

01173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

SINCRONIZACIÓN GLOBAL DE LA LÍNEA MIDCOM  
INC. USANDO UN CÓDIGO BINARIO

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. MARCO FRANCISCO MERCADO ISLAVA



ASESOR: M. EN I. EUSEBIO JIMÉNEZ LÓPEZ

MÉXICO, D. F. CIUDAD UNIVERSITARIA

2005

m 345692



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

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: Marco Francisco  
Mercado Islava  
FECHA: 15 de Junio del 2005  
FIRMA: p.a. Ernesto Chera J.

Prólogo.....	viii
Resumen .....	x
Introducción .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>Definición del problema, restricciones, hipótesis y sistema de axiomas .....</b>	<b>14</b>
1.1 Definición del problema y restricciones .....	14
1.2 Hipótesis y sistema de axiomas básicos .....	15
1.3 Algunas consideraciones importantes relacionadas con el problema .....	15
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>Síntesis de los proyectos realizados a la empresa Midcom Inc .....</b>	<b>17</b>
2.1 Representación abstracta de las transformaciones geométricas de un transformador eléctrico utilizado en telecomunicaciones .....	18
2.2 Modelado por primitivas de los procesos y operaciones en la línea de producción de Midcom Inc. ....	25
2.3 Análisis de la distribución de planta de la línea Midcom Inc. usando ecuaciones de forma y circunferencias de distribución .....	30
2.4 Análisis, modelación y simulación de una trayectoria continua para la aplicación de soldadura en un transformador eléctrico .....	39
2.5 Modelación cinemática y de trayectoria de un robot cartesiano para la aplicación de la operación de soldadura en la línea Midcom Inc. ....	43
2.6 Sincronización local de la línea Midcom Inc. usando el método de vórtice.....	46

## **CAPÍTULO 3**

### **Sincronización Local de los módulos de embobinado y**

<b>soldadura</b> .....	47
3.1 El vórtice y algunos conceptos importantes .....	47
3.2 Descripción de los datos conocidos de la línea Midcom Inc. ....	51
3.3 Resultados del procedimiento de sincronización del módulo de embobinado .....	58
3.4 Resultados del procedimiento de sincronización del módulo de soldadura .....	61

## **CAPÍTULO 4**

### **El CBOR y la sincronización global**.....

4.1 Ciclos modulares, tiempo total de ida y algunas consideraciones sobre el supermódulo.....	63
4.2 Condicionantes de control.....	68
4.3 El código binario operacional referencial (CBOR).....	70
4.3.1 Procedimiento de llenado del CBOR.....	74
4.3.2 El CBOR del supermódulo .....	77
4.3.3 El CBOR completo .....	78
4.3.4 Condicionamientos de control, el sistema de control y CBOR funcional.....	79
4.3.5 Interpretación del CBOR funcional, diagrama escalera y algunas consideraciones sobre los dominios proposicional y operacional ...	81
4.4 Ciclo de arranque y ciclo automático.....	85

## **CAPÍTULO 5**

### **El CBOR y el supermódulo de sincronización global del caso**

<b>de estudio</b> .....	89
5.1 Filas y columnas de referencia de la matriz tiempo-sensado.....	89
5.2 Filas y columnas de referencia de la matriz maquinaria-tiempo.....	90

5.3	Filas y columnas de referencia del CBOR.....	91
5.4	Llenado de la fila de tiempos de proceso.....	91
5.5	Inclusión de los cTki de ida en el CBOR .....	92
5.6	Llenado de las matrices $M_{T-S}$ y $M_{M-T}$ para líneas de control de ida y tiempos de ida.....	94
5.7	Acoplamiento de las submatrices del CBOR para el recorrido de ida.....	97
5.8	Llenado de los tiempos de vuelta, extensión del CBOR, inserción de las líneas de control de sensado bandera y tiempos especiales.....	100
5.9	Representación y caracterización del supermódulo de sincronización global .....	103
5.10	Caracterización del supermódulo.....	108
5.11	CBOR completo .....	110
5.12	Condicionamientos de control y CBOR funcional.....	113
	5.12.1 Diseño del sistema de control operacional.....	116
	5.12.2 CBOR funcional y diagrama escalera.....	122
	<b>Conclusiones</b> .....	127
	<b>Referencias bibliográficas</b> .....	129

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1.1	Configuración de un vórtice.....	4
Figura No. 2.1	Transformador para telecomunicaciones (PT) y materia prima base.....	19
Figura No. 2.2	Operaciones de manufactura .....	20
Figura No. 2.3	Representación geométrica de la ecuación de forma.....	24
Figura No. 2.4	Representación geométrica de la ecuación de volúmenes .....	30
Figura No. 2.5	Representación gráfica de los componentes $PT_1$ , $PT_2$ , $PT_3$ , $PT_4$ y $PT_5$ .....	31
Figura No. 2.6	Distribución de planta.....	31
Figura No. 2.7	Puntos PO, PES y LFM .....	34
Figura No. 2.8	Distribución de circunferencias.....	35
Figura No. 2.9	Distribución de máquinas teóricas.....	36
Figura No. 2.10	Distribución de circunferencias en la línea Midcom Inc. ....	36
Figura No. 2.11	Lugares geométricos de la trayectoria.....	40
Figura No. 2.12	Perfiles de trayectoria.....	40
Figura No. 2.13	Perfiles de trayectoria sin discontinuidades.....	41
Figura No. 2.14	Salidas gráficas de las trayectorias .....	43
Figura No. 2.15	Máquina soldadora .....	43
Figura No. 2.16	Salida gráfica del robot cartesiano .....	44
Figura No. 2.17	Salida gráfica del robot cartesiano sobre la operación de recubrimiento por flux. ....	44
Figura No. 2.18	Salida gráfica del robot cartesiano sobre la operación de soldadura.....	45
Figura No. 2.19	Salida gráfica del robot cartesiano en el punto de descarga ...	45
Figura No. 3.1	Representación geométrica de un vórtice .....	51
Figura No. 3.2	Distribución de planta.....	51
Figura No. 3.3	Distribución del sensado de ida.....	54
Figura No. 3.4	Lugares geométricos de los ciclos operacionales del módulo de embobinado-empapelado.....	56

Figura No. 3.5	Lugares geométricos de los ciclos operacionales de los módulos de soldadura y montaje.....	58
Figura No. 3.6	Vértice antecesor del módulo de embobinado y sistema de sensado .....	59
Figura No. 3.7	Distribución de tiempos sobre las máquinas del grupo .....	60
Figura No. 3.8	Vértice de sincronización antecesor del módulo de soldadura y sistema de sensado .....	61
Figura No. 3.9	Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 2 .....	62
Figura No. 4.1	Diagrama de contactos.....	70

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1.1	Matriz tiempo-sensado .....	6
Tabla No. 1.2	Matriz maquinaria-tiempo .....	7
Tabla No. 1.3	Matriz de referencia del CBOR.....	7
Tabla No. 2.1	Representación por eventos de una sucesión de operaciones .....	21
Tabla No. 2.2	Operaciones booleanos.....	22
Tabla No. 2.3	El dominio ( $P^M$ ) en términos geométricos.....	26
Tabla No. 2.4	Primitivas de las materias primas .....	27
Tabla No. 2.5	Primitiva del producto preparado.....	27
Tabla No. 2.6	Primitiva de la operación .....	27
Tabla No. 2.7	Primitiva del subproducto .....	28
Tabla No. 2.8	Secuencia de operaciones .....	28
Tabla No. 2.9	El dominio ( $V^M$ ).....	29
Tabla No. 2.10	Descripción de la maquinaria de Midcom Inc. ....	34
Tabla No. 2.11	Caracterización de maquinaria teórica con maquinaria Midcom Inc. ....	39
Tabla No. 3.1	Descripción de los elementos de trabajo.....	52
Tabla No. 3.2	Descripción del sensado de ida.....	55
Tabla No. 3.3	Resultados finales del proceso de sincronización .....	61
Tabla No. 3.4	Resultados finales del proceso de sincronización en el módulo de soldadura .....	62
Tabla No. 4.1	Disyunción .....	68
Tabla No. 4.2	Conjunción .....	68
Tabla No. 4.3	Mod (2).....	68
Tabla No. 4.4	Negación .....	68
Tabla No. 4.5	Representación de $A^1$ de una ecuación de estado.....	69
Tabla No. 4.6	Ejemplo de una matriz tiempo-sensado .....	72
Tabla No. 4.7	Ejemplo de una matriz maquinaria-tiempo .....	73
Tabla No. 4.8	El CBOR, representación de referencia .....	73

Tabla No. 5.1	Fila y columna de referencia de $M_{T-S}$ .....	90
Tabla No. 5.2	Filas y columnas de referencia de la matriz $M_{M-T}$ .....	90
Tabla No. 5.3	Filas y columnas de referencia del CBOR.....	91
Tabla No. 5.4	Columna de los tiempos de proceso .....	92
Tabla No. 5.5	$cT_{ki}$ de ida sobre el CBOR .....	94
Tabla No. 5.6	Casillas de relación entre líneas de control y sensores de ida.....	96
Tabla No. 5.7	Distribución de los tiempos de ida sobre la matriz $M_{M-T}$ incluyendo los $cT_{ki}$ de ida .....	97
Tabla No. 5.8	El CBOR de ida .....	100
Tabla No. 5.9	Distribución de los tiempos de vuelta del CBOR.....	101
Tabla No. 5.10	Líneas de control del sensado bandera.....	102
Tabla No. 5.11	El CBOR del módulo de embobinado.....	104
Tabla No. 5.12	El CBOR del módulo de soldadura.....	105
Tabla No. 5.13	Superposición de las líneas de control del módulo de embobinado sobre el módulo de soldadura.....	107
Tabla No. 5.14	Distribución de los tiempos de ida del módulo de embobinado sobre el módulo de soldadura.....	108
Tabla No. 5.15	El CBOR completo .....	111
Tabla No. 5.16	CBOR funcional.....	126

# PRÓLOGO

Este trabajo de tesis tiene el propósito de generar conocimiento escrito para las futuras generaciones de la maestría de ingeniería mecánica y campos afines interesados en los procedimientos de sincronización y control de los sistemas productivos.

Recientemente, se han desarrollado métodos paso a paso orientados a simplificar los procedimientos de la sincronización local y global de los sistemas productivos. El método del vórtice y el esquema operacional CBOR (Código Binario Operacional Referencial) han sido desarrollados con el propósito de auxiliar a la planeación de procesos, específicamente a la planeación operacional para corregir problemas de control y sincronización en las líneas de producción.

Las técnicas mencionadas anteriormente, han sido probadas en el laboratorio, usando equipo didáctico. El objetivo de esta tesis es aplicar el método del CBOR para analizar y modelar un problema de sincronización global relacionado con una línea de producción de la empresa Midcom Inc.

De hecho, con la información proporcionada por la empresa ha sido posible estudiar, académicamente, los siguientes 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 desarrolla el proyecto no. 6 y se basa en los resultados del proyecto 5. De hecho una parte de esta tesis muestra un resumen de los proyectos mencionados anteriormente.

Es importante mencionar que, la industria requiere del apoyo continuo y directo de las universidades y centros de investigación para solución de problemas. Por tanto, el uso del CBOR para solución de un problema real tiene como principal objetivo fortalecer el vínculo empresa-universidad mostrando que las herramientas desarrolladas por los investigadores pueden ser utilizadas en la industria.

Finalmente, se agradece a la empresa Midcom Inc. su apoyo para realizar este trabajo de tesis y a todas aquellas personas que contribuyeron con su crítica al mejoramiento del trabajo.

# RESUMEN

En este trabajo de tesis se aplica un método para sincronizar globalmente dos módulos de producción. Dichos módulos forman parte de una línea de producción perteneciente a la empresa Midcom Inc. Fue construido un esquema operacional denominado CBOR (Código Binario Operacional Referencial) con el cual fue posible diseñar el sistema de control para la sincronización global. Se incluyó un sistema de sensado con el cual fue posible controlar las operaciones de la maquinaria.

**Palabras clave:** PLC, sincronización, control, manufactura.

# INTRODUCCIÓN

A través de este trabajo de tesis se intentara cumplir con los siguientes objetivos:

- Sincronizar globalmente un sistema de dos módulos de la línea Midcom Inc., usando el método Código Binario Operacional Referencial (CBOR).
- Describir, en términos generales, los modelos de manufactura realizados a la línea Midcom Inc.
- Generar el sistema de control del sistema productivo.

## 1.1 El motivo de la investigación

Lo que motiva a realizar este trabajo de tesis se sintetiza de la manera siguiente:

*“Recientemente, se ha desarrollado un esquema operacional llamado Código Binario Operacional Referencial (CBOR), el cual ha sido utilizado para sincronizar, globalmente, sistemas de manufactura didácticos” [1,2]. Lo que se quiere investigar es si dicho esquema puede ser utilizado para sincronizar, globalmente, sistemas productivos reales, en este caso, una línea de producción de la empresa Midcom Inc [3,4,5,6]. localizada en Cd. Obregón Sonora.*

*Lo que llama la atención del CBOR es que, se puede aplicar en cualesquier sistema productivo automatizado o semiautomatizado, e inclusive, en un sistema manual [9].*

*Por otro lado, también se requiere comprobar que los resultados del procedimiento de la sincronización local [6] usando una técnica denominada Vórtice [1] son útiles para el procedimiento de la sincronización global.*

*Cabe mencionar que, actualmente, la línea Midcom Inc tiene problemas de sincronización tanto en su maquinaria particular como en sus módulos, lo cual genera retrasos en la producción y una ineficiente operación del equipo. Por ello, es preciso conocer si la técnica del CBOR se puede aplicar para, cuando menos, modelar el problema de la sincronización”.*

## **1.2 El Procedimiento de la sincronización**

La sincronización de operaciones y procesos en líneas de producción, es un procedimiento de distribución de tiempos controlado por el volumen de producción [1,2]. Dicha distribución se realiza sobre las rutas de trabajo de la maquinaria. La sincronización se divide en:

- 1) Local
- 2) Global

La sincronización local se encarga de sincronizar módulos de producción uno a uno o, dicho de otra forma, de manera independiente. Este tipo de sincronización se realiza usando la técnica del vórtice [1,2,7,8].

