_{B1}\}_{SH}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 8:

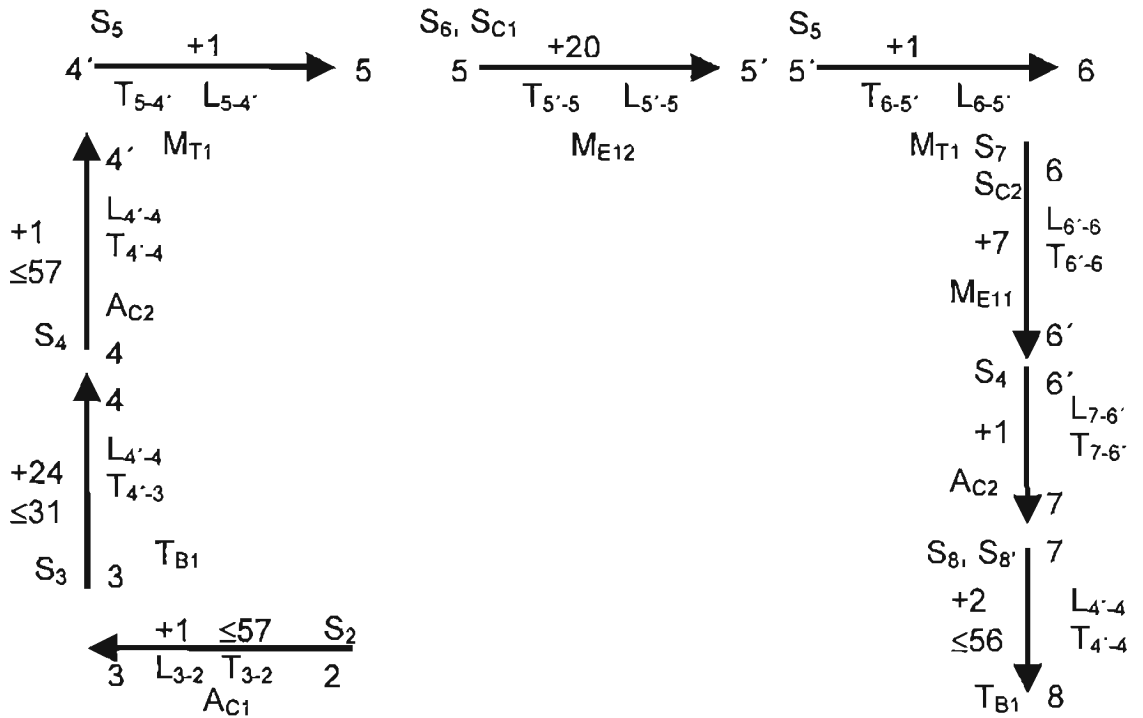


Figura 3.14 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 8

Note en la figura anterior que:

- a)  $T_{pU} = T_{IDA}'(AC_1) + T_{IDA}'(TB_1) + T_{IDA}'(AC_2) + T_{IDA}'(MT_1) + T_{IDA}(ME_{12}) + T_{IDA}'(MT_1) + T_{IDA}(ME_{11}) + T_{IDA}'(AC_2) + T_{IDA}'(TB_1)$  o, equivalentemente:  
 $T_{pU} = T_{3-2}' + T_{4-3}' + T_{4-4}' + T_{5,4}' + T_{IDA}(ME_{12}) + T_{6,5}' + T_{6-6}' + T_{7-6}' + T_{8-7}'$
- b)  $T_{IDA}'(TB_1) = 2 \text{ s}$
- c)  $T_{IDA}'(AC_1) + T_{IDA}'(TB_1) + T_{IDA}'(AC_2) + T_{IDA}'(MT_1) + T_{IDA}'(MT_1) + T_{IDA}(ME_{11}) + T_{IDA}'(AC_2) + T_{IDA}'(TB_1) = 38 \text{ s}$
- d) Las proporciones usadas fueron las siguientes:  
 $P_1 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(AC_1)$ ;  $P_2 = 27 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(TB_1)$ ;  $P_3 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(AC_2)$ ;  $P_4 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(MT_1)$ ;  $P_5 = 20 \text{ s}$  para  $T_{IDA}(ME_{12})$ ;  $P_6 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}(MT_1)$ ;  $P_7 = 7 \text{ s}$  para  $T_{IDA}(ME_{11})$ ;  $P_8 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(AC_2)$ ;  $P_9 = 2 \text{ s}$  para  $T_{IDA}(TB_1)$ .
- e)  $T_{3,4}' \leq T_{pU} - T_{4,3}'$
- f)  $T_{4,4}' \leq T_{pU} - T_{4',4}'$

- g)  $T_{6',7'} \leq T_{pU} - T_{6',7'}$
- h)  $T_{2,3'} \leq T_{pU} - T_{3,2'}$
- i)  $T_{7,8'} \leq T_{pU} - T_{8,7'}$
- j) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$  y la máquina empapeladora  $M_{E11}$  se consideran de ida "pura"

Se considerarán los tiempos de vuelta siguientes:  $T_{3-4, 7-8} = 1$ ,  $T_{4-4'; 6'-7} = 2$  s,  $T_{2,3} = 1$ . Por tanto,  $T_{B1}$ ,  $A_{C2}$  y  $A_{C1}$  operan a ciclo intermitente. Además, el módulo de embobinado ha sido sincronizado a  $T_{pU}$  y dicha sincronización es gobernada por el sistema de sensado  $S_H$ .

14. El grupo 9 está compuesto por:

$$G_9 = \{T_{R1}, G_8\} = \{T_{R1}, A_{C1}, T_{B1}, A_{C2}, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, A_{C2}, T_{B1}\} \text{ si}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 9:

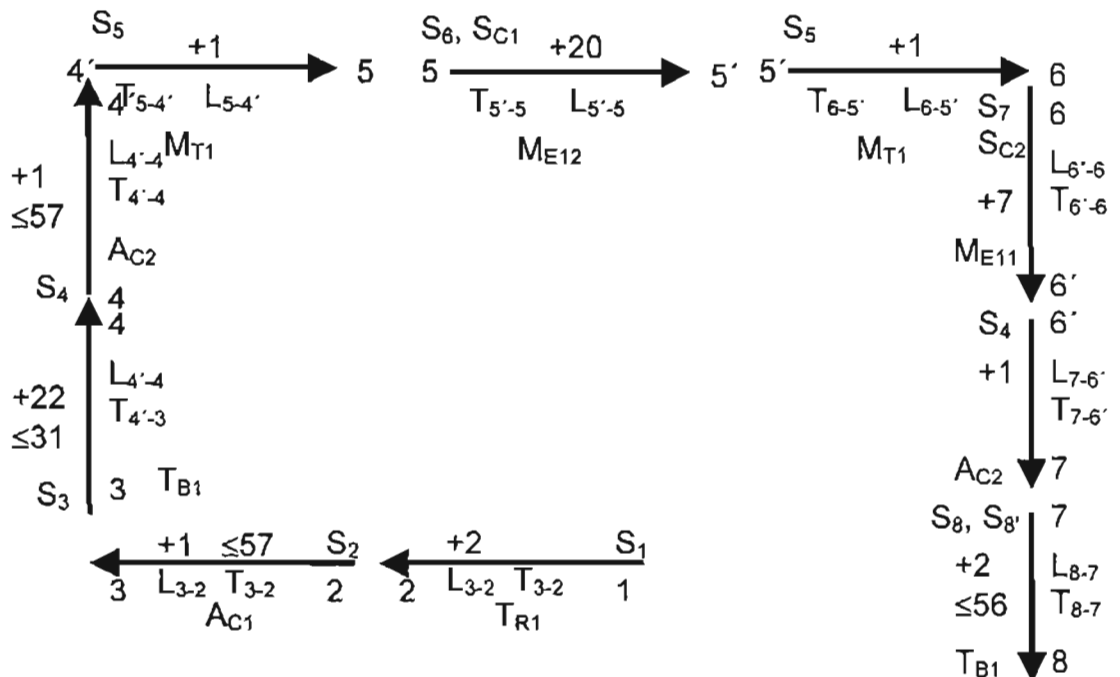


Figura 3.15 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 8

Note en la figura anterior que:

$$a) T_{pU} = T_{IDA}'(T_{R1}) + T_{IDA}'(A_{C1}) + T_{IDA}'(T_{B1}) + T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(M_{T1}) \\ T_{IDA}(M_{E12}) + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E11}) + T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(T_{B1})$$

o, equivalentemente:

$$T_{pU} = T_{2,1}' + T_{3,2}' + T_{4,3}' + T_{4,4}' + T_{5,4}' + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{6,5} + \\ T_{6,6} + T_{7,6}' + T_{8,7}'$$

$$b) T_{IDA}'(T_{B1}) = 2 \text{ s}$$

$$c) T_{IDA}'(T_{R1}) + T_{IDA}'(A_{C1}) + T_{IDA}'(T_{B1}) + T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(M_{T1}) \\ + T_{IDA}'(M_{T1}) + T_{IDA}(M_{E11}) + T_{IDA}'(A_{C2}) + T_{IDA}'(T_{B1}) = 38 \text{ s}$$

d) Las proporciones usadas fueron las siguientes:

$$P_1 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(A_{C1}); P_2 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(A_{C1}); P_3 = 27 \text{ s} \\ \text{para } T_{IDA}'(T_{B1}); P_4 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(A_{C2}); P_5 = 1 \text{ s para} \\ T_{IDA}'(M_{T1}); P_6 = 20 \text{ s para } T_{IDA}(M_{E12}); P_7 = 1 \text{ s para } T_{IDA}(M_{T1}); \\ P_8 = 7 \text{ s para } T_{IDA}(M_{E11}); P_9 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(A_{C2}); P_{10} = 1 \text{ s} \\ \text{para } T_{IDA}'(T_{B1})$$

$$e) T_{3,4}' \leq T_{pU} - T_{4,3}'$$

$$f) T_{4,4}' \leq T_{pU} - T_{4,4}'$$

$$g) T_{6,7}' \leq T_{pU} - T_{8,7}'$$

$$h) T_{2,3}' \leq T_{pU} - T_{3,2}'$$

i) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$  y la máquina empapeladora  $M_{E11}$  se consideran de ida "pura"

Se considerarán los tiempos de vuelta siguientes:  $T_{3,4, 7,8} = 1$ ,  $T_{4,4'; 6,7} = 2 \text{ s}$ ,  $T_{2,3} = 1 \text{ s}$ . Por tanto,  $T_{B1}$ ,  $A_{C2}$  y  $A_{C1}$  operan a ciclo intermitente. Además, el módulo de embobinado ha sido sincronizado a  $T_{pU}$  y dicha sincronización es gobernada por el sistema de sensado  $S_H$ .