Por otro lado, la sincronización global se encarga de que los tiempos de proceso sean distribuidos y controlados en forma global, es decir, considerando a la vez todos los módulos que componen una línea de producción bajo la restricción del tiempo de producción unitario (TpU) derivado del volumen de producción y de la jornada de trabajo [1,2,9,10].

Este tipo de sincronización se puede realizar usando el Código Binario Operacional Referencial [1,2]. La sincronización global no solo enmarca una distribución de tiempo totales en un sistema productivo, sino que además, esta relacionada con el sistema de control operativo de las máquinas, módulos y líneas de producción. El hecho es, pues, que al relacionarse la sincronización

global con el sistema de control, se requiere de controlar en tiempo y por señales, máquinas, piezas y módulos, y, por tanto, el CBOR es una técnica que facilita las complejas tareas de la sincronización y el control [1].

### **1.3 Relaciones entre la sincronización local y global**

Antes de realizar el procedimiento de la sincronización global, es necesario haber realizado el procedimiento de la sincronización local, es decir, módulo a módulo [1]. De hecho, se infiere que la sincronización local también implica la sincronización máquina a máquina, grupos de máquinas con grupos de máquinas.

Es importante mencionar que, el procedimiento de sincronización local no requiere del diseño del sistema de control, en primera instancia. Por otro lado, solo es requerido un sistema de sensado llamado de ida, que consiste en una distribución de sensores principales y de completud [1,6,8]. Este sistema solo garantiza que una pieza puede recorrer un módulo de producción al activar todas las máquinas una a una.

Por otro lado, tal y como su nombre lo indica, la sincronización local es un procedimiento de distribución de tiempos y a la vez, requiere de un sistema de sensado [8].

La sincronización global es también una distribución de tiempos y está asociada con el sistema de control el cual también requiere de un sistema de sensado. Por tanto, las relaciones entre ambas sincronizaciones, es decir, la local y la global son:

- 1) Por el sistema de sensado de ida
- 2) Por los tiempos de procesos
- 3) Por el TpU

## 1.4 El método del vórtice para sincronización local

Para realizar el procedimiento de la sincronización local ha sido utilizada una técnica geométrica llamada vórtice [1,2,7,8]. Con dicha técnica se puede agrupar, sistemáticamente, máquinas en un módulo de producción. Cada máquina y los grupos formados se sincroniza individualmente a  $TpU$  bajo la distribución de tiempos sobre los lugares geométricos o rutas de trabajo. En primer lugar se sincroniza la máquina de referencia del módulo y finalmente el grupo que contenga todas las máquinas que conforma el módulo. La figura 1.1 muestra una configuración de un vórtice:

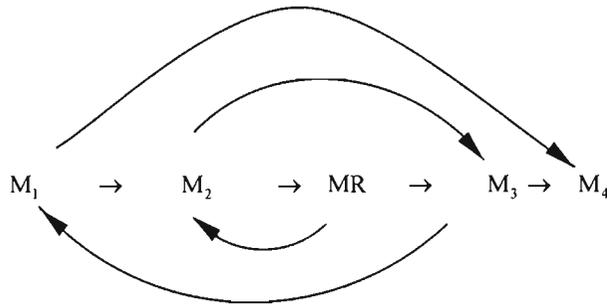


Figura 1.1 Configuración de un vórtice

De acuerdo con la figura 1.1, la máquina MR es la referencial. Generalmente esta máquina es de operación principal y ocupa el mayor tiempo fijo. Las máquinas  $M_1$  y  $M_2$  son antecesoras a MR y  $M_3$  y  $M_4$  son sucesoras. Así, las máquinas del módulo se sincronizan de forma descendente:

- 1) Primero: la máquina MR
- 2) Segundo: el grupo 1: ( $M_2$ , MR)
- 3) Tercero: el grupo 2: ( $M_2$ , MR,  $M_3$ )
- 4) Cuarto: el grupo 3: ( $M_1$ ,  $M_2$ , MR,  $M_3$ )
- 5) Quinto: el grupo 4: ( $M_1$ ,  $M_2$ , MR,  $M_3$ ,  $M_4$ )

Cada máquina y cada grupo se sincroniza a TpU distribuyéndose los tiempos sobre las rutas de trabajo y cada activación de las máquinas es controlada por un sensor, en este caso, “de ida”[1,2,7,8].

Una vez sincronizado todo el grupo último (el que contiene todas las máquinas del módulo) se dice que se ha finalizado el procedimiento de sincronización local del módulo.

Es importante mencionar que, si una línea de producción está formada por más de un módulo, la sincronización local debe de realizarse en cada uno de los módulos. Los resultados de este proceso deben indicar:

- 1) El tiempo de ida y vuelta de cada máquina.
- 2) Los ciclos de trabajo, es decir, ciclo continuo (máquina sin detenerse) o a ciclo intermitente (máquina detenida al menos un tiempo en cada ciclo).
- 3) El sistema de sensado de ida y su relación con cada máquina.

Es importante indicar que el procedimiento de la sincronización local asociado con la línea de producción Midcom Inc fue realizado en otro trabajo [6]. En esta tesis solo se usarán los resultados de dicha sincronización.

## **1.5 Algunas consideraciones sobre el CBOR.**

Una vez realizado el procedimiento de la sincronización local en cada módulo que compone una línea de producción serial, es necesario utilizar esquemas operacionales que permitan representar, en primera instancia, los tiempos de la sincronización modular y el sistema de sensado de ida [1,2,10]. Dicho esquema debe de permitir que sean visibles, por medio de algún código, los ciclos operacionales de la maquinaria y las activaciones de los sensores de ida.

En este contexto, el Código Binario Operacional Referencial (CBOR) es una alternativa. El CBOR es un esquema, generado en código binario, sobre el cual se representan eventos que relacionan las activaciones de sensores y máquinas sobre la base de los tiempos de ciclo y el TpU [1]. El CBOR se forma por dos matrices:

- 1) Matriz Tiempo-Sensado
- 2) Matriz Maquinaria-Tiempo

Ambas matrices se relacionan en términos de los tiempos y sobre la base de las líneas de control relacionadas en las activaciones de sensores. Las tablas 1.1, 1.2 y 1.3 muestran la matriz tiempo-sensado, la matriz maquinaria-tiempo y el CBOR de referencia respectivamente:

<b>Matriz Tiempo - Sensado</b>								
	<b>Sensores</b>							
	<b>Sincronización (*)</b>							
	<b>Sensado de ida</b>				→	<b>Bandera</b>		
	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>
	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>
T <sub>0</sub>								
T <sub>1</sub>								
T <sub>2</sub>								
cTk <sub>1</sub>								
T <sub>3</sub>								
T <sub>3,4</sub>								
T <sub>4</sub>								
cTk <sub>2</sub>								

Tabla 1.1 Matriz tiempo-sensado

<b>Matriz Maquinaria - Tiempo</b>					
<b>Maquinaria</b>					
<b>Recorrido de ida</b> →					
Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</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>1</sub>
					T <sub>2</sub>
					cTk <sub>1</sub>
					T <sub>3</sub>
					T <sub>3,4</sub>
					T <sub>4</sub>
					cTk <sub>2</sub>

Tabla 1.2 Matriz maquinaria-tiempo

<b>Matriz de Código Binario Operacional Referencial</b>															
<b>Matriz Tiempo - Sensado</b>								<b>Matriz Maquinaria - Tiempo</b>							
<b>Sensores</b>								<b>Maquinaria</b>							
<b>Sincronización (*)</b> →								→							
<b>Sensado de ida</b>								<b>Bandera</b>		<b>Recorrido de ida</b>					
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>		

Tabla 1.3 Matriz de referencia del CBOR

La fila de los sensores “S<sub>i</sub>” se genera usando el sensado de ida y se completa con otro tipo de sensado denominado “bandera” [1,8]. Asimismo, sobre dicha fila se marcan sensores del tipo de “sincronización”. La fila que caracteriza la maquinaria de trabajo es generada usando el “recorrido de ida” y las columnas de los tiempos se llenan según las tablas de sincronización local.

La matriz es llenada, en forma sistemática, con símbolos apropiados con los cuales se identifican las activaciones de los sensores y de los ciclos operacionales de la maquinaria.

El CBOR se divide en tres partes [1]:

- 1) CBOR de módulos antecesores al final
- 2) CBOR del supermódulo, o sea, él último que conforma la línea de producción
- 3) CBOR de extensión

Cada parte del CBOR se explicitará en los capítulos de esta tesis. Por otro lado el CBOR, al ser una representación por “eventos”, se utiliza para generar el sistema de control total y el procedimiento de la sincronización global. Este último procedimiento se realiza en el CBOR que caracteriza el supermódulo [1].

Las líneas de control que identifican las activaciones de los elementos de sensado, sirven como elementos primitivos del diseño del control de los procesos. De hecho, el CBOR esta diseñado sobre la base de los dominios:

- 1) El operacional, y el
- 2) El proposicional

El dominio operacional esta constituido por las variables  $X_i$  y  $Y_i$ , las cuales se muestran en las tablas I.1, I.2 e I.3. Con dicho dominio se construyen los líneas principales de contacto de un PLC. El dominio proposicional esta formado por las líneas de los sensores y la relacionada con la maquinaria. Ambos dominios, en términos de control, son equivalentes [1].

Una vez diseñado el sistema de control, sus resultados se vacían sobre el CBOR en forma conjunta, disyuntiva o equivalentes. El CBOR así formado es llamado “CBOR funcional”. Si todas las activaciones de la maquinaria son tales que son representados en el CBOR funcional y relacionadas con el sistema de control, entonces del CBOR se obtiene el diagrama escalera final de un PLC [1].

El CBOR al ser construido sobre la base del TpU, relaciona el sistema de control con los tiempos de proceso de forma tal que la sincronización global se realiza en forma sistemática.

Se dice que un sistema productivo ha sido sincronizado globalmente si la diferencia temporal medida entre la primera y segunda pieza de trabajo manufacturadas sobre la línea de producción, es precisamente el TpU [1].

### **1.6 El supermódulo de sincronización global y ciclos de control.**

Una línea de producción tipo serial generalmente está compuesta de diversos módulos colocados en forma secuencial. En este tipo de distribución es fácil identificar el módulo inicial (en el cual se procesa la primera subparte) y el final (sobre el cual se genera la última subparte y que es equivalente al producto terminado) si dice que todos los módulos localizados, según el proceso, antes del módulo final, son antecesores [1].

Un supermódulo de sincronización global es el último módulo sobre el cual se “superponen” todos los módulos antecesores de tal forma que sus líneas de control finales son equivalentes o, dicho de otra forma, los últimos y primeros sensores de ida se activan en una sola línea de control [1].

El supermódulo de sincronización global debe ser generado una vez construido los CBOR de todos los módulos, posteriormente, el CBOR del último módulo se aísla y sobre él, se superponen las líneas de control de los módulos antecesores y los ciclos operativos de la maquinaria.

Es importante recordar que, cada módulo es sincronizado localmente a TpU y que [6], la superposición en el módulo final, el cual también es sincronizado a TpU, genera al final la sincronización global.

Los sensores colocados al final de la línea de control del supermódulo son, generalmente, de sincronización local y global. Estos sensores son de ida o, en su caso, de ser requerido, se asocian nuevos sensores [8].

Una vez generado el CBOR del supermódulo se requiere insertar los CBOR de los módulos antecesores y el CBOR de extensión, esto con el fin de tener todas las líneas de control con las cuales se construye el sistema de control del sistema productivo.

El diseño del sistema de control se basa en dos ciclos [1,2]:

- 1) El ciclo de ida o también llamado de arranque
- 2) El ciclo automático

El ciclo de ida es una sucesión de eventos de activación sensado-maquinaria en forma secuencial. Inicia en el primer sensor de ida y finaliza en el penúltimo sensor de ida. Este ciclo garantiza que una pieza de trabajo recorra, en términos de la maquinaria, toda la línea de producción [1,2].

El ciclo automático es una secuencia de activaciones sobre las líneas de control modulares. El ciclo total automático inicia por la activación del último sensor que indica que la pieza ha sido manufacturada, es decir, en la última línea de control. Esta activación, simultáneamente, inicia y finaliza todos los módulos antecesores incluyendo el supermódulo [1].

Bajo el ciclo automático y el ciclo de arranque, se diseña el sistema de control de una línea de producción. Nótese que al hablar del sistema de control, implica la constructibilidad de las ecuaciones de estado que caracterizan las líneas de contacto en un PLC.

El estudio de la sincronización de operaciones está tradicionalmente asociado con PLC (Programmable Logic Controller). Así, En [11] se utilizan redes neuronales para diseñar un sistema de control modular para líneas de producción. En [12,13] se utilizan métodos de diagnóstico para monitorear PLCs. En [14] se presenta un método para implementar y controlar la producción robotizada usando una técnica de señales sincronizadas. En [15] se utilizan esquemas para controlar los tiempos de procesamiento de sistemas de manufactura. Diversos esquemas de líneas de flujo son consideradas para minimizar los tiempos de proceso. En [16] se estudian algoritmos usando la teoría de Boole para programar PLC,s. Se construyen diferentes diagramas escalera para controlar diversas situaciones de control en la producción.

### **1.7 Descripción general de los proyectos en la celda Midcom Inc.**

Esta sección tiene como propósito fundamental, describir en breves términos los proyectos académicos realizados en la línea de producción Midcom Inc. Cabe señalar que, en el capítulo 2 de esta tesis se proporcionara mas información sobre dichos proyectos.

La línea Midcom Inc ha sido modelada según los siguientes proyectos [3,4,5,6]:

- 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 está relacionado con el último de los proyectos mencionados anteriormente.

Es preciso mencionar que, la realización de tales proyectos es un esfuerzo por fortalecer los vínculos empresa-universidad. Se trata, pues, de transferir los temas y modelos generados en las universidades, a los sistemas productivos de la industria de forma que dichos modelos sean útiles y al mismo tiempo, puedan ser probados y corregidos.

### **1.8 Resumen de la tesis y capitulado.**

En esta tesis, se utilizan los resultados de la sincronización local [6], para construir un Código Binario Operacional Referencial [1], el cual muestre los módulos operativos de dos módulos de producción sincronizados globalmente, de la línea Midcom Inc.

El procedimiento de la sincronización local fue realizado en otro trabajo [6]. En esta tesis se utilizará el método propuesto [1], para sincronizar globalmente la línea de producción. Cabe mencionar que los resultados de esta tesis no serán probados en el sistema productivo, pues para ello, se requerirá hacer modificaciones a la línea, lo cual, en estos momentos no es posible por encontrarse en producción activa.

Este trabajo está compuesto por 5 capítulos, los cuales se resumen a continuación:

En el capítulo 1 se define el problema por solucionar en esta tesis, sus restricciones, así como las hipótesis y un sistema de premisas básicas.

En el capítulo 2 se describen los proyectos realizados a la línea de producción Midcom Inc.

En el capítulo 3 se presenta un resumen del trabajo realizado en el procedimiento de la sincronización local. Esto con el fin de interpretar resultados los cuales serán utilizados en la sincronización global.

En el capítulo 4 se presentan los pasos del método en el cual se construye el CBOR y el diseño del sistema de control de la línea Midcom Inc.

En el capítulo 5 se aplican los pasos del método descrito en el capítulo 4 para generar el CBOR y el sistema de control de la línea Midcom Inc.

Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo de tesis

# CAPÍTULO 1

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA, RESTRICCIONES, HIPÓTESIS Y SISTEMA DE AXIOMAS

**Introducción.** En este capítulo se define el problema por solucionar en este trabajo, sus restricciones fundamentales, una hipótesis y un sistema de axiomas. El objetivo es enmarcar el problema usando los pasos generales del método científico [18,19].

### 1.1 Definición del problema y restricciones

En este trabajo de tesis se intentará solucionar el siguiente problema:

*“Conocidos los resultados de la sincronización local realizados sobre tres módulos de producción de la línea Midcom Inc [6], el TpU, el sistema de sensado de ida y los tiempos de proceso, encuentre:*

- 1) La sincronización global de dos módulos de producción.
- 2) El sistema de control operacional.

tal que las restricciones siguientes sean satisfechas:

- i) El TpU es discretizado unitariamente.
- ii) El sistema productivo es de tipo serial.
- iii) La distribución de módulos es secuencial y las operaciones en cada módulo son fijas y conocidas.
- iv) El volumen de producción es fijo y conocido.
- v) Los módulos por sincronizar son: Embobinado-soldadura”.

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

Para solucionar el problema formulado en la sección anterior se propone la siguiente hipótesis:

*“ Toda línea de producción que opere bajo volúmenes de producción controlados debe estar sincronizada local y globalmente. La maquinaria que integra la línea de producción debe operar sincronizadamente en términos unitarios, grupales, modulares y globales bajo un sistema de control operacional. El procedimiento de la sincronización y el diseño del sistema de control depende del método desarrollado en [1] del TpU y de los ciclos de arranque y automático”*

El sistema de premisas o axiomas básicas es el siguiente:

- 1) El método de modelación para sincronización global es el desarrollado en [1].
- 2) Para diseñar el sistema de control se considera que una pieza ha recorrido la línea de producción de tal forma que ha sido sensada por el último sensor de la línea.
- 3) Una línea de producción esta sincronizada globalmente si la diferencia temporal entre la primera y la segunda pieza manufacturada es el TpU.

## **1.3 Algunas consideraciones importantes relacionadas con el problema**

El problema por solucionar en este trabajo de tesis, consiste en aplicar un método para sincronizar globalmente, un sistema compuesto por tres módulos de producción [1]. En esta tesis sólo se sincronizarán, globalmente, dos módulos de producción de la celda Midcom Inc. Por tanto, el procedimiento de la sincronización global se remitirá única y exclusivamente a los pasos de la metodología.

Dicho método propone la construcción de un CBOR y el sistema de control relacionado con la sincronización global [1]. Así, una vez construido el CBOR y el sistema de control operacional, se infiere que el problema ha sido resuelto.

Por otro lado, el hecho de que la línea Midcom Inc. sea serial, implica la existencia de un supermódulo sobre el cual se realizará el procedimiento de la sincronización global [1].

También, si se fija una pieza de trabajo al final de la línea de producción, se infiere que el sistema está en ciclo automático total, y que, por tanto, el ciclo de arranque total ha finalizado. Por ello, el diseño del sistema de control depende de ambos ciclos.

Es importante señalar que, para que una línea de producción esté sincronizada globalmente, el sistema de control debe garantizar que la diferencia temporal entre la primera y la segunda pieza de trabajo o entre la segunda y la tercera y, así sucesivamente, debe ser precisamente el  $TpU$ . De otro modo el sistema no opera sincronizadamente o, en su caso, el procedimiento de la sincronización local no fue realizado satisfactoriamente.

Note además que, el hecho de proponer como premisa el uso del método implica que si un solo paso ha de ser modificado durante el desarrollo del problema, se concluirá que la hipótesis no es la apropiada para la forma en que fue planteado el problema, pero esto no implica que la tesis sea modificada o que este mal hecha. Por el contrario, se trata de probar un método y si fuera el caso de complementarlo, entonces, el trabajo de tesis cumple con los requisitos para los que fue propuesto.

## CAPÍTULO 2

### SÍNTESIS DE LOS PROYECTOS REALIZADOS A LA EMPRESA MIDCOM INC

**Introducción.** En este capítulo se presenta una síntesis de los proyectos académicos realizados a la línea de producción perteneciente a la Empresa MIDCOM INC localizada en Cd. Obregón Sonora. El objetivo es describir cada uno de dichos proyectos y situar el trabajo de tesis aquí presentado. Tales proyectos son [3,4,5,6,17,20]:

- 1) Representación abstracta de las transformaciones geométricas de un transformador eléctrico utilizado en telecomunicaciones.
- 2) Modelado por primitivas de los procesos y operaciones en la línea de producción de Midcom Inc.
- 3) Análisis de la distribución de planta de la línea Midcom Inc. usando ecuaciones de forma y circunferencias de distribución.
- 4) Análisis, modelación y simulación de una trayectoria continua para la aplicación de soldadura en un transformador eléctrico.
- 5) Modelación cinemática y de trayectoria de un robot cartesiano para la aplicación de la operación de soldadura en la línea Midcom Inc.
- 6) Sincronización local de la línea Midcom Inc. usando el método de vórtice.

- 7) Sincronización global de la línea Midcom Inc. usando un código binario.

## 2.1 Representación abstracta de las transformaciones geométricas de un transformador eléctrico utilizado en telecomunicaciones

El objetivo con este proyecto es obtener una representación abstracta de las transformaciones geométricas y de manufactura del componente manufacturado en la línea Midcom Inc. Tal representación es llamada "Ecuación de Forma" (EF) [3]. Formalmente:

*"Una EF es una representación abstracta de las transformaciones geométricas de materias primas en productos terminados. Los elementos primitivos que integra una EF son sólidos regularizados y operaciones booleanas, ambos parametrizados en términos de manufactura. El orden de las transformaciones está dado por una sucesión admisible de operaciones perfectas de manufactura."*

De acuerdo con la definición anterior, una EF es una representación abstracta que utiliza niveles mínimos de información geométrica y de manufactura para representar las operaciones y procesos relacionados con componentes. Una EF tiene un dominio de manufactura asociado ( $B^M$ ) compuesto por cinco subfamilias. Para el caso del componente manufacturado en la línea Midcom Inc. se tiene el siguiente dominio [3,21]:

- 1)  $B_{MP} = \{ A, B'_1, B'_{SUB1}, B'_{SUB2}, B'_{SUB3}, B'_{SUB4}, B'_{SUB5}, B'_{SUB6}, B'_{SUB7}, B'_{SUB8}, B'_{SUB9}, B'_{SUB10} \}$
- 2)  $B_{PP} = \{ B_{PP1}, B_{PP2}, B_{PP3}, B_{PP4}, B_{PP5}, B_{PP6}, B_{PP7}, B_{PP8}, B_{SUB9}, B_{SUB10}, B_{SUB11} \}$

3)  $B_{MAE} = \{ B_1, C_1, D_1, S_1, F_1, M, B_2, C_2, D_2, S_2, F_2 \}$

4)  $B_{SUB} = \{ B_{SUB1}, B_{SUB2}, B_{SUB3}, B_{SUB4}, B_{SUB5}, B_{SUB6}, B_{SUB7}, B_{SUB8}, B_{SUB9}, B_{SUB10}, B_{SUB11} \}$

5)  $B_{PT} = \{ PT \}$

El componente manufacturado y la materia prima base se muestran en la figura 2.1:

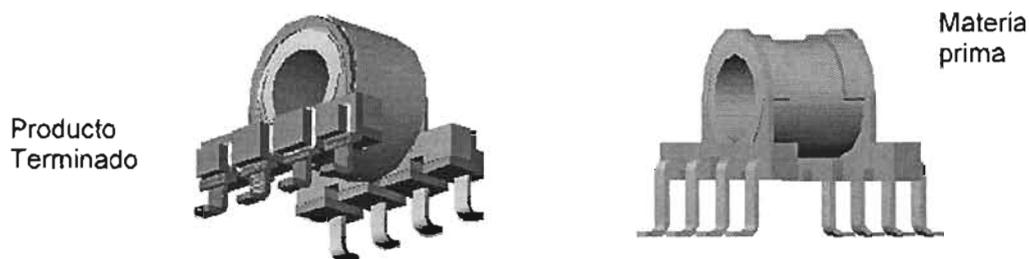


Figura 2.1. Transformador para telecomunicaciones (PT) y materia prima base

La información geométrica y de manufactura, así como el número de elementos que integran las familias del dominio, se pueden obtener de la interpretación de los planos de fabricación, de cálculos y tablas de representación de manufactura.

Cada elemento del  $B^M$  es un sólido regularizado el cual idealiza una materia prima, un producto preparado, una subparte, un sólido agregado o extraído o un producto finalizado [3,21].

Por otro lado, las operaciones principales de manufactura son obtenidas de los planos de fabricación y las operaciones complementarias de cálculos y/o tablas. De hecho, con la caracterización de las operaciones se obtiene el número de elementos de las familias  $B_{MAE}$  y  $B_{SUB}$ .

Cada operación y suboperación de manufactura es representada por un operador booleano parametrizado y el conjunto de operaciones relacionadas al procesamiento del componente, se le conoce como "conjunto de operaciones perfectas". En dicho conjunto se pueden establecer diferentes órdenes de operaciones y, mediante dichos órdenes, se establece la sucesión de operaciones que será utilizada para construir una EF [3,21].

Las operaciones principales de manufactura y la secuencia de operaciones se muestran en la figura y tabla siguientes:

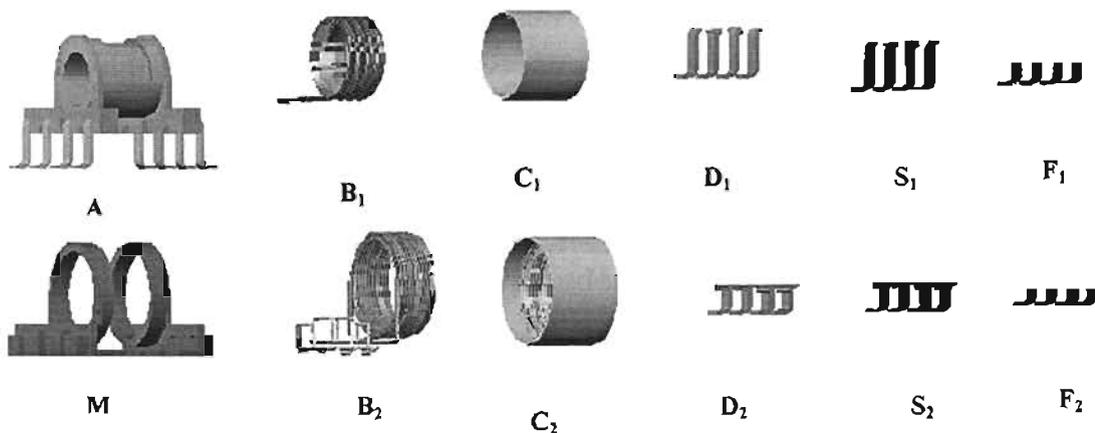


Figura 2.2 Operaciones de manufactura

De la figura anterior se tiene que

- A : Materia prima base.
- B<sub>1</sub> : Cuerpo del primer devanado (bobina 1).
- C<sub>1</sub> : Cuerpo del primer encintado.
- D<sub>1</sub> : Cuerpo del primer flux de soldadura.
- S<sub>1</sub> : Soldadura 1.
- F<sub>1</sub> : Cuerpo del excedente de la soldadura.