La tabla siguiente sintetiza los resultados de la sincronización local en el módulo de embobinado y los cuales serán utilizados para construir la sincronización global.

MODULO DE EMBOBINADO						
Maquinas	Tiempos		Tipo de Ciclo	Tiempo de Espera		Sensores
	Ida	Vuelta		Ida	Vuelta	
TR <sub>1</sub>	T <sub>2,1</sub> : + 2	0	Ida Pura	+ 56	0	S <sub>1</sub>
AC <sub>1</sub>	T <sub>3,2</sub> : + 1	T <sub>2,3</sub> : -1	Intermitente	0	-56	S <sub>2</sub>
TB <sub>1</sub>	T <sub>4,3; 8,7</sub> : + 3	T <sub>3,8</sub> : -2	Intermitente	+ 53	0	S <sub>3</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>8'</sub>
AC <sub>2</sub>	T <sub>4,4; 4,4'; 6,4; 7,6; 6,7</sub> : + 4	T <sub>4,7</sub> : - 4	Intermitente	+ 50	0	S <sub>4</sub>
MT <sub>1</sub>	T <sub>5,4; 8,5</sub> : + 3	0	Ida Pura	+ 55	0	S <sub>5</sub>
ME <sub>12</sub>	T <sub>5,5</sub> : + 40	0	Ida Pura	+ 18	0	S <sub>6</sub> , S <sub>C1</sub>
ME <sub>11</sub>	T <sub>6,6</sub> : + 14	0	Ida Pura	+ 44	0	S <sub>7</sub> , S <sub>C2</sub>

Tabla 3.3 Datos para realizar el proceso de sincronización global.

# Capítulo 4

## Sincronización local del módulo de soldadura y moldeo de una línea de producción

**Introducción.** En esta parte se sincronizan localmente los 2 módulos restantes de una línea de producción serial los cuales son: soldadura y moldeo [19]. Al igual que el capítulo anterior, se utiliza el método del vórtice para relacionar máquinas distribuidas sobre los módulos de acuerdo con el recorrido de ida [1,2,3]. Con dichas relaciones se generarán grupos de máquinas, los cuales se sincronizan localmente a TpU. Los datos conocidos son: la distribución de maquinaria, el sistema de sensado de ida, los lugares geométricos de los ciclos operacionales de la maquinaria, los tiempos fijos y el TpU. Los resultados obtenidos son usados en la parte 6 de este informe para sincronizar globalmente el sistema productivo estudiado.

### 4.1 Definición del problema y restricciones

En esta parte se define el problema por solucionar, así como sus restricciones fundamentales. Esto es:

“ Dados;  $D_p$ ,  $M^o$ ,  $T_F$ ,  $TpU$ ,  $S_{IDA}$  y  $L_T$ , encuentre:

$$SL = SL (M^o, T_F, TpU, S_{IDA}, L_T)$$

tal que:

$$1) R_1 = \hat{R}_1$$

$$2) R_2 = \hat{R}_2$$



$$3) R_4 = \hat{R}_4$$

$$4) R_5 = \hat{R}_5$$

$$5) R_6 = \hat{R}_6$$

sean satisfechas. ”

La hipótesis es la siguiente:

*“En toda línea de producción serial compuesta por F – módulos existe un conjunto de tiempos de proceso distribuidos sobre las rutas de trabajo de la maquinaria. La distribución de los tiempos de proceso y la sincronización de operaciones en cada máquina o en un conjunto de máquinas (módulo) dependen del tiempo de producción unitaria y del sistema de sensado de ida.”*

Por otro lado, las premisas básicas son:

- 1) El TpU es perfecto y representable por un número entero.
- 2) El proceso de sincronización local satisface:

$$TpU = \sum_{i=1}^K T_{IDAi}$$

Aquí, K es el número de máquinas que integran un módulo de producción y  $T_{IDA}$  es el tiempo de ida de cada máquina.

## 4.2 Descripción de los datos conocidos

La distribución de planta ( $D_p$ ) [19] asociada con el sistema productivo motivo de estudio [1, 4, 5] se muestra en la figura 4.1.

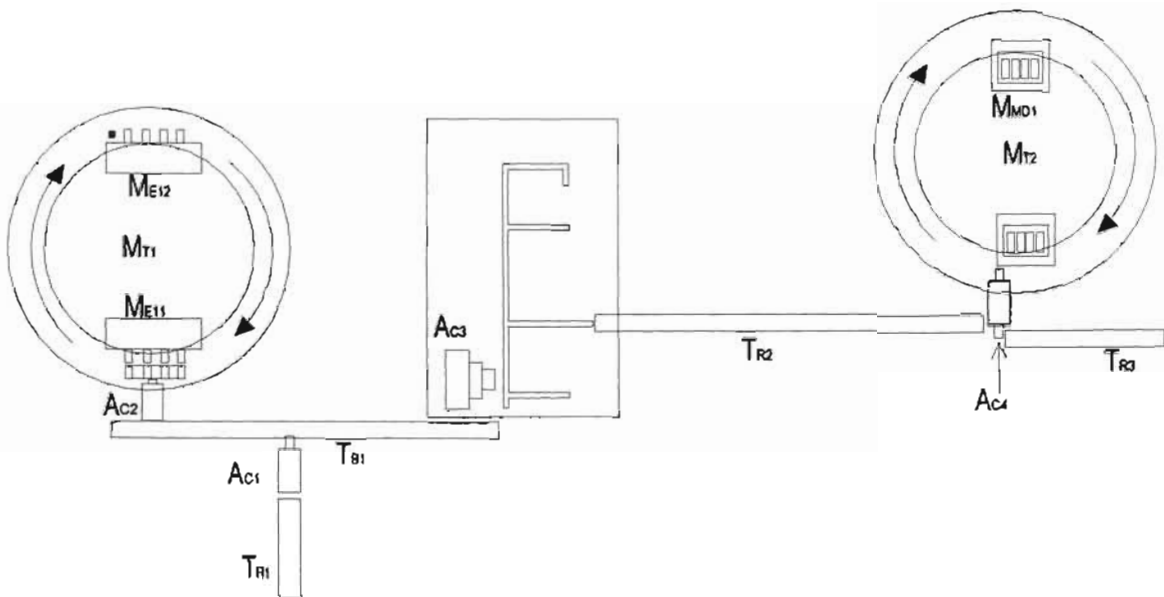


Figura 4.1 Distribución de planta

La tabla siguiente describe cada uno de los elementos y dispositivos de trabajo que componen la distribución de planta:

Nomenclatura	Descripción
$T_{R1}$	Transportador de riel vibratorio
$A_{C1}$	Dispositivo mecánico 3GDL
$T_{B1}$	Transportador de banda
$A_{C2}$	Dispositivo mecánico 3GDL
$M_{E12}$	Máquina embobinadora
$M_{T1}$	Dispositivo transportador giratorio
$M_{E11}$	Máquina empapeladora

$A_{C3}$	Dispositivo mecánico 3GDL
$T_{R2}$	Transportador de riel vibratorio
$A_{C4}$	Dispositivo mecánico 3GDL
$M_{T2}$	Dispositivo transportador giratorio
$M_{MD1}$	Estación de moldeo
$T_{R3}$	Transportador de riel vibratorio

Tabla 4.1 Descripción de los elementos de trabajo

Las operaciones y procesos del sistema productivo se describen en la crónica siguiente:

Crónica:

*“ Una vez posicionadas las piezas en el  $LG_8$  el robot  $A_{C3}$  las toma y las transporta de  $LG_8$  a  $LG_9$ . En  $LG_9$  dicho robot aplica la operación de flux. Posteriormente  $A_{C3}$  se traslada de  $LG_9$  a  $LG_{10}$ . En  $LG_{10}$  el robot realiza la operación de soldadura sobre los 8 componentes. Enseguida el robot transporta las piezas de  $LG_{10}$  a  $LG_{10}'$ . En  $LG_{10}'$  se realiza la operación de eliminación de excedentes de soldadura. Posteriormente el robot transporta piezas de  $LG_{10}'$  a  $LG_{11}$ , en  $LG_{11}$  se realiza la operación de descarga de piezas y finalmente el robot se desplaza de  $LG_{11}$  a  $LG_8$ . Una vez descargadas las piezas en  $LG_{11}$ ,  $TR_2$  las transporta de  $LG_{11}$  a  $LG_{12}$ . De  $LG_{12}$  a  $LG_{13}$ ,  $A_{C4}$  suministra a  $MT_2$  4 piezas posteriormente  $MT_2$  gira transportando de  $LG_{13}$  a  $LG_{14}$  los 4 componentes. En  $LG_{14}$  la máquina  $M_{MD1}$  inyecta plástico sobre los 4 componentes (a la vez  $A_{C4}$  suministra 4 piezas nuevas sobre  $LG_{13}$ ). Una vez terminada la operación de inyección sobre  $LG_{14}$  el dispositivo  $MT_2$  gira de  $LG_{14}$  a  $LG_{13}'$  transportando 4 componentes y durante ese movimiento  $MT_2$  transporta 4 nuevos componentes. De  $LG_{13}'$  a  $LG_{15}$ ,  $A_{C4}$  transporta 4 componentes procesados. Una vez que la máquina  $M_{MD1}$  realiza la operación de inyección sobre los 4 componentes,  $MT_2$  gira de  $LG_{14}$  a  $LG_{13}'$ , con 4 piezas terminadas. Posteriormente  $A_{C4}$  transporta de  $LG_{13}'$  a  $LG_{15}$  4*

componentes completándose 8 en LG<sub>15</sub>. Puesto seguido la máquina TR<sub>3</sub> transporta de LG<sub>15</sub> a LG<sub>16</sub> los 8 componentes.”

Las piezas descritas en la crónica anterior se muestran en la figura 4.1. Por otro lado, la modularización del sistema productivo (M<sup>0</sup>) se muestra en la figura 4.2:

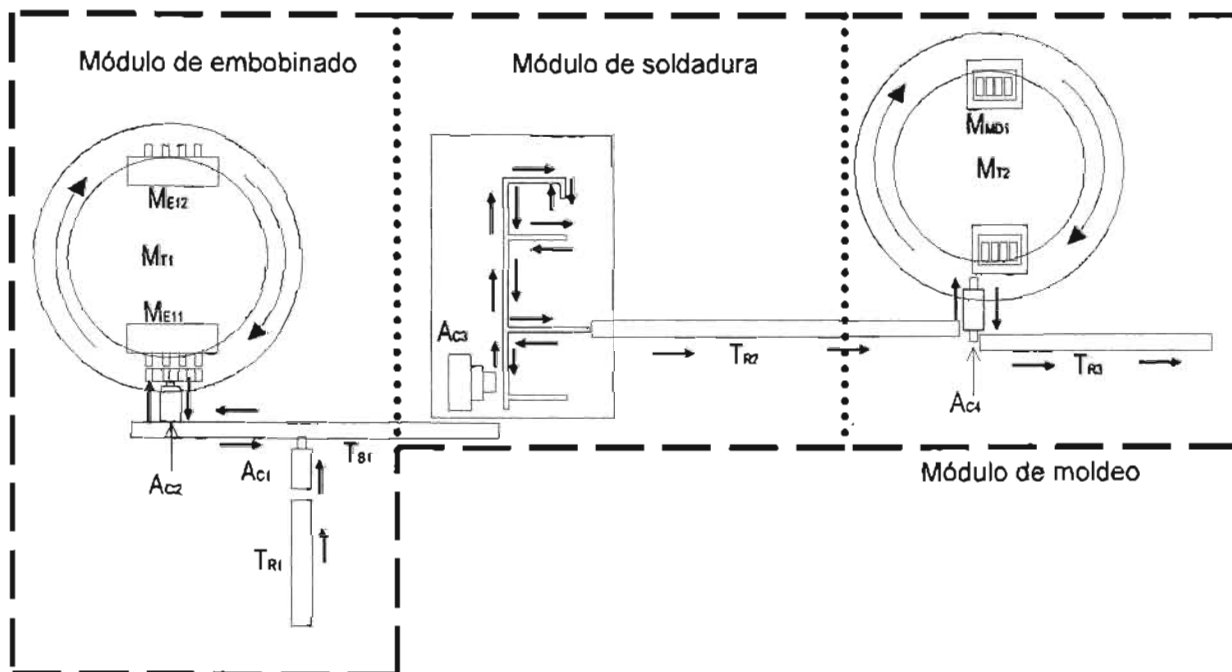


Figura 4.2 Modularización del sistema productivo

Note en la figura anterior que, el módulo de embobinado esta integrado por 7 máquinas (el análisis de este módulo ya fue hecho en el Capítulo 3, por ello en este capítulo solo 2 serán analizadas), el módulo de soldadura por 2 máquinas y el de moldeo por 4. La figura siguiente muestra la distribución del sensado de ida relacionado con el sistema productivo:

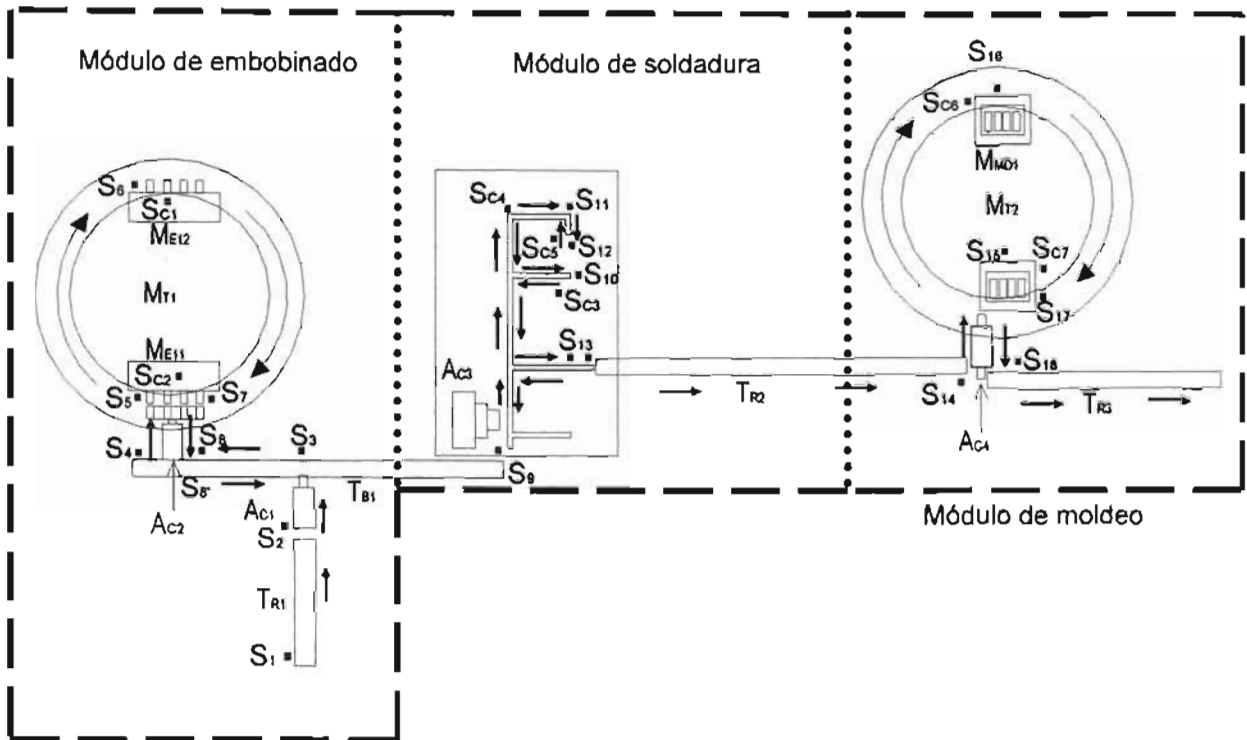


Figura 4.3 Distribución del sensado de ida

En la tabla 4.2 se describen los tipos de sensores y sus relaciones de activación asociadas con la maquinaria.

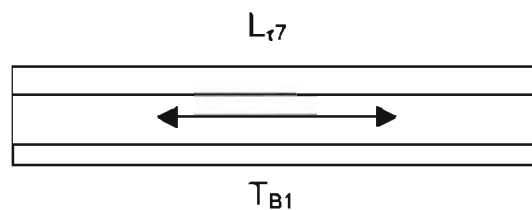
Nomenclatura	Máquina de relación	Descripción
S <sub>1</sub>	T <sub>R1</sub>	S <sub>1</sub> activa a R <sub>1</sub>
S <sub>2</sub>	AC <sub>1</sub>	S <sub>2</sub> activa a AC <sub>1</sub>
S <sub>3</sub>	T <sub>B1</sub>	S <sub>3</sub> activa a T <sub>B1</sub>
S <sub>4</sub>	AC <sub>2</sub>	S <sub>4</sub> activa a AC <sub>2</sub>
S <sub>5</sub>	M <sub>T1</sub>	S <sub>5</sub> activa a M <sub>T1</sub>
S <sub>6</sub>	M <sub>E12</sub>	S <sub>6</sub> activa a M <sub>E12</sub>
SC <sub>1</sub>	M <sub>E12</sub>	SC <sub>1</sub> detecta fin de tarea en M <sub>E12</sub>
S <sub>7</sub>	M <sub>E11</sub>	S <sub>7</sub> activa a M <sub>E11</sub>
SC <sub>2</sub>	M <sub>E11</sub>	SC <sub>2</sub> detecta fin de tarea en M <sub>E11</sub>
S <sub>9</sub>	AC <sub>3</sub>	S <sub>9</sub> activa a AC <sub>3</sub>
S <sub>10</sub>	AC <sub>3</sub>	S <sub>10</sub> activa a AC <sub>3</sub>