- M : Pieza moldeada en plástico.
- B<sub>2</sub> : Cuerpo del segundo devanado (bobina 2).
- C<sub>2</sub> : Cuerpo del segundo encintado.
- D<sub>2</sub> : Cuerpo del segundo flux de soldadura.
- S<sub>2</sub> : Soldadura 2.
- F<sub>2</sub> : Cuerpo del excedente de la soldadura.

SO <sup>F102,3,4,5,6,7,8,9,10,11</sup>											
Oper Ev.	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>4</sub>	O <sub>5</sub>	O <sub>6</sub>	O <sub>7</sub>	O <sub>8</sub>	O <sub>9</sub>	O <sub>10</sub>	O <sub>11</sub>
Ev <sub>1</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ev <sub>2</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ev <sub>3</sub>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Ev <sub>4</sub>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Ev <sub>5</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Ev <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Ev <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Ev <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Ev <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Ev <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ev <sub>11</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ev <sub>G</sub>	G <sub>1</sub> <sup>i</sup>	G <sub>1</sub> <sup>ii</sup>	G <sub>1</sub> <sup>iii</sup>	G <sub>1</sub> <sup>iv</sup>	G <sub>1</sub> <sup>v</sup>	G <sub>1</sub> <sup>vi</sup>	G <sub>1</sub> <sup>vii</sup>	G <sub>1</sub> <sup>viii</sup>	G <sub>1</sub> <sup>ix</sup>	G <sub>1</sub> <sup>x</sup>	G <sub>1</sub> <sup>xi</sup>

Tabla 2.1 Representación por eventos de una sucesión de operaciones

Por otro lado, los operadores booleanos utilizados se describen en la tabla 2.2 [3,21]:

Operación	Operador booleano	Elemento geométrico de B <sub>MAR</sub>	Nomenclatura
O <sub>1</sub> (Montaje de bobina I)	M.B ∪ Unión de montaje por embobinado		B <sub>1</sub>

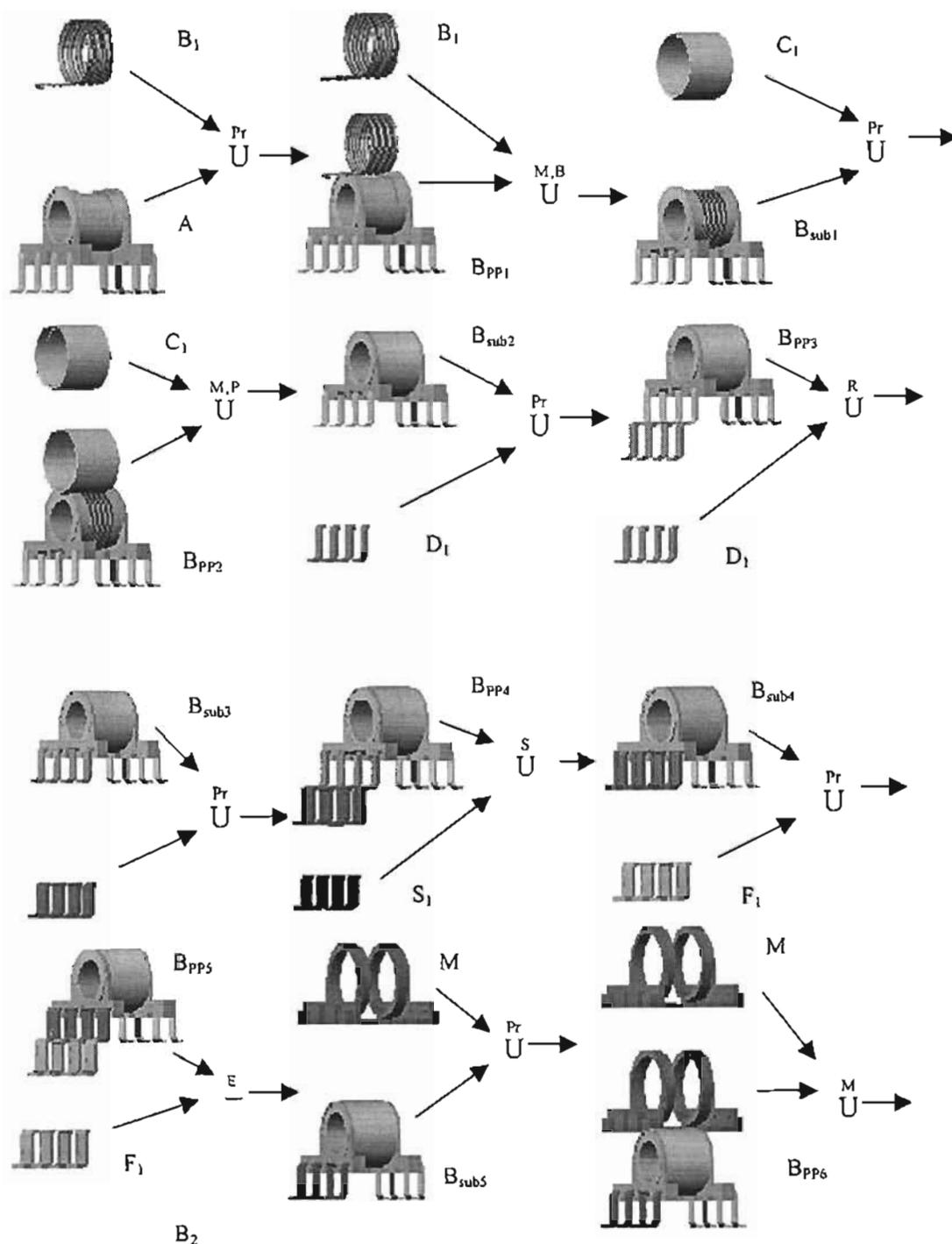
O <sub>1</sub> (Montaje de empapelado 1)	M,P ∪ Unión de montaje por empapelado		C <sub>1</sub>
O <sub>3</sub> (Recubrimient o de flux 1)	R ∪ Unión por recubrimient o		D <sub>1</sub>
O <sub>4</sub> (Recubrimient o por soldadura de estaño 1)	S ∪ Unión por soldadura		S <sub>1</sub>
O <sub>5</sub> (Excedente de soldadura 1)	E — Diferencia de excedentes		F <sub>1</sub>
O <sub>6</sub> (Montaje de pieza)	M ∪ Unión por montaje		M
O <sub>7</sub> (Montaje de bobina 2)	M,B ∪ Unión de montaje por embobinado		B <sub>2</sub>
O <sub>8</sub> (Montaje de empapelado 2)	M,P ∪ Unión de montaje por empapelado		C <sub>2</sub>
O <sub>9</sub> (Recubrimient o de flux 2)	R ∪ Unión por recubrimient o		D <sub>2</sub>
O <sub>10</sub> (Recubrimient o por soldadura de estaño 2)	S ∪ Unión por soldadura		S <sub>2</sub>
O <sub>11</sub> (Excedente de soldadura 1)	E — Diferencia de excedentes		F <sub>2</sub>

Tabla 2.2 Operadores booleanos

Así, la ecuación de forma asociada con el componente mostrado en la figura 2.1 es:

$$PT \approx B_{SUB2} = ((((((((((((((((((((((((((A \overset{Pr}{\cup} B_1) \overset{M,B}{\cup} B_1) \overset{Pr}{\cup} C_1) \overset{M,P}{\cup} C_1) \overset{Pr}{\cup} D_1) \overset{R}{\cup} D_1) \overset{Pr}{\cup} S_1) \overset{S}{\cup} S_1) \overset{Pr}{\cup} F_1) \overset{E}{-} F_1) \overset{Pr}{\cup} M) \overset{M}{\cup} M) \overset{Pr}{\cup} B_2) \overset{M,B}{\cup} B_2) \overset{Pr}{\cup} C_2) \overset{M,P}{\cup} C_2) \overset{Pr}{\cup} D_2) \overset{R}{\cup} D_2) \overset{Pr}{\cup} S_2) \overset{S}{\cup} S_2) \overset{Pr}{\cup} F_2) \overset{E}{-} F_2)$$

Dicha expresión se encuentra al expandir la última subparte y está relacionada con la secuencia de operaciones descrita en la tabla 2.1[3,21]. La representación geométrica de la ecuación de forma se muestra en la figura 2.3:



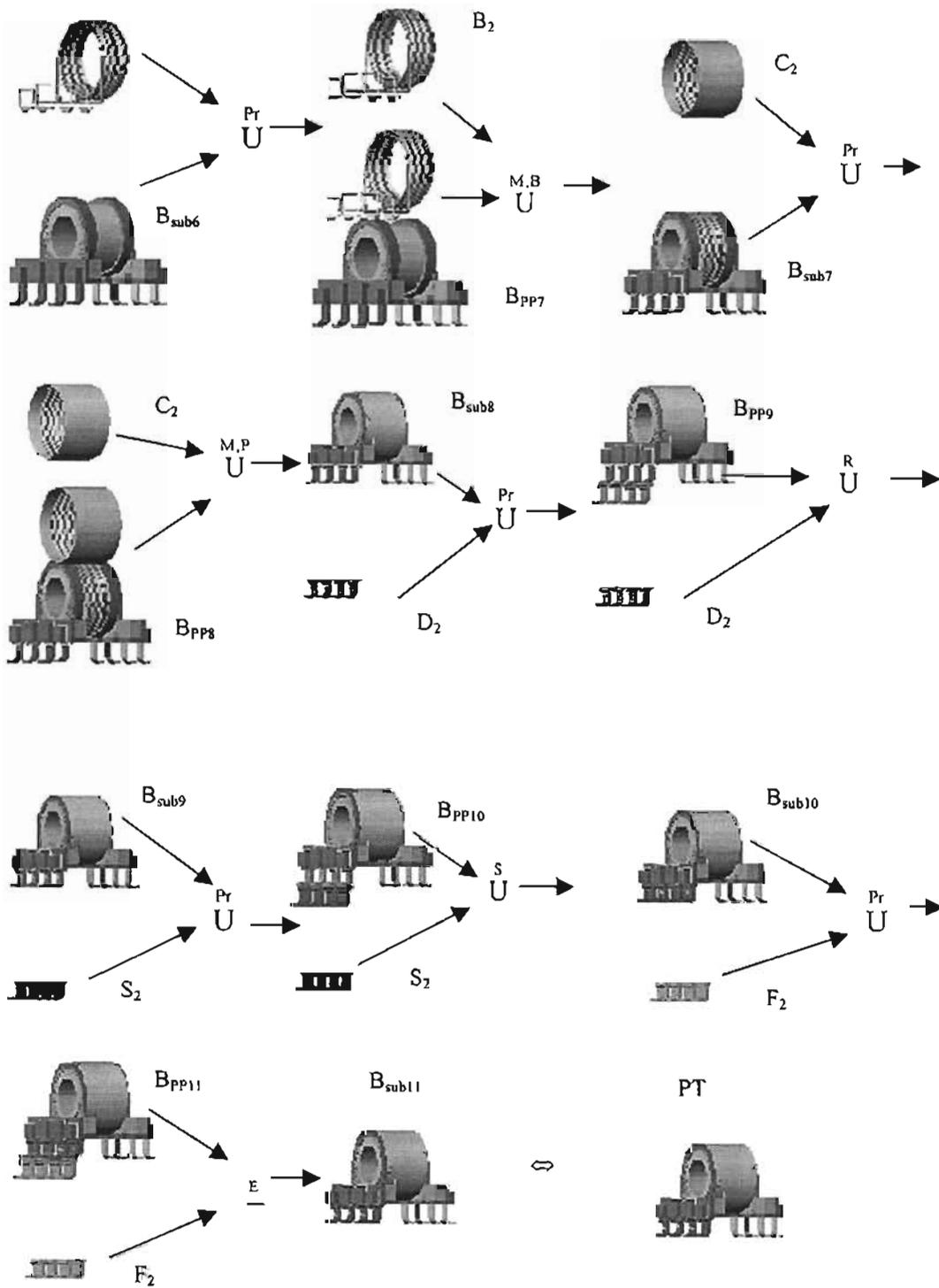


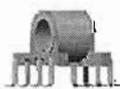
Figura 2.3 Representación geométrica de la ecuación de forma

## 2.2 Modelado por primitivas de los procesos y operaciones en la línea de producción de Midcom Inc.

El objetivo con este proyecto es obtener otra una representación abstracta de las transformaciones geométricas y de manufactura del componente manufacturado en la línea Midcom Inc., en este caso, usando primitivas de manufactura. Tal representación es llamada "Ecuación de Volúmenes Modificada"(EVM) [17,22]. Formalmente:

*"Una EVM es una representación abstracta de las transformaciones geométricas de materias primas en productos terminados. Los elementos primitivos que integra una EVM son volúmenes de primitivas de manufactura y operaciones de suma y resta de volúmenes. El orden de las transformaciones está dado por una sucesión admisible de operaciones perfectas de manufactura."*

De hecho, toda EVM tiene asociada una y solo una ecuación de forma siempre y cuando este relacionada una sucesión de operaciones de manufactura. Para generar una ecuación de volúmenes modificada, de acuerdo con [17,22], se requiere de un dominio de primitivas. Tal dominio se presenta en la tabla 2.3 :

El dominio de manufactura ( $P^M$ )						
Materias primas ( $P_{MP}$ )	$P_{MP}$	$P_{B1}$	$P_{SUB1}$	$P_{SUB2}$	$P_{SUB3}$	$P_{SUB4}$
						