$S_{C3}$	$A_{C3}$	$S_{C3}$ detecta fin de tarea en $A_{C3}$
$S_{11}$	$A_{C3}$	$S_{11}$ activa a $A_{C3}$
$S_{C4}$	$A_{C3}$	$S_{C4}$ detecta fin de tarea en $A_{C3}$
$S_{12}$	$A_{C3}$	$S_{12}$ activa a $A_{C3}$
$S_{C5}$	$A_{C3}$	$S_{C5}$ detecta fin de tarea en $A_{C3}$
$S_{13}$	$T_{R2}$	$S_{13}$ activa a $T_{R2}$
$S_{14}$	$A_{C4}$	$S_{14}$ activa a $A_4$
$S_{15}$	$M_{T2}$	$S_{15}$ activa a $M_{T2}$
$S_{16}$	$M_{MD1}$	$S_{16}$ activa a $M_{MD1}$
$S_{C6}$	$M_{MD1}$	$S_{C6}$ detecta fin de tarea en $M_{MD1}$
$S_{17}$	$A_{C4}$	$S_{17}$ activa a $A_{C4}$
$S_{C7}$	$A_{C4}$	$S_{C7}$ detecta fin de tarea en $A_{C4}$
$S_{18}$	$T_{R3}$	$S_{18}$ activa a $T_{R3}$

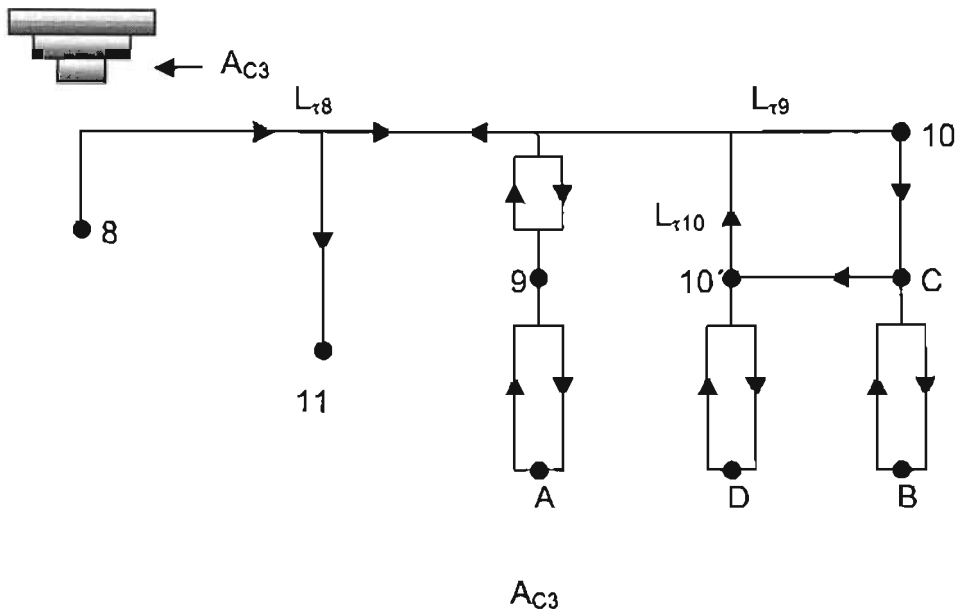
$S_i$  : sensor principal;  $S_{Ci}$ : sensor de completud

Tabla 4.2 Descripción del sensado de ida

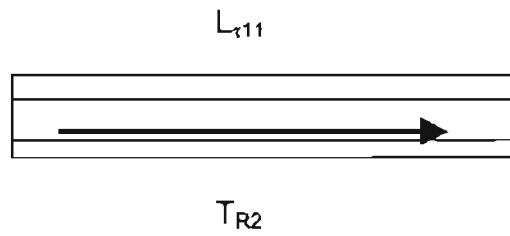
Por otro lado, el tiempo fijo asociado con la operación de soldadura ( $T_{Fmax}$ ) es de 48 s y el tiempo fijo de moldeo es de 26 s. Dichos tiempos están integrados a  $T_F$ . Además, el  $T_{pU} = 58$  s/pza. La figura 4.4 muestra el sistema de lugares geométricos ( $L_i$ ) asociado con cada una de las máquinas que componen el sistema productivo [20].



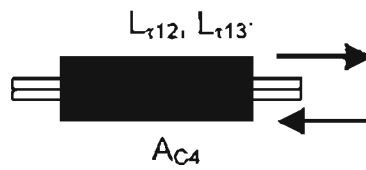
a) Transportador de banda  $T_{B1}$



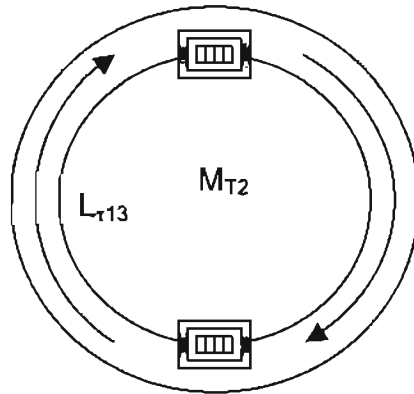
b) Dispositivo mecánico 3GDL  $A_{C3}$



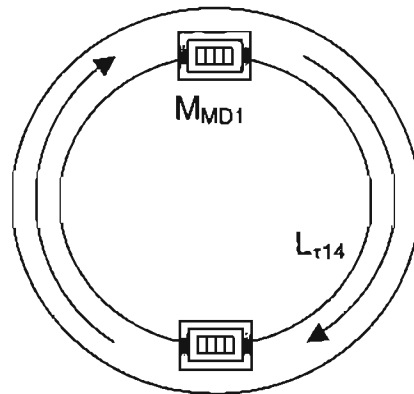
c) Transportador de riel vibratorio  $T_{R2}$



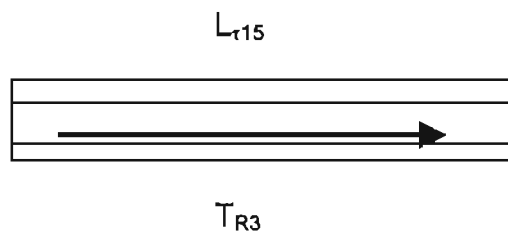
d) Dispositivo mecánico 3GDL  $A_{C4}$



e) Dispositivo transportador giratorio  $M_{T2}$



f) Estación de moldeo  $M_{MD1}$



e) Transportador de riel vibratorio  $T_{R3}$

Figura 4.4 Lugares geométricos de los ciclos operacionales



### 4.3 Sincronización 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 [1, 2, 3]. De acuerdo con la figura 4.4, el módulo de soldadura está integrado por: el transportador de riel vibratorio  $T_{B1}$ , el dispositivo mecánico 3GDL  $A_{C3}$  y el transportador de riel vibratorio  $T_{R2}$ . La colocación de dicha maquinaria en términos del recorrido y sensado de ida se muestra en la figura siguiente:

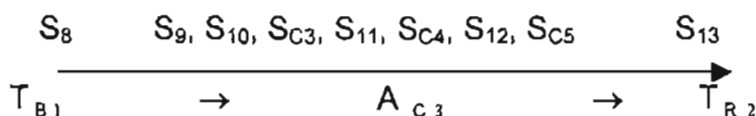


Figura 4.5 La maquinaria del módulo de soldadura colocada en términos del recorrido y sensado de ida

La máquina referencial (MR) es  $A_{C3}$ , ya que dicha máquina requiere del máximo tiempo fijo ( $T_{FM} = 48$  s).

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

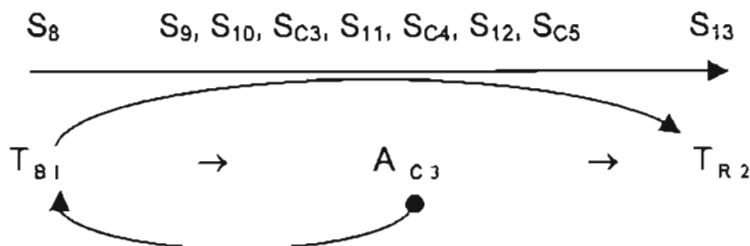


Figura 4.6 Vórtice de sincronización antecesor del módulo de soldadura y sistema de sensado.

Para poder determinar el número de grupos de sincronización, es necesario usar la relación  $N_{GS} = k - 1$ . Puesto que  $k = 3$ , entonces  $N_{GS} = 2$ .

$$1) G_1 = \{T_{B1}, A_{C3}\}_{SA}$$

$$2) G_2 = \{G_1, T_{R2}\} = \{T_{B1}, A_{C3}, T_{R2}\}_{SB}$$

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

$$S_A = \{S_8, S_9, S_{10}, S_{C3}, S_{11}, S_{C4}, S_{12}, S_{C5}\}$$

$$S_B = \{S_A, S_{13}\} = \{S_8, S_9, S_{10}, S_{C3}, S_{11}, S_{C4}, S_{12}, S_{C5}, S_{13}\}$$

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 2.3, esto es:

1. El  $T_{pU} = 58$  s/pza,  $T_F(A_{C3}) = 48$  s y  $T_{DIS} = 10$  s
2. La distribución de los tiempos de proceso sobre las rutas de trabajo de la máquina referencial  $A_{C3}$  se muestra en la figura siguiente:

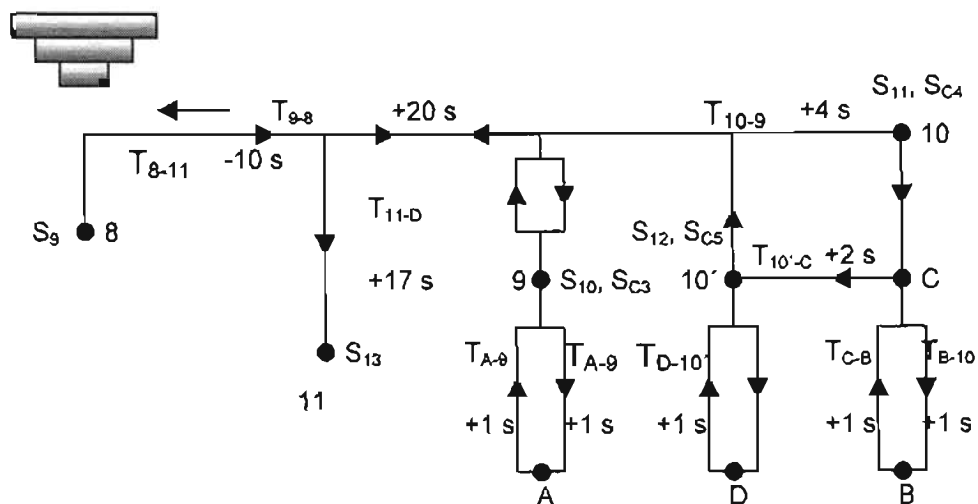


Figura 4.7 Distribución de tiempos sobre las rutas de la máquina referencial

Note en la figura anterior que:

- a)  $T_{9,8} + T_{A,9} + T_{9,A} + T_{10,9} + T_{B,10} + T_{C,B} + T_{10,C} + T_{D,10} + T_{11,D} = T_{IDA}(A_{C3})$
- b)  $T_{8,11} = T_{VUELTA}(A_{C3})$
- c)  $T_{9,8}$  es un tiempo de operación principal
- d)  $T_{A,9}$  es un tiempo de operación principal
- e)  $T_{9,A}$  es un tiempo de operación principal
- f)  $T_{10,9}$  es un tiempo de operación principal
- g)  $T_{B,10}$  es un tiempo de operación principal
- h)  $T_{C,B}$  es un tiempo de operación principal
- i)  $T_{10,C}$  es un tiempo de operación principal
- j)  $T_{D,10}$  es un tiempo de operación principal
- k)  $T_{11,D}$  es un tiempo de operación principal
- l) El recorrido de ida junto con los tiempos de ida está controlado por los sensores  $S_9$ ,  $S_{10}$ , y  $S_{11}$ . (primarios)
- h)  $T_{DIS} = T_{9,8} + T_{A,9} + T_{9,A} + T_{10,9} + T_{B,10} + T_{C,B} + T_{10,C} + T_{D,10} + T_{11,D}$

3. Considera que los rangos admisibles de las máquinas ( $R_A(M)$ ) se satisfacen; es decir:

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

4. La distribución de tiempos sobre las rutas de la máquina referencial se muestra en la figura siguiente.

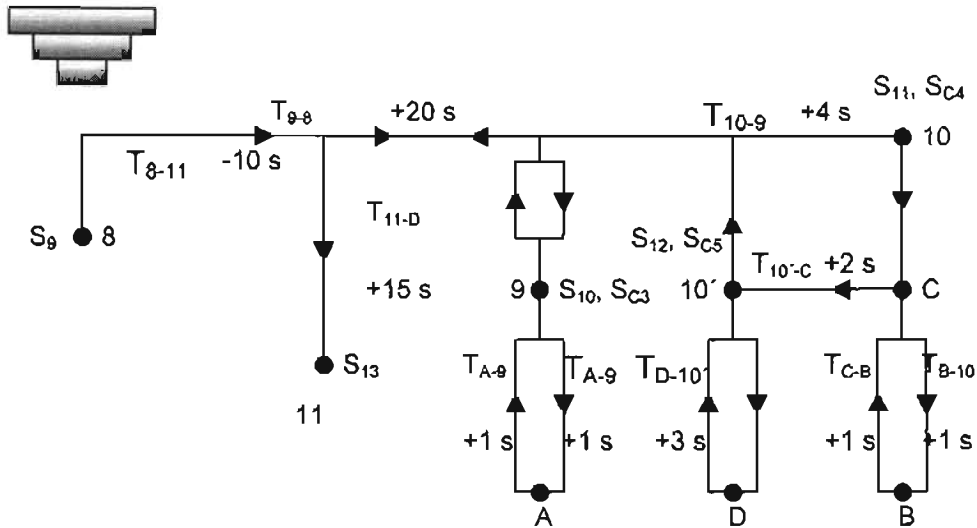


Figura 4.8 Otra distribución de tiempos

Cabe señalar que toda distribución de tiempos debe satisfacer:

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

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, las activaciones de los sensores  $S_9$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{C3}$ ,  $S_{C4}$ , y  $S_{C5}$  deben gobernar el  $T_{IDA}(A_{C3})$ , cualesquiera que sea la distribución de  $T_{DIS}$ .

5. La distribución de tiempos sobre las rutas de  $A_{C3}$  es la asociada con el paso 2 y es controlada por  $S_9$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{C3}$ ,  $S_{C4}$ , y  $S_{C5}$ .
6. La máquina  $A_{C3}$  ha sido sincronizada individualmente a  $T_{pU}$ . Además,
  - 6.1. Si  $T_{CICLO}(A_{C3}) < T_{pU}$ , entonces  $A_{C3}$  opera a ciclo intermitente.
  - 6.2. Si  $T_{CICLO}(A_{C3}) = T_{pU}$ , entonces  $A_{C3}$  opera a ciclo continuo.

Aquí,  $T_{\text{CICLO}}$  es el tiempo de ciclo. Se considerará que  $T_{\text{CICLO}}(A_{C3}) = T_{pU}$  y, por tanto,  $A_{C3}$  operará a ciclo continuo; es decir, sin detenerse.

7. El grupo 1 está compuesto por:

$$G_1 = \{T_{B1}, A_{C3}\}_{SA}$$

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

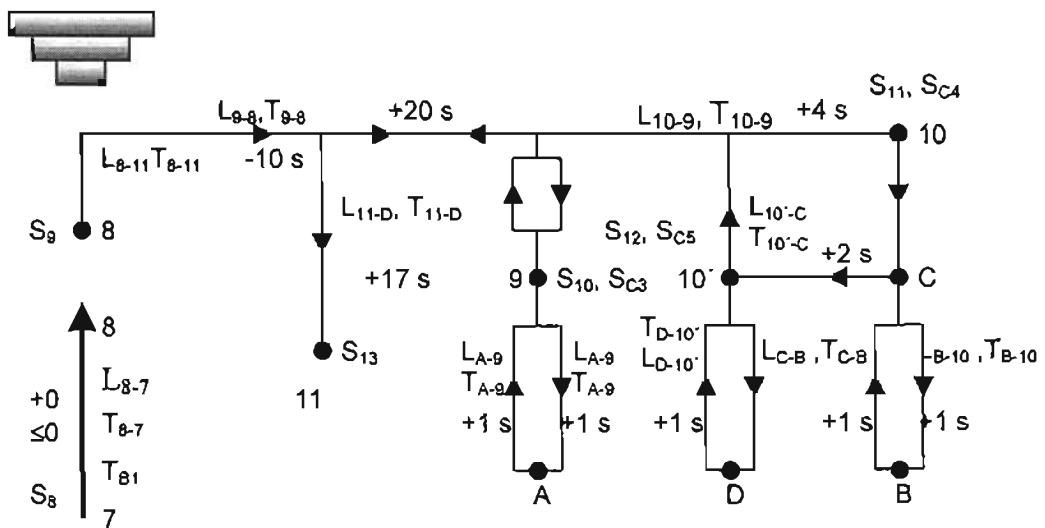


Figura 4.9 Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 1

Note en la figura anterior que:

- $T_{IDA}(T_{B1}) = T_{8,7} = 0$  s
- $T_{pU} = T_{IDA}(A_{C3}) + T_{IDA}(T_{B1})$
- $T_{8,7}$  es el tiempo de ida de  $T_{B1}$
- El tiempo de  $T_{B1}$  es 0 s para efectos de análisis

Obsérvese que el grupo 1 ha sido sincronizado a  $T_{pU}$  y el sensado de control es  $S_A$ .