Productos preparados (P <sub>PP</sub> )	P <sub>PP1</sub> 	P <sub>PP12</sub> 	P <sub>PP13</sub> 	P <sub>PP14</sub> 	P <sub>PP15</sub> 	
Materiales agregados y extralidos (P <sub>MAE</sub> )	P <sub>B1</sub> 	P <sub>C1</sub> 	P <sub>D1</sub> 	P <sub>S1</sub> 	P <sub>F1</sub> 	
Subproductos (P <sub>SUB</sub> )	P <sub>SUB1</sub> 	P <sub>SUB12</sub> 	P <sub>SUB13</sub> 	P <sub>SUB14</sub> 	P <sub>SUB15</sub> 	
Producto terminado (P <sub>PT</sub> )	P <sub>PT</sub> 					

Tabla 2.3 El dominio (P<sup>M</sup>) en términos geométricos

Cabe mencionar que tal dominio solo esta relacionado con 5 operaciones de manufactura. La información relacionada con las primitivas, según [23], está direccionada hacia la representación de procesos y operaciones y hacia el diseño de trayectorias. Las tablas siguientes muestran las primitivas relacionadas con la primera operación de manufactura:

Nomenclatura	Descripción	Descripción de geometría	Dimensiones principales	Material	Forma geométrica
P <sub>MP</sub>	<b>Primitiva extendida de la materia</b>	<b>Especial</b>	l <sub>1</sub> = l <sub>2</sub> = l <sub>3</sub> =	<b>Plástico y terminales</b>	

	prima base		t		
$P_{B1}'$	Primitiva extendida de la materia prima (material agregado)	Especial	$\varphi_E =$ $l_E =$	Alambre magneto	

Tabla 2.4 Primitivas de las materias primas

Nomenclatura	Descripción	Primitiva de la materia prima base	Primitiva de los materiales extraídos o agregados (vistas como materias primas)	Operación	Forma geométrica
$P_{PP1}$	Primitiva extendida del producto preparado 1	$P_{MP}$	$P_{B1}'$	De preparación	

Tabla 2.5 Primitiva del producto preparado

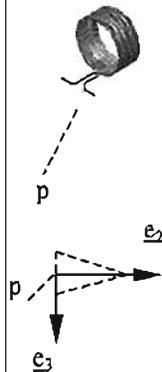
Nomenclatura	Descripción	Primitiva del producto preparado	Geometría	Parámetros base	Parámetros cinemáticos	Herramientas y $k_{ij}$	Forma geométrica
$P_{B1}$	Primitiva de la operación de montaje	$P_{PP1}$	$G_{B1}$ Cono	$(x_p, y_p, z_p) =$ $e_2 = (0, 1, 0)$ $\phi_E =$ $l_E =$	$v =$ $\tau =$ $W_{PP1} =$ $W_{H1} =$	$H_1,$ Punzón $K_{i,j} = \{1\}$	

Tabla 2.6 Primitiva de la operación

Nomenclatura	Descripción	Primitiva de origen	Primitiva de operación	Operación	Forma geométrica
$P_{SUB1}$	<b>Primitiva extendida del primer subproducto</b>	$P_{PP1}$	$P_{B1}$	<b>Montaje</b>	

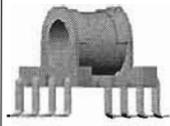
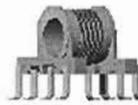
Tabla 2.7 Primitiva del subproducto

Por otro lado, la secuencia de operaciones utilizada es la siguiente:

$SO^{F1}O_{2,3,4,5}$					
Oper Ev.	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$
Ev <sub>1</sub>	1	0	0	0	0
Ev <sub>2</sub>	0	1	0	0	0
Ev <sub>3</sub>	0	0	1	0	0
Ev <sub>4</sub>	0	0	0	1	0
Ev <sub>5</sub>	0	0	0	0	1
Ev <sub>G</sub>	$G_1^i$	$G_1^{ii}$	$G_1^{iii}$	$G_1^{iv}$	$G_1^v$

Tabla 2.8 Secuencia de operaciones

Según [17], todo dominio de primitivas tiene asociado un dominio volumétrico, tal dominio se muestra en la tabla 2.9:

Materias primas ( $P_{MP}$ )	$V_{MP}$	$V_{B1}$	$V_{SUB1}$	$V_{SUB2}$	$V_{SUB3}$	$V_{SUB4}$
						

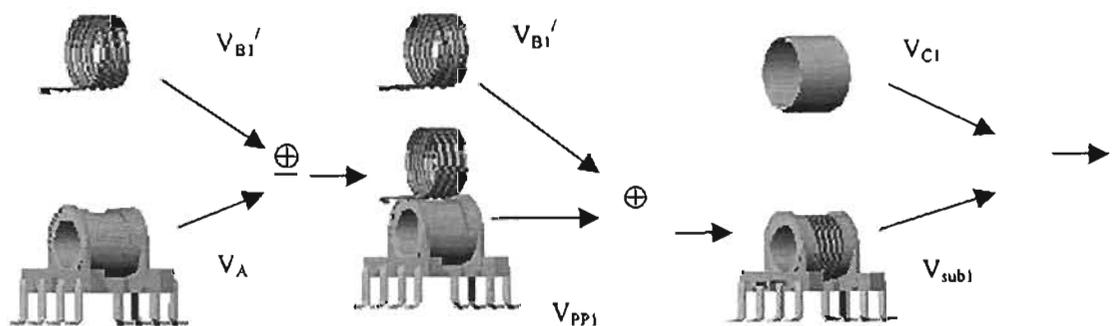
Productos preparados (P <sub>PP</sub> )	V <sub>PP1</sub> 	V <sub>PP12</sub> 	V <sub>PP13</sub> 	V <sub>PP14</sub> 	V <sub>PP15</sub> 	
Materiales agregados y extraldos (P <sub>MAE</sub> )	V <sub>B1</sub> 	V <sub>C1</sub> 	V <sub>D1</sub> 	V <sub>S1</sub> 	V <sub>F1</sub> 	
Subproductos (P <sub>SUB</sub> )	V <sub>SUB1</sub> 	V <sub>SUB12</sub> 	V <sub>SUB13</sub> 	V <sub>SUB14</sub> 	V <sub>SUB15</sub> 	
Producto terminado (P <sub>PT</sub> )	V <sub>PT</sub> 					

Tabla 2.9 El dominio (V<sup>M</sup>)

Por tanto, la ecuación de volúmenes asociada con la secuencia descrita en la tabla 2.7 es la siguiente:

$$V_{PT} \approx V_{SUB5} = ((((((( ( ( ( (V_A \oplus V_{B1}) \oplus V_{B1}) \oplus V_{C1}) \oplus V_{C1}) \oplus V_{D1}) \oplus V_{D1}) \oplus V_{S1}) \oplus V_{S1}) \oplus V_{F1}) \otimes V_{F1})$$

La representación geométrica de la ecuación de volúmenes es mostrada en la figura 2.4:



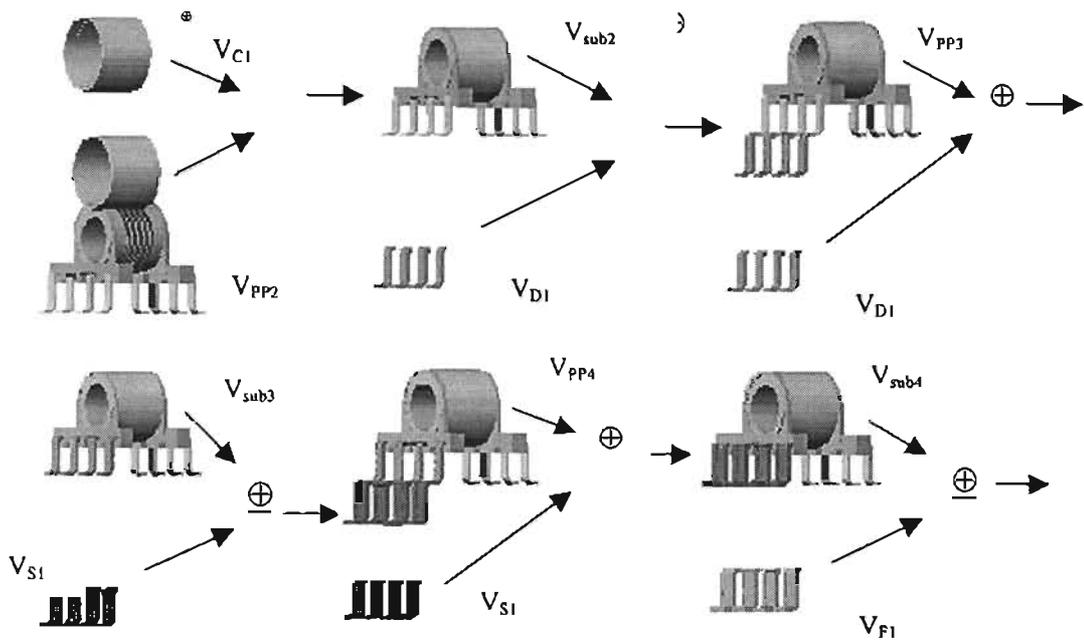


Figura 2.4 Representación geométrica de la ecuación de volúmenes

### 2.3 Análisis de la distribución de planta de la línea Midcom Inc. usando ecuaciones de forma y circunferencias de distribución

En este proyecto se presenta un método geométrico utilizado para caracterizar la distribución de maquinaria de un sistema productivo. Dicho método es llamado "circunferencia de distribución (CD)" [4,24].

Se utilizan circunferencias de distribución para caracterizar la maquinaria de trabajo de un proceso productivo real (línea de Midcom Inc.). La ecuación de forma relacionada con el proceso de estudio ha sido desarrollada en el proyecto 1 descrito al inicio de este capítulo. Se supone conocida la distribución de planta, la maquinaria de trabajo y transporte por lo cual se utilizarán "circunferencias de distribución" para caracterizar la maquinaria, así como líneas LFM (Líneas de flujo de materiales), PES (Puntos de entrada y salida y PO (Puntos de distribución), respectivamente. Los componentes (subproductos manufacturados en las líneas en cada módulo) son mostrados en la figura 2.5:

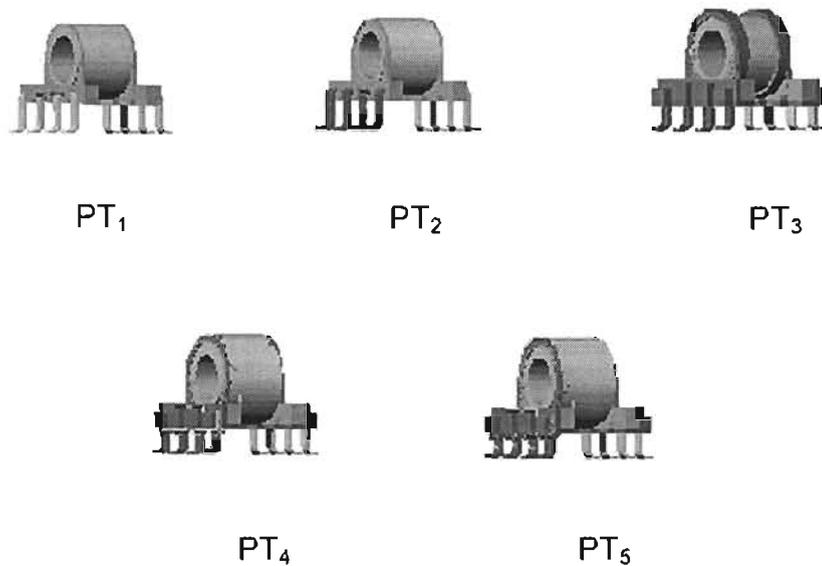


Figura 2.5 Representación grafica de los componentes PT<sub>1</sub>, PT<sub>2</sub>, PT<sub>3</sub>, PT<sub>4</sub> y PT<sub>5</sub>

La distribución de planta relacionada con el sistema productivo es mostrada en la figura 2.6 [4]:

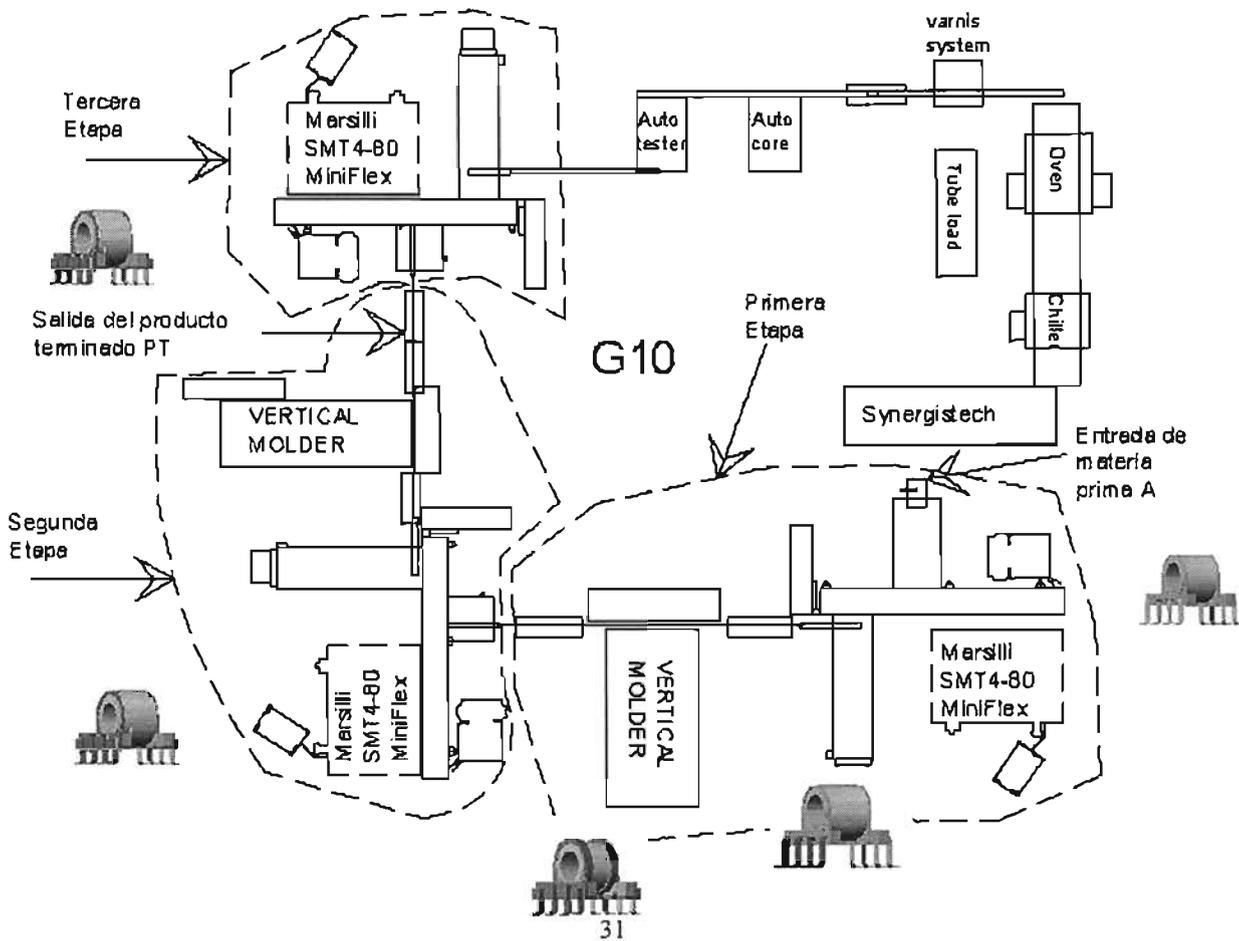


Figura 2.6 Distribución de planta

Los módulos analizados son: 1) Embobinado<sub>1</sub> – empapelado (PT<sub>1</sub>), 2) Soldadura<sub>1</sub> (PT<sub>2</sub>), 3) Montaje (PT<sub>3</sub>), 4) Embobinado<sub>2</sub>- empapelado (PT<sub>4</sub>) y 5) Soldadura<sub>2</sub> (PT<sub>2</sub>).

Por otro lado, la descripción de la maquinaria se presenta en la tabla 2.10 [4]:

Máquina	Descripción	Módulos
T <sub>R1</sub>	Transportador de riel vibratorio	E <sub>embobinado1</sub>
A <sub>C1</sub>	Dispositivo mecánico de 3 GDL (transportador)	E <sub>embobinado1</sub>
M <sub>EN11</sub>	Máquina empapeladora	E <sub>embobinado1</sub>
M <sub>12</sub>	Máquina embobinadora	E <sub>embobinado1</sub>
M <sub>T1</sub>	Dispositivo transportador giratorio	E <sub>embobinado1</sub>
R <sub>A1</sub>	Recipiente alimentador de 8 piezas	E <sub>embobinado1</sub>
T <sub>B1</sub>	Transportador de banda 2 GDL	E <sub>embobinado1</sub> S <sub>oldadura1</sub>
A <sub>C2</sub>	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)	E <sub>embobinado1</sub>
M <sub>A1</sub>	Manipulador cartesiano de 3GDL	S <sub>oldadura1</sub>

E <sub>F1</sub>	Estación de pasta para soldadura 1	Soldadura1
E <sub>S1</sub>	Estación de soldadura 1	Soldadura Montaje
T <sub>R2</sub>	Transportador de riel vibratorio	Montaje
A <sub>C3</sub>	Dispositivo mecánico de 1GDL (transportador)	Montaje
M <sub>MD1</sub>	Estación de moldeo (ensamble)	Montaje
R <sub>A2</sub>	Recipiente alimentador de 4 productos	Montaje
M <sub>T2</sub>	Dispositivo transportador giratorio	Montaje
A <sub>C4</sub>	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)	Montaje
T <sub>R3</sub>	Transportador de riel vibratorio	Montaje Embobinado2
A <sub>C5</sub>	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)	Montaje
M <sub>EN21</sub>	Máquina empapeladora 2	Embobinado2
M <sub>EN22</sub>	Máquina de embobinado 2	Embobinado2
M <sub>T3</sub>	Dispositivo transportador giratorio	Embobinado2
R <sub>A3</sub>	Recipiente alimentador de 8 piezas	Embobinado2

$T_{B2}$	Transportador de banda 2GDL	$E_{\text{Embobinado2}}$ $S_{\text{Soldadura2}}$
$A_{C6}$	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)	$S_{\text{Soldadura2}}$
$M_{A2}$	Manipulador cartesiano de 3GDL	$S_{\text{Soldadura2}}$
$E_{F2}$	Estación de pasta para soldadura 1	$S_{\text{Soldadura2}}$
$E_{S2}$	Estación de soldadura 1	$S_{\text{Soldadura2}}$
$T_{R4}$	Transportador de riel vibratorio	$S_{\text{Soldadura2}}$

Tabla 2.10. Descripción de la maquinaria real de Midcom Inc.

La figura 2.7 muestra las líneas de flujo de materiales(LFM), los puntos de entrada y salida (1...7) y los puntos (PO) [4]:

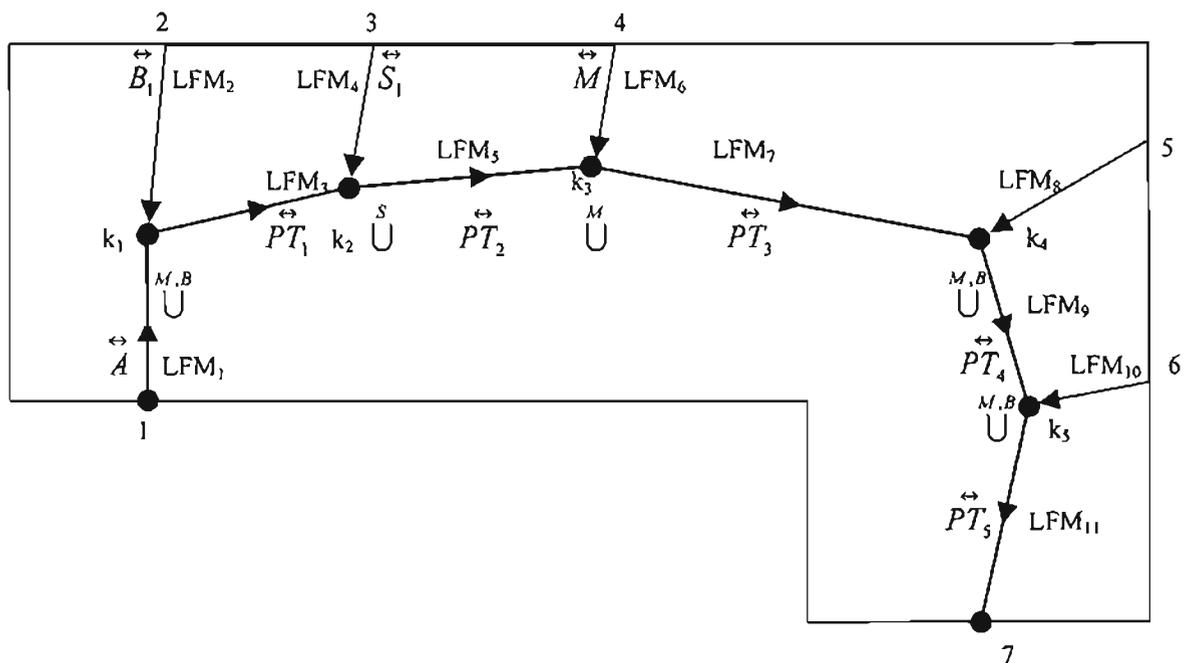


Figura 2.7 Puntos PO, PES y LFM

Una circunferencia de distribución es una representación geométrica con centro en los puntos PO y radio arbitrario tal que dos circunferencias sólo puedan tocarse por sus fronteras [4,24]. La figura 2.8 muestra la distribución de las circunferencias sobre la línea de producción:

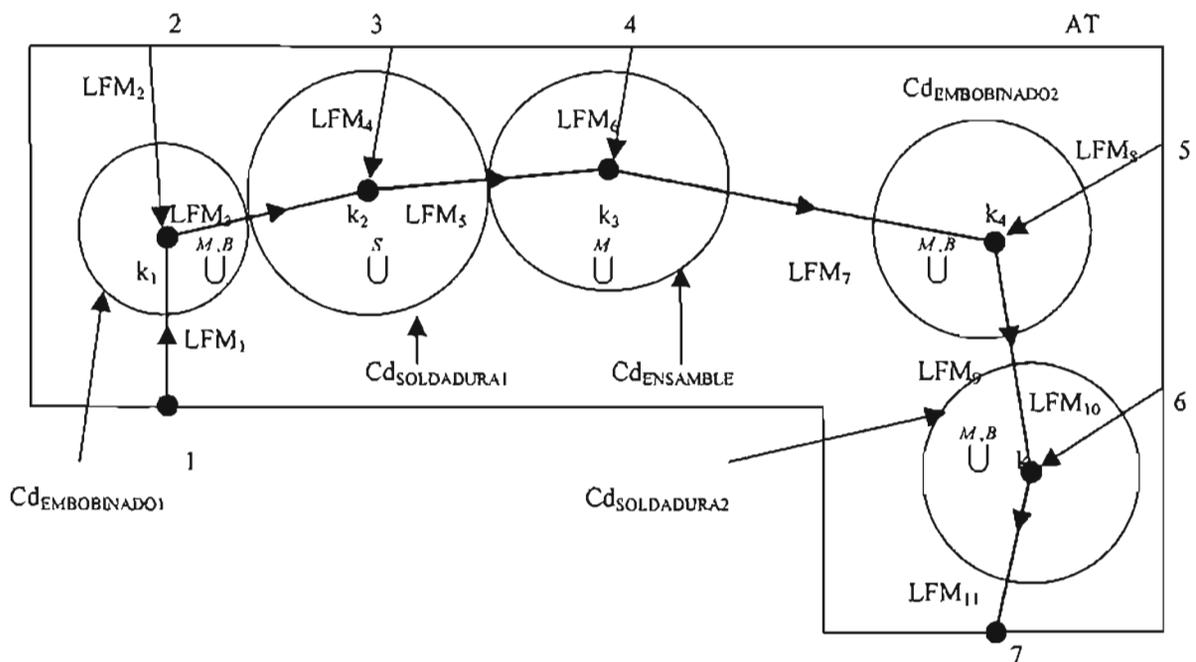


Figura 2.8 Distribución de circunferencias

Las circunferencias fueron concebidas [4,24] para determinar el número de máquinas de operación principal y de transportes. En este proyecto dichas circunferencias se usaron para caracterizar la maquinaria de la línea MIDCOM, las cuales ya son conocidas. Así, la maquinaria teórica caracterizada usando los criterios descritos en [4] se muestra en la figura 2.9:

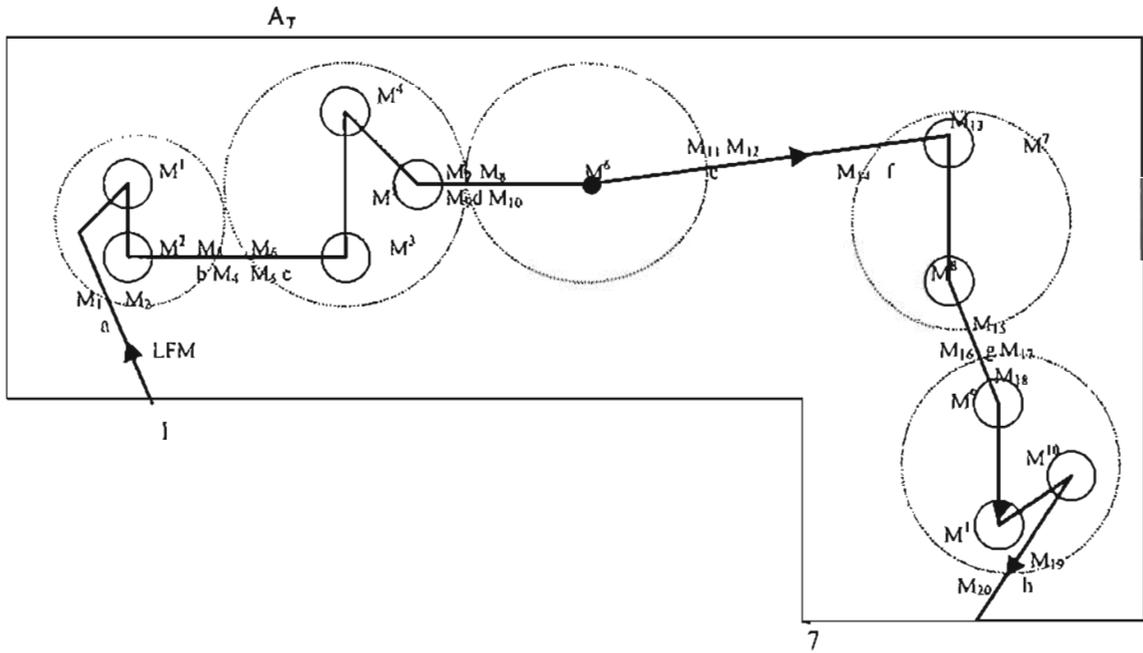


Figura 2.9 Distribución de máquinas teóricas

La figura 2.10 muestra la línea real MIDCOM caracterizada por circunferencias de distribución [4]:

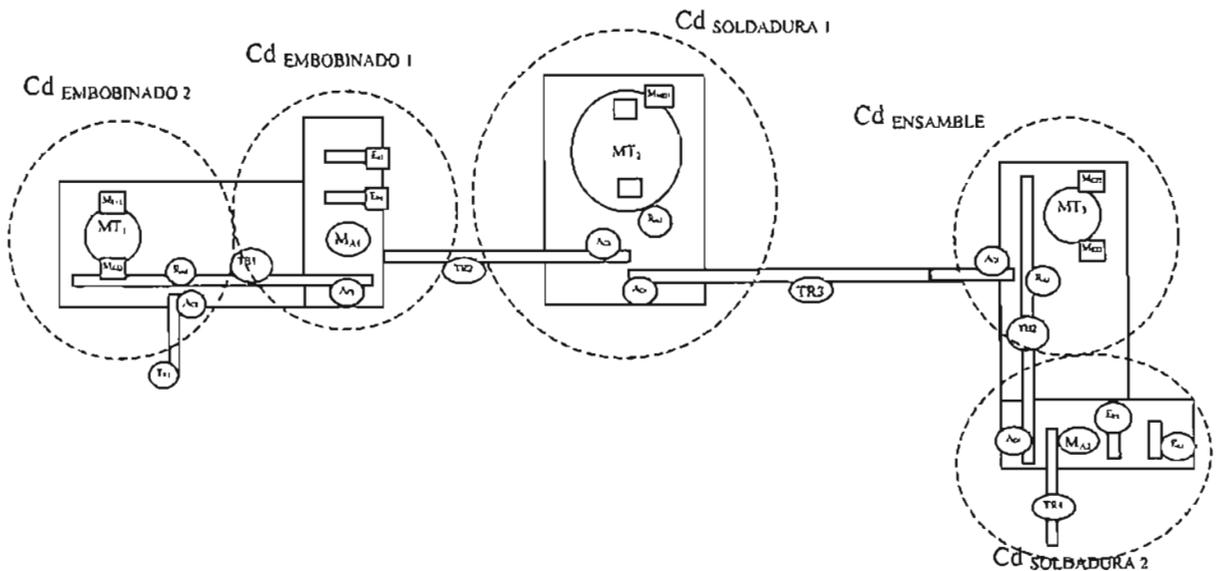


Figura 2.10 Distribución de circunferencias en la línea Midcom Inc.

Finalmente, la tabla 2.11 muestra la comparación entre máquinas teóricas y reales de la línea Midcom Inc. [4]:

Maquinas teóricas		Maquinaria MIDCOM		CD
Operación Principal	Transporte	Operación principal	Transporte	
-	$M_1$	-	$T_{R1}$	Embobinado 1
-	$M_2$	-	$A_{C1}$	Embobinado 1
$M^1$	-	$M_{EN12}$	-	Embobinado 1
$M^2$	-	$M_{EN11}$	-	Embobinado 1
-	$M_{01}$	-	$M_{T1}$	Embobinado 1
-	$M_{02}$	-	$R_{A1}$	Embobinado 1
-	$M_3=M_4$	-	$T_{B1}$	Embobinado 1 soldadura 1
-	$M_5=M_6$	-	$A_{C2}$	Soldadura 1
$M^3=M^4=M^5$	-	$M_{A1}$	-	Soldadura 1

-	$M_7=M_8$	-	$T_{R2}$	Soldadura 1 ensamble
-	$M_9=M_{10}$	-	$A_{C3}$	Ensamble
$M^6$	-	$M_{MD1}$	-	Ensamble
-	$M_{03}$	-	$R_{A2}$	Ensamble
-	$M_{04}$	-	$M_{T2}$	Ensamble
-	$M_{11}$	-	$A_{C4}$	Ensamble
-	$M_{12}=M_{13}$	-	$T_{R3}$	Ensamble Embobinado 2
-	$M_{14}$	-	$A_{C5}$	Embobinado 2
$M^7$	-	$M_{E22}$	-	Embobinado 2
$M^8$	-	$M_{EN21}$	-	Embobinado 2
-	$M_{05}$	-	$M_{T3}$	Embobinado 2
-	$M_{06}$	-	$R_{A3}$	Embobinado 2
-	$M_{15}=M_{17}$	-	$T_{B2}$	Cdembobinado2 Soldadura 2
-	$M_{16}=M_{18}$	-	$A_{C6}$	Soldadura 2

$M^9=M^{10}=M^{11}$	-	$M_{A2}$	-	Soldadura 2
-	$M_{19}=M_{20}$	-	$T_{R4}$	Soldadura 2

Tabla 2.11 Caracterización de maquinaria teórica con maquinaria MIDCOM INC

## 2.4 Análisis, modelación y simulación de una trayectoria continua para la aplicación de soldadura en un transformador eléctrico

En este proyecto se analizó, modelo y programó una trayectoria de operación relacionada con una operación de soldadura [5,23]. Básicamente las operaciones están relacionadas con el módulo de soldadura 1. El ciclo de trayectoria mostrado en la figura 2.11 esta integrado por 21 segmentos rectilíneos. Dicho ciclo se describe a continuación:

- 1)  $L_{0,1,2,3,4,p(5)}$ : la herramienta se desplaza hasta antes de aplicar la operación de recubrimiento por flux ( $L_{p,6}$ ).
- 2)  $L_{6,p(7),8,q(9)}$ : la herramienta se desplaza hasta antes de aplicar la operación de soldadura ( $L_{q,10}$ ).
- 3)  $L_{10,q,r(11)}$ : la herramienta se desplaza hasta antes de aplicar la operación eliminación de excedentes ( $L_{qr13}$ ).
- 4)  $L_{13,r,15,1,6,17}$ : la herramienta se desplaza hasta un lugar donde descarga los componentes.
- 5)  $L_{17,18,19,20,21(0)}$ : la herramienta se desplaza hasta el punto de inicio.

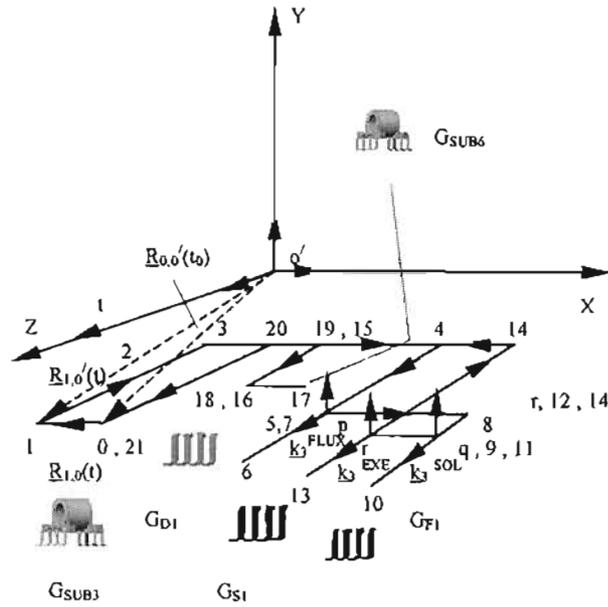


Figura 2.11 Lugares geométricos de la trayectoria

Por otro lado, los perfiles de trayectoria teóricos son los mostrados en la figura 2.12 [5,23]:

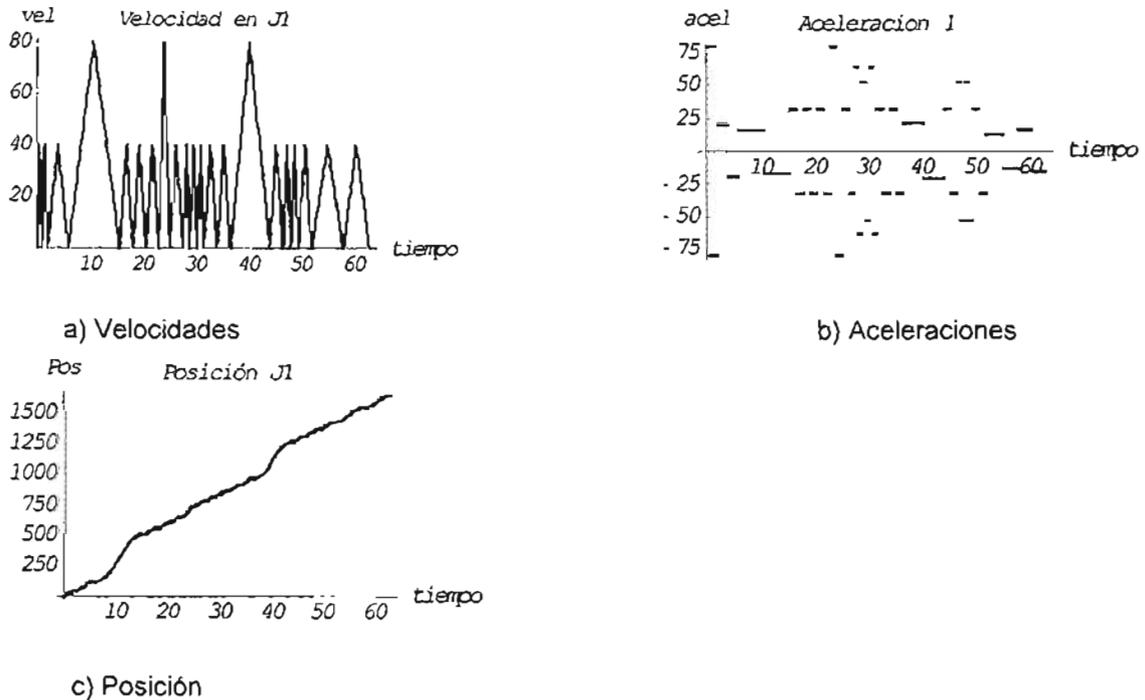


Figura 2.12 Perfiles de trayectoria

Cabe señalar que el perfil teórico de velocidades está compuesto de 42 segmentos rectilíneos. Las discontinuidades de los perfiles se eliminaron usando

polinomios de grado 8. La figura 2.13 muestra los perfiles sin discontinuidades [5,23]:

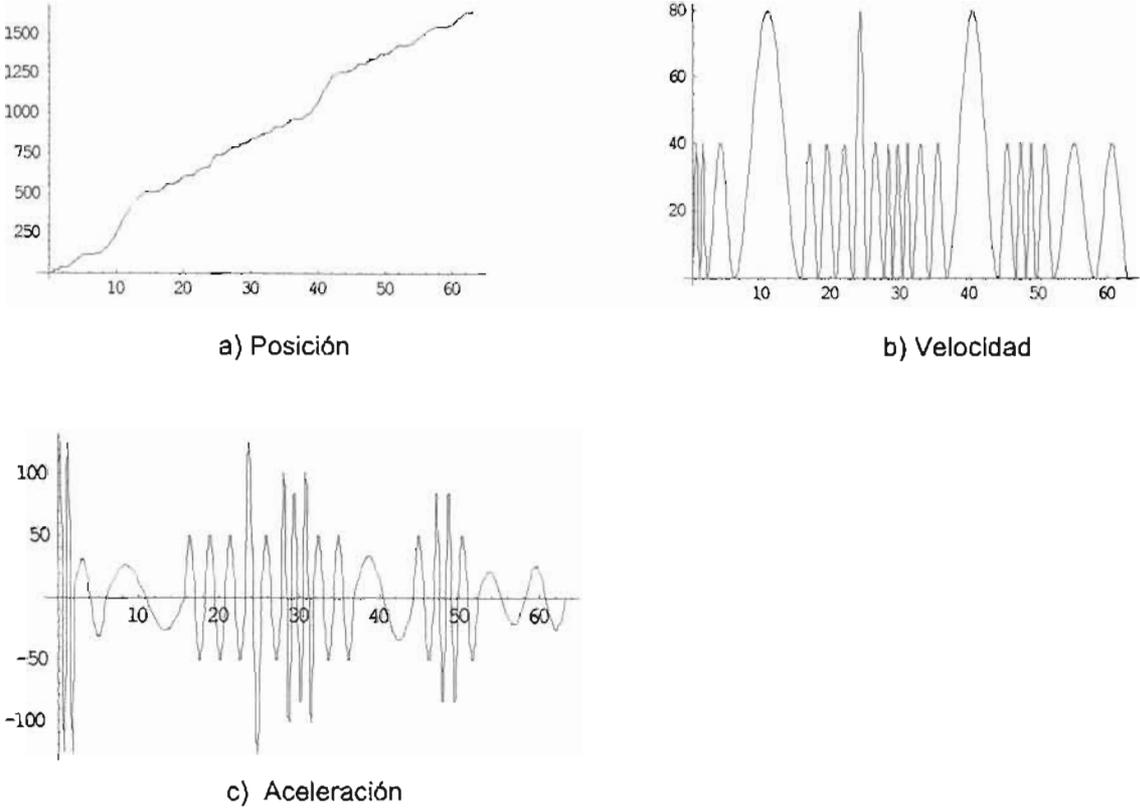
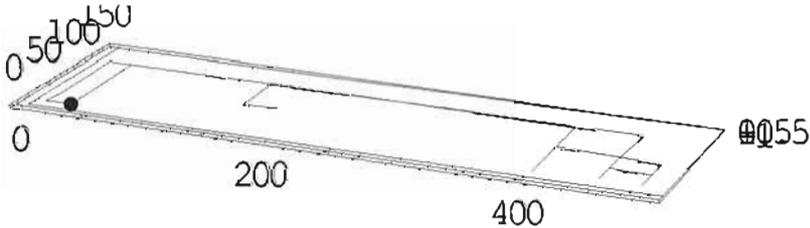
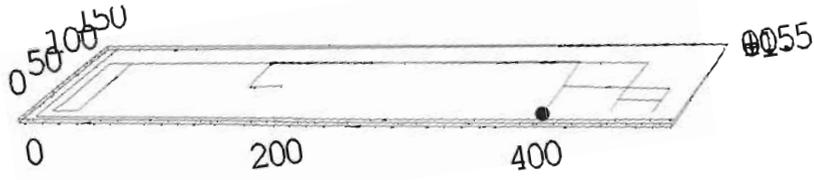