8. El grupo 2 está compuesto por:

$$G_2 = \{G_1, T_{R2}\} = \{T_{B1}, A_{C3}, T_{R2}\} S_B$$

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

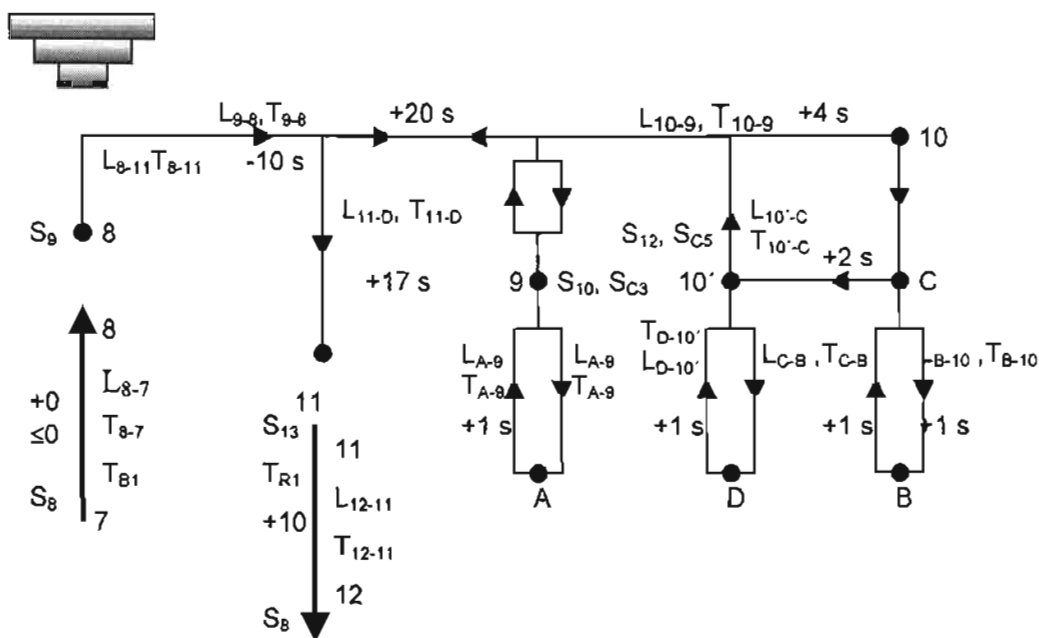


Figura 4.10 Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 2

Note en la figura anterior que:

a)  $T_{pU} = T_{8,7} + T_{IDA}(A_{C3}) + T_{12,11}$

o, equivalentemente:

$$T_{pU} = T_{IDA}(T_{B1}) + T_{IDA}(A_{C3}) + T_{IDA}(T_{R1})$$

b)  $T_{IDA}(T_{B1}) + T_{IDA}(T_{R1}) = 10 \text{ s}$

La terna mínima sincronizable es  $(M_{T1}, M_{E12}, M_{T1})$  la cual es sensada por  $S_B$ .

#### 4.4 Sincronización del módulo de moldeo

En esta sección se utiliza el método del vórtice para sincronizar localmente el módulo de embobinado descrito en la sección anterior [2, 4]. De acuerdo con la figura 4.2, el módulo de embobinado está integrado por: el dispositivo mecánico 3GDL  $A_{C4}$ , el dispositivo transportador giratorio  $M_{T1}$ , la estación de moldeo  $M_{MD1}$  y el transportador de riel vibratorio  $T_{R3}$ . La colocación de dicha maquinaria en términos del recorrido y sentido de ida se muestra en la figura siguiente:

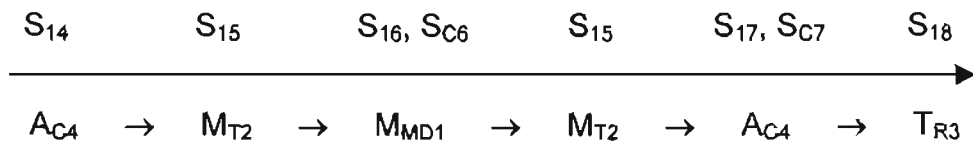


Figura 4.11 La maquinaria del módulo de embobinado colocada en términos del recorrido y sentido de ida

La máquina referencial (MR) es  $M_{MD1}$ , ya que dicha máquina requiere del máximo tiempo fijo ( $T_{FM} = 26s$ ).

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

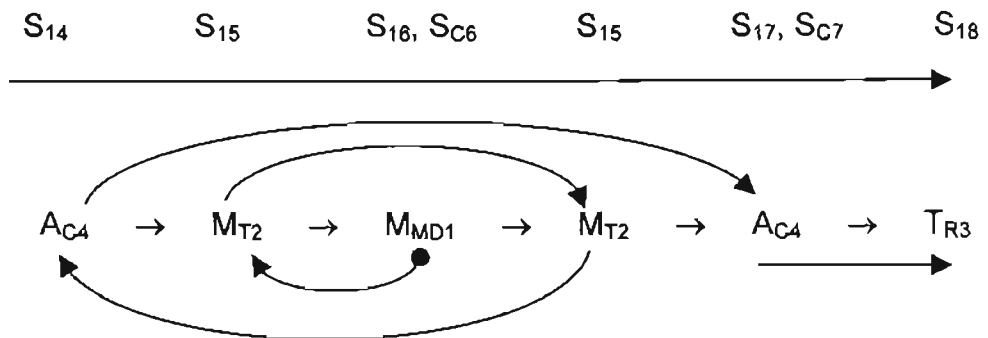


Figura 4.12 Vórtice antecesor del módulo de moldeo y sistema de sentido

Para poder determinar el número de grupos de sincronización, es necesario usar la relación  $N_{GS} = k - 1$ . Puesto que  $k = 6$ , entonces  $N_{GS} = 5$ . Dichos grupos son:

- 1)  $G_1 = \{M_{T2}, M_{MD1}\}_{SA}$
- 2)  $G_2 = \{G_1, M_{T2}\} = \{M_{T2}, M_{MD1}, M_{T2}\}_{SB}$
- 3)  $G_3 = \{A_{C4}, G_2\} = \{A_{C4}, M_{T2}, M_{MD1}, M_{T2}\}_{SC}$
- 4)  $G_4 = \{G_3, A_{C4}\} = \{A_{C4}, M_{T2}, M_{MD1}, M_{T2}, A_{C4}\}_{SD}$
- 5)  $G_5 = \{G_4, T_{R3}\} = \{A_{C4}, M_{T2}, M_{MD1}, M_{T2}, A_{C4}, T_{R3}\}_{SE}$

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

$$S_A = \{S_{15}, S_{16}, S_{C6}\}$$

$$S_B = \{S_{15}, S_A\} = \{S_{15}, S_{16}, S_{C6}\}$$

$$S_C = \{S_{14}, S_B\} = \{S_{14}, S_{15}, S_{16}, S_{C6}\}$$

$$S_D = \{S_C, S_{17}\} = \{S_{14}, S_{15}, S_{16}, S_{C6}, S_{17}, S_{C7}\}$$

$$S_E = \{S_D, S_{18}\} = \{S_{14}, S_{15}, S_{16}, S_{C6}, S_{17}, S_{C7}, S_{18}\}$$

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 2.3, esto es:

1. El  $T_{pU} = 58$  s/pza,  $T_F(M_{MD1}) = 26$  s y  $T_{DIS} = 32$  s
2. La distribución de los tiempos de proceso sobre las rutas de trabajo de la máquina referencial  $M_{MD1}$  se muestra en la figura siguiente:

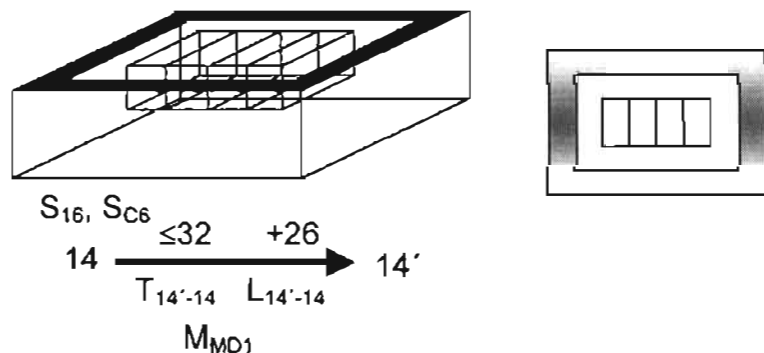


Figura 4.13 Distribución de tiempos sobre las rutas de la máquina referencial



Note en la figura anterior que:

- a)  $T_{14',14} = T_{IDA} (M_{MD1}) = 26 \text{ s}$
- b)  $T_{14-14'} = T_{VUELTA} = 32 \text{ s}$
- c) El recorrido de ida junto con los tiempos de ida está controlado por el sensor  $S_{16}$  y  $S_{C6}$ .
- d)  $T_{DIS} = 32 \text{ s}$

3. Se considera que los rangos admisibles de las máquinas ( $R_A (M)$ ) se satisfacen; es decir:

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

Cabe señalar que toda distribución de tiempos debe satisfacer:

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

Aquí,  $L$  es el número de distribuciones. Por otro lado, es claro que una distribución  $T_{DIS}$  funcional es aquella donde el tiempo de vuelta secundario sea el máximo posible. Sin embargo, las activaciones del sensor  $S_{16}$  y  $S_{C6}$  deben gobernar el  $T_{IDA} (M_{MD1})$ , cualesquiera que sea la distribución de  $T_{DIS}$ .

- 4. La distribución de tiempos sobre las rutas de  $M_{MD1}$  es la asociada con el paso 2 y es controlada por  $S_{16}$  y  $S_{C6}$ .
- 5. La máquina  $M_{MD1}$  ha sido sincronizada individualmente a  $TpU$ . Además,
  - 5.1 Si  $T_{CICLO} (M_{MD1}) < TpU$ , entonces  $M_{MD1}$  opera a ciclo intermitente.
  - 5.2 Si  $T_{CICLO} (M_{MD1}) = TpU$ , entonces  $M_{MD1}$  opera a ciclo continuo.

Aquí,  $T_{\text{CICLO}}$  es el tiempo de ciclo. Se considerará que  $T_{\text{CICLO}}(M_{\text{MD1}}) = T_{\text{pU}}$  y, por tanto,  $M_{\text{MD1}}$  operará a ciclo continuo, es decir, sin detenerse.

6. El grupo 1 está compuesto por:

$$G_1 = \{ M_{\text{T2}}, M_{\text{MD1}} \}_{\text{SA}}$$

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

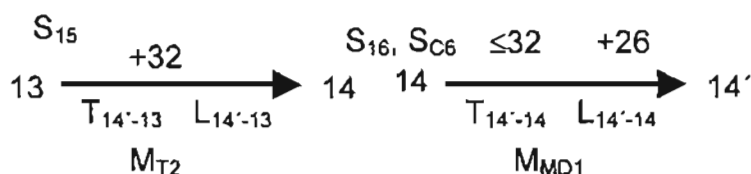


Figura 4.14 Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 1

Note en la figura anterior que:

- $T_{\text{IDA}}(M_{\text{T2}}) = T_{14,13'} = 32 \text{ s}$
- $T_{\text{pU}} = T_{\text{IDA}}(M_{\text{MD1}}) + T_{\text{IDA}}(M_{\text{T2}})$
- $T_{14,13'}$  es el tiempo de ida de  $M_{\text{T1}}$
- El dispositivo transportador giratorio  $M_{\text{T2}}$  se considera de ida "pura"

Obsérvese que el grupo 1 ha sido sincronizado a  $T_{\text{pU}}$  y el sensado de control es  $S_{\text{A}}$ .

7. El grupo 2 está compuesto por:

$$G_2 = \{ G_1, M_{\text{T2}} \} = \{ M_{\text{T2}}, M_{\text{MD1}}, M_{\text{T2}} \}_{\text{SB}}$$

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

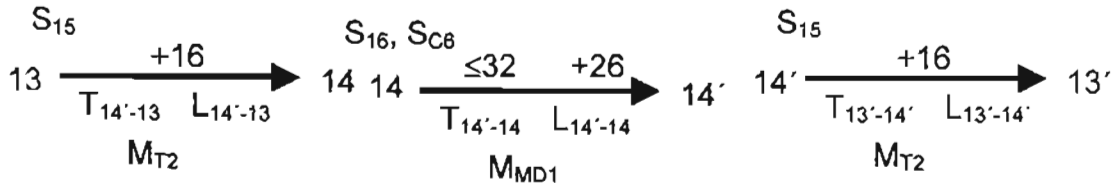


Figura 4.15 Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 2

Note en la figura anterior que:

$$a) T_{pU} = T_{14,13}' + T_{IDA} (M_{MD1}) + T_{13',14}'$$

o, equivalentemente:

$$T_{pU} = T_{IDA}' (M_{T2}) + T_{IDA} (M_{MD1}) + T_{IDA}' (M_{T2})$$

$$b) T_{IDA}' (M_{T2}) + T_{IDA}' (M_{T2}) = 32 \text{ s}$$

c) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T2}$  se considera de ida "pura".

Cabe señalar que el símbolo "p" se usa para indicar los tiempos redistribuidos. Por otro lado, la terna mínima sincronizable es  $(M_{T2}, M_{MD1}, M_{T2})$  la cual es sensada por  $S_B$ .

8. El grupo 3 está compuesto por:

$$G_3 = \{A_{C4}, G_2\} = \{A_{C4}, M_{T2}, M_{MD1}, M_{T2}\}_{SC}$$

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



Figura 4.16 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 3

Note en la figura anterior que:

- $T_{pU} = T_{IDA}'(A_{C4}) + T_{IDA}'(M_{T2}) + T_{IDA}(M_{MD1}) + T_{IDA}(M_{T2})$   
o, equivalentemente:  
 $T_{pU} = T_{13-12}' + T_{14,13}' + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{13',14}'$
- $T_{IDA}'(A_{C4}) = 1 \text{ s}$
- $T_{IDA}'(A_{C4}) + T_{IDA}'(M_{T2}) + T_{IDA}(M_{T2}) = 32 \text{ s}$
- Las proporciones usadas fueron las siguientes:  
 $P_1 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(A_{C4})$ ;  $P_2 = 15 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(M_{T2})$ ;  $P_3 = 16 \text{ s}$  para  $T_{IDA}(M_{T2})$
- $T_{12,13}' \leq T_{pU} - T_{13,12}'$
- El dispositivo transportador giratorio  $M_{T2}$  se considera de ida "pura"

Se considerará el tiempo de vuelta siguiente:  $T_{12,13}' = 2 \text{ s}$ . Por tanto,  $A_{C4}$  opera a ciclo intermitente.

9. El grupo 4 está compuesto por:

$$G_4 = \{G_3, A_{C4}\} = \{A_{C4}, M_{T2}, M_{MD1}, M_{T2}, A_{C4}\} \text{ SD}$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 4:



Figura 4.17 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 4

Note en la figura anterior que:

$$a) T_{pU} = T_{IDA}'(AC_4) + T_{IDA}'(MT_2) + T_{IDA}(M_{MD1}) + T_{IDA}'(MT_2) + T_{IDA}'(AC_4)$$

o, equivalentemente:

$$T_{pU} = T_{13-12}' + T_{14,13}' + T_{IDA}(M_{E12}) + T_{13',14}' + T_{15-13}'$$

$$b) T_{IDA}'(AC_4) = 1 \text{ s}$$

$$c) T_{IDA}'(AC_4) + T_{IDA}'(MT_2) + T_{IDA}(MT_2) + T_{IDA}'(AC_4) = 32 \text{ s}$$

d) Las proporciones usadas fueron las siguientes:

$$P_1 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(AC_4); P_2 = 15 \text{ s para } T_{IDA}'(MT_2); P_3 = 15 \text{ s para } T_{IDA}(MT_2); P_4 = 1 \text{ s para } T_{IDA}'(AC_4)$$

$$e) T_{12,13}' \leq T_{pU} - T_{13,12}'$$

$$f) T_{13',15}' \leq T_{pU} - T_{15,13}'$$

g) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T2}$  se considera de ida "pura"

10. El grupo 5 está compuesto por:

$$G_5 = \{G_4, TR_3\} = \{AC_4, MT_2, M_{MD1}, MT_2, AC_4, TR_3\} SE$$

La figura siguiente muestra la distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de las máquinas asociadas con el grupo 5:

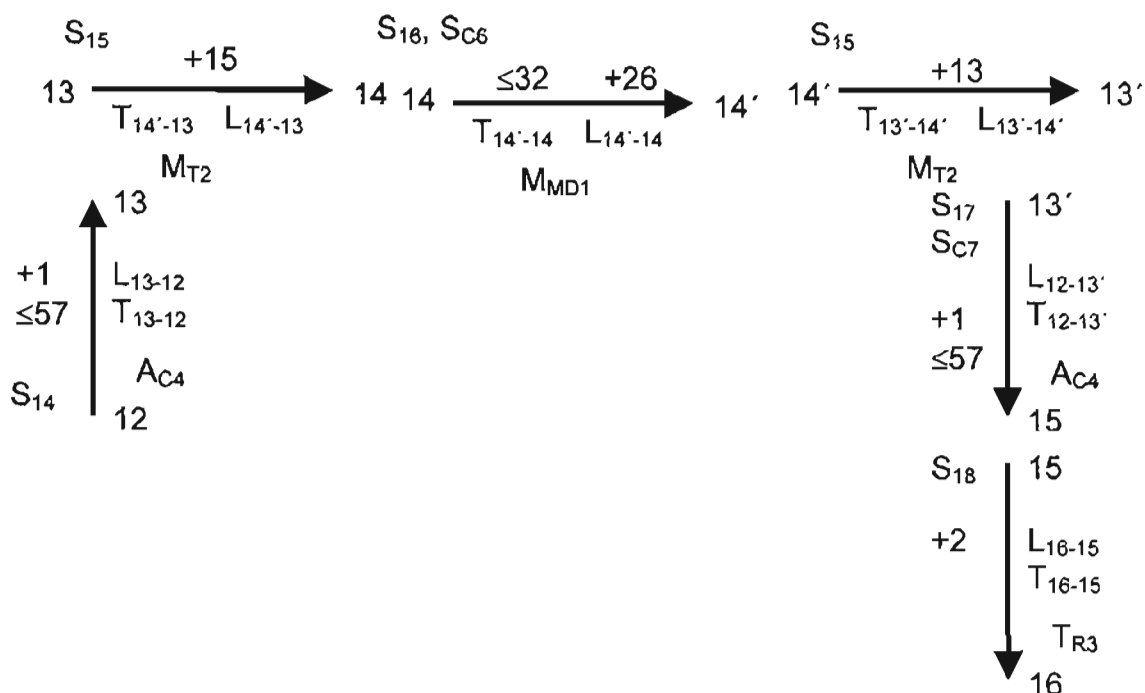


Figura 4.18 Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo 5

Note en la figura anterior que:

a)  $T_{pU} = T_{IDA}'(AC_4) + T_{IDA}'(MT_2) + T_{IDA}'(MMD_1) + T_{IDA}'(MT_2) + T_{IDA}'(AC_4) + T_{IDA}'(TR_3)$  o, equivalentemente:

$$T_{pU} = T_{13-12}' + T_{14,13}' + T_{IDA}'(M_{E12}) + T_{13',14'}' + T_{15-13}' + T_{16-15}'$$

b)  $T_{IDA}'(TR_3) = 2 \text{ s}$

c)  $T_{IDA}'(AC_4) + T_{IDA}'(MT_2) + T_{IDA}'(MT_2) + T_{IDA}'(AC_4) + T_{IDA}'(TR_3) = 32 \text{ s}$

d) Las proporciones usadas fueron las siguientes:

$P_1 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(AC_4)$ ;  $P_2 = 15 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(MT_2)$ ;  $P_3 = 13 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(MT_2)$ ;  $P_4 = 1 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(AC_4)$ ;  $P_5 = 2 \text{ s}$  para  $T_{IDA}'(TR_3)$

e)  $T_{12,13}' \leq T_{pU} - T_{13,12}'$

f)  $T_{13',15}' \leq T_{pU} - T_{15,13}'$

- g) El dispositivo transportador giratorio  $M_{T2}$  y el transportador de riel vibratorio  $T_{R3}$  se consideran de ida “pura”.

Se considerarán los tiempos de vuelta siguientes:  $T_{12,13} = 2$  s,  $T_{13,15} = 2$  s. Por tanto,  $AC_4$  opera a ciclo intermitente. Además, el módulo de embobinado ha sido sincronizado a  $T_{pU}$  y dicha sincronización es gobernada por el sistema de sensado  $S_E$ . La tabla siguiente sintetiza los resultados de la sincronización local en el módulo de embobinado (vista en el Capítulo 3), módulo de soldadura y módulo de moldeo. Con los resultados presentados en la tabla 4.3 se sincronizará, globalmente, en [21], dos módulos de la línea de producción MIDCOM INC.

MODULO DE EMBOBINADO						
Máquinas	Tiempos		Tipo de Ciclo	Tiempo de Espera		Sensores
	Ida	Vuelta		Ida	Vuelta	
$TR_1$	$T_{2,1} : + 2$	0	Ida Pura	+ 56	0	$S_1$
$AC_1$	$T_{3,2} : + 1$	$T_{2,3} : -1$	Intermitente	0	-56	$S_2$
$TB_1$	$T_{4,3; 8,7} : + 3$	$T_{3,8} : -2$	Intermitente	+ 53	0	$S_3, S_8, S_8'$
$AC_2$	$T_{4,4; 4,4'; 6,4; 7,6; 6,7} : + 4$	$T_{4,7} : - 4$	Intermitente	+ 50	0	$S_4$
$MT_1$	$T_{5,4; 6,5} : + 3$	0	Ida Pura	+ 55	0	$S_5$
$ME_{12}$	$T_{5,5} : + 40$	0	Ida Pura	+ 18	0	$S_6, S_{C1}$
$ME_{11}$	$T_{6,6} : + 14$	0	Ida Pura	+ 44	0	$S_7, S_{C2}$
MODULO DE SOLDADURA						
$TB_1$	$T_{2,1} : + 0$	0	Continuo	0	0	$S_8$
$AC_3$	$T_{11,8} : + 48$	$T_{8,11} : -10$	Intermitente	0	0	$S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{C3}, S_{C4}, S_{C5}$
$TR_2$	$T_{12,11} : + 10$	0	Ida Pura	+ 48	0	$S_{13}$
MODULO DE MOLDEO						
$AC_4$	$T_{13,12; 15,13'} : + 2$	$T_{13,12; 15,13'} : - 4$	Intermitente	0	-52	$S_{14}, S_{17}, S_{C7}$
$M_{T2}$	$T_{5,4; 6,5} : + 28$	0	Ida pura	+30	0	$S_{15}$
$M_{MD1}$	$T_{14',14} : + 26$	$T_{14,14'} : + 32$	Continuo	0	0	$S_{16}, S_{C6}$
$T_{R3}$	$T_{16,15} : + 2$	0	Ida pura	+56	0	$S_{18}$

Tabla 4.3 Datos para realizar el proceso de sincronización global

# Conclusiones

En este trabajo de tesis se cumplió el siguiente objetivo:

- Se utilizó el método del vórtice para sincronizar localmente, tres módulos de producción de la línea MIDCOM INC.

El método del vórtice es una herramienta útil para realizar el procedimiento de la sincronización local en sistemas productivos reales. Su simplicidad radica en la forma de generar, sistemáticamente, grupos de máquinas para sincronizar. Además, no interesa, a grandes rasgos, que tipo de línea de producción serial se requiera sincronizar, pues no interesan las operaciones de manufactura y transporte sino solamente los tiempos.

La desventaja de este método es que solamente puede ser empleado en líneas de tipo serial.

Los resultados y conclusiones de este trabajo de tesis se resumen en los puntos siguientes:

- La metodología, paso a paso, usada para sincronizar, localmente, el sistema productivo de la empresa MIDCOM INC., resultó ser eficiente y sistemática.
- El método del vórtice puede ser aplicado con facilidad para sincronizar, localmente, sistemas productivos seriales.
- La sincronización local, usando el vórtice, permite analizar y distribuir los tiempos de proceso sobre las máquinas que componen un módulo de producción. Además, la modularización toma un papel relevante en las etapas de control y sincronización, puesto que se analizan y controlan individualmente.



- El sistema de sensado requerido para realizar el proceso de la sincronización local, en general, ya está asociado con la línea. La metodología solo lo caracterizó; es decir, no se requieren nuevos sensores.
- El método del vórtice se puede usar para una línea de producción con F – módulos.
- El método del vórtice no puede ser aplicado si la diferencia temporal entre el TpU y el máximo tiempo fijo es pequeña.
- La diferencia temporal entre el TpU y el máximo tiempo fijo puede ser utilizado como criterio para modularizar una línea de producción.

Se puede concluir que el método del vórtice puede ser utilizado, además de propósitos didácticos, para aplicaciones industriales.

Cabe señalar que, los resultados obtenidos en este trabajo de tesis serán utilizados en otro trabajo para realizar el procedimiento de la sincronización global.

Futuros trabajos por desarrollar relacionados con esta tesis son:

- Sincronización global de la línea MIDCOM INC. usando el CBOR.
- Análisis de trayectoria.
- Sincronización local y global de sistemas productivos no seriales.

## Referencias

- [1] Jiménez E., Reyes L., Galindo F., García D., González I., Hito O., Mercado M. Sincronización local y global de sistemas productivos seriales. Informe interno de investigación (2003). Universidad La Salle Noroeste. ISBN 968-5844-00-3
- [2] 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.
- [3] Jiménez E., Reyes A., García D., González L., González I., Campos A., Barbosa. Sincronización local de una celda de manufactura didáctica usando en método del vórtice. SOMIM. 2003 Veracruz, Ver., México
- [4] Jiménez E., Reyes A., Tapia E., Peón R., Galindo F., Pérez A. Distribución de sensores sobre una línea de producción serial y sincronización usando el método del vórtice. SOMIM 2002, Monterrey, NL, México.
- [5] Jiménez, E., Reyes, L., Murillo I., Mercado M., Encinas González I., Portillo S. Representación formal de las transformaciones geométricas y de manufactura de un transformador eléctrico usado para la industria de las telecomunicaciones. SOMIM. 2003 Veracruz, Ver., México.
- [6] Navarro J. Flexibilidad de un sistema de manufactura tipo serial. (Por presentarse 2003). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [7] 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.
- [8] Jiménez E., Reyes A., González J., Mercado M., Pérez A., García T. Control de una línea de producción usando un código binario de procesos. SOMIM 2002, Monterrey, NL., México.

- [9] Duran, O. Batocchio, A. "Automatic PLC Software with a Nature Interfase" (1999). International Journal of Production Research. V37 n4 Marzo, p. 805-819.
- [10] Volgin, L. I. "Representing Functions of the Boolean Binary Algebra in the Complex Plane" (1996). Engineering Simulations. V13 n 4. P 537-550
- [11] Hornes, Gerhard E. Introducción al álgebra de Boole y a los dispositivos lógicos: auto enseñanza programada (1972). Paraninfo. Madrid, España.
- [12] Brown, Frank Markham. Boolean Reasoning: The logic of Boole equations (1990). Boston. Kluwer Academic.
- [13] Moscosa, Santillán M. Bondoux, C. Porte. "Development of a hybrid PLC-Based Control System Applied to a Monitored Fermentation Process" (1999). Laboratory Robotics & Automation. VII n4 , p. 197-206.
- [14] Ohman, Martin. Johansson, Stefan. Aizen, Karl-Erik. "Implementation Aspects of the PLC Standard IEC 1131-3" (1998). Control Engineering Practice. v6 n6 p.547-555.
- [15] Cohen M., Nagel E. Introducción a la lógica y al método científico: Lógica aplicada y método científico II. (1961). Harcour, Brace World Inc., Argentina.
- [16] Cohen M., Nagel E. Introducción a la lógica y al método científico: Lógica aplicada y método científico I. (1961). Harcour, Brace World Inc., Argentina.
- [17] Jiménez E., Reyes L., Ferrer L., Acosta F. (2003). Aplicaciones del método científico a problemas en la Ingeniería Mecánica. DEPMI UNAM. ISBN (en trámite)
- [18] Murillo I. Representación abstracta de las transformaciones geométricas de un transformador eléctrico usado en telecomunicaciones. (Por presentarse). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [19] Portillo S. Distribución y caracterización preliminar de maquinaria usando circunferencias de distribución de una celda de manufactura real. (Por presentarse). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.

- [20] Galindo G. Análisis, modelación y simulación de una trayectoria continua para la aplicación de soldadura en un transformador eléctrico. 2003. (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [21] Mercado M. Sincronización global de la línea MIDCOM usando un CBOR. (Por presentarse). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.