Figura 2.13 Perfiles de trayectoria sin discontinuidades

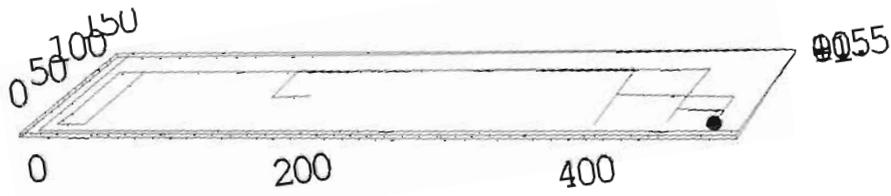
Las salidas gráficas de la trayectoria se muestran en la figura 2.14:



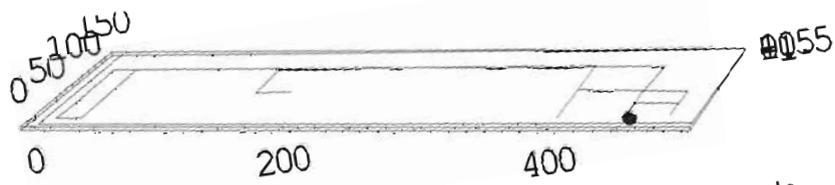
a) Inicio de la operación



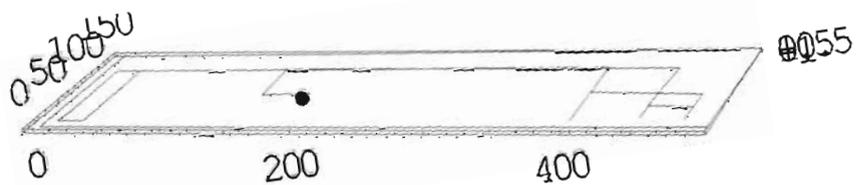
b) Inicio de la operación del flux



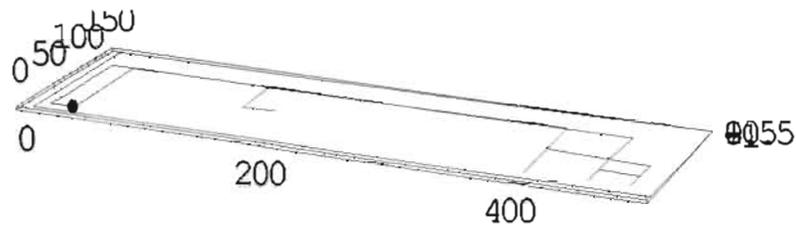
c) Inicio de la operación de la soldadura



d) Inicio de la operación de eliminación de excedente



e) Punto termino de la trayectoria



f) Reinicio de la operación

Figura 2.14 Salidas gráficas de las trayectorias

Cabe mencionar que los modelos de la trayectoria no son descritos por las limitantes de espacio. Para mayor información favor de consultar las referencias [5,23]

## 2.5 Modelación cinemática y de trayectoria de un robot cartesiano para la aplicación de la operación de soldadura en la línea Midcom Inc.

En este trabajo, la trayectoria analizada en el proyecto anterior, se acopla a un robot cartesiano de dos grados de libertad. Los modelos cinemáticos de robot fueron generados usando un método desarrollado [5,20,23]. La figura 2.15 muestra el robot cartesiano usado en la línea Midcom Inc.:

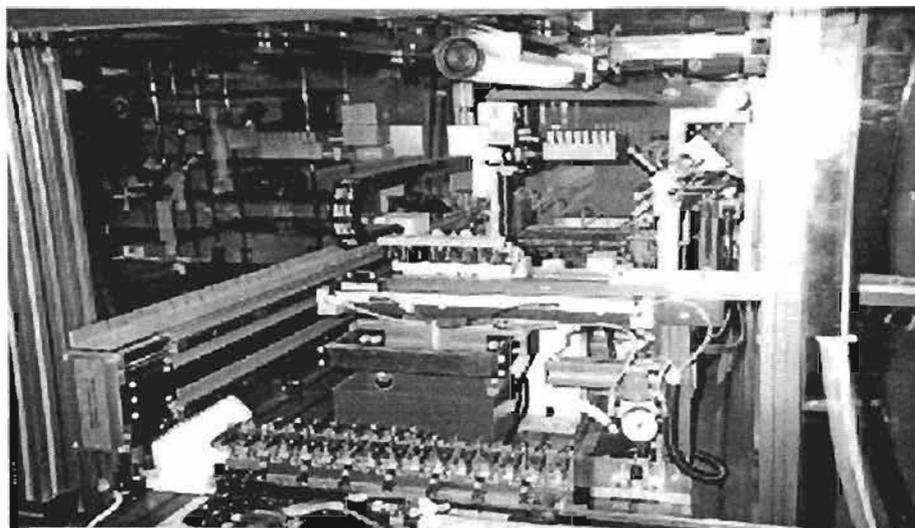


Figura 2.15 Máquina soldadora. (Cortesía de Midcom Inc.)

Para modelar el robot se analizaron dos configuraciones, la de referencia o también llamada configuración no deformada y la configuración deformada. Se generaron los modelos cinemáticos de posicionamiento usando números complejos y, posteriormente, los modelos de velocidad y aceleración. Tales modelos fueron acoplados con la trayectoria y los resultados de la programación y simulación se muestran en las figuras siguientes [20]:

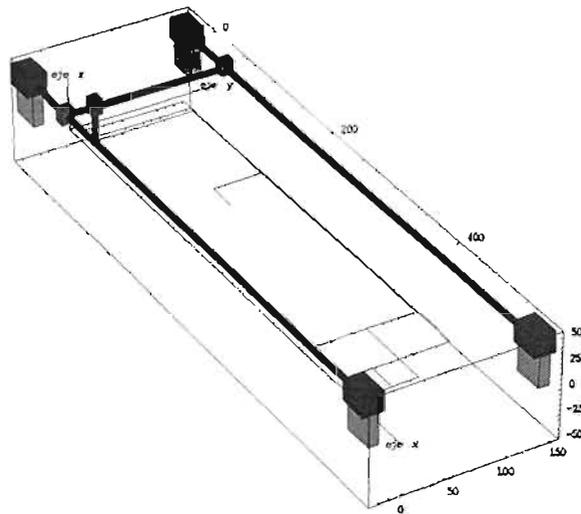


Figura 2.16 Salida gráfica del robot cartesiano

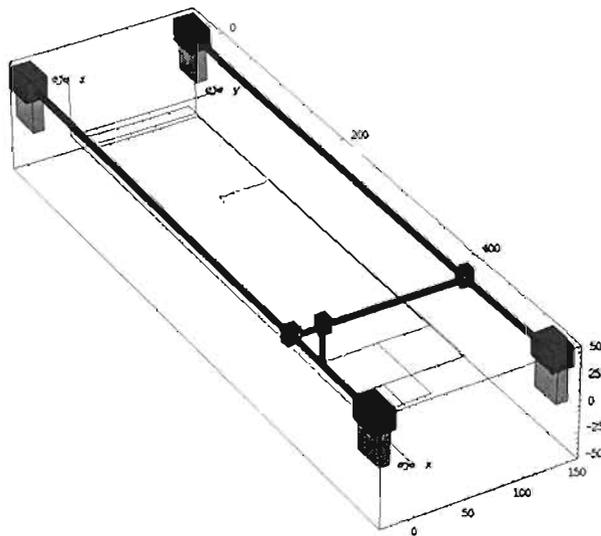


Figura 2.17 Salida gráfica del robot cartesiano sobre la operación de recubrimiento por flux

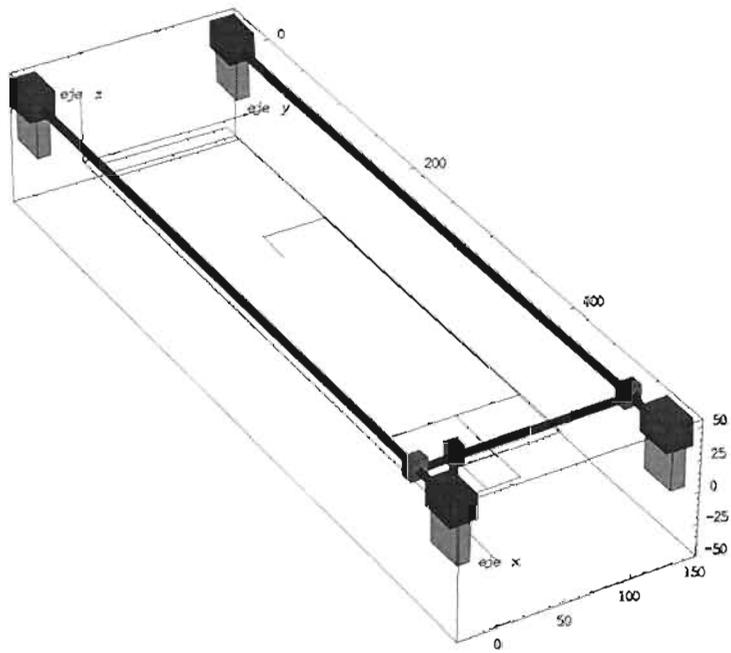


Figura 2.18 Salida gráfica del robot cartesiano sobre la operación de soldadura

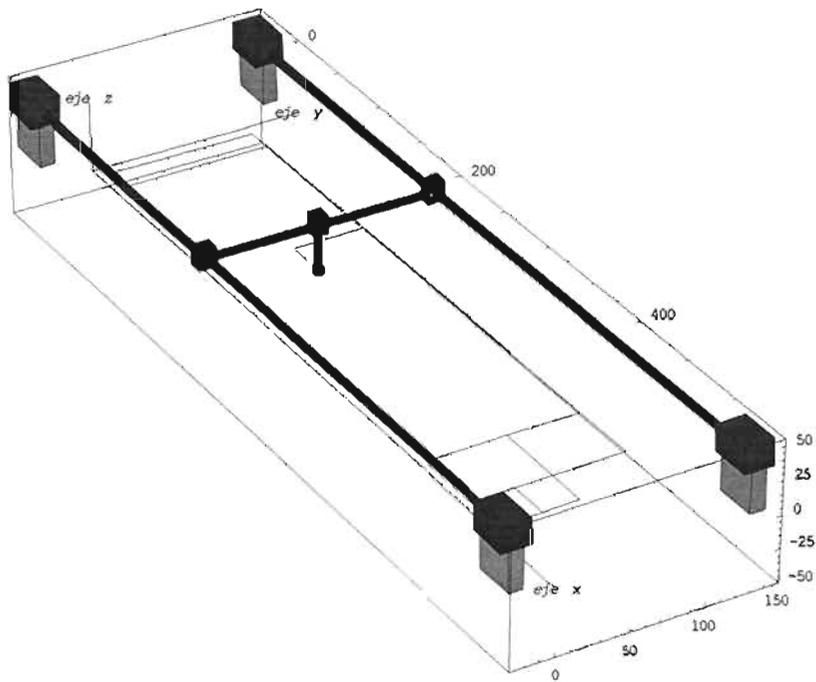


Figura 2.19 Salida gráfica del robot cartesiano en el punto de descarga

## **2.6 Sincronización local de la línea Midcom Inc. usando el método de vórtice**

En este proyecto se utilizó el método del vórtice [1,2,6] para sincronizar, localmente, tres módulos de producción de la línea de producción Midcom Inc. No se dará una explicación detallada de este proyecto, pues en los capítulos posteriores se realiza un resumen completo de trabajo desarrollado en [6], puesto que los resultados de dicho trabajo son usados en esta tesis para sincronizar, globalmente, dos módulos de la línea en estudio.

Por ello, esta tesis finaliza los proyectos académicos realizados sobre la línea de producción perteneciente a la empresa Midcom Inc.

## CAPÍTULO 3

### SINCRONIZACIÓN LOCAL DE LOS MÓDULOS DE EMOBINADO Y SOLDADURA

**Introducción.** En este capítulo se sincronizan localmente los módulos de una línea de producción serial: 1) embobinado y 2) soldadura. Se utiliza el método del vórtice para relacionar máquinas distribuidas sobre los módulos de acuerdo con el recorrido de ida [1,2]. Con dichas relaciones se generarán grupos de máquinas los cuales se sincronizan localmente a  $T_{pU}$ . Los datos conocidos son: 1) la distribución de maquinaria, 2) el sistema de sensado de ida, 3) los lugares geométricos de los ciclos operacionales de la maquinaria, 4) los tiempos fijos y 5) el  $T_{pU}$ . Este capítulo rescata un resumen completo del trabajo desarrollado en [6], puesto que los resultados de dicho trabajo serán utilizados en la presente tesis.

#### 3.1 El Vórtice y algunos conceptos importantes

Para sincronizar los procesos y operaciones de la maquinaria se ha utilizado el método del vórtice [1]. Tal método consiste es agrupar las máquinas que integran módulos de producción de tal forma que cada una de las máquinas y en su conjunto sean sincronizadas usando el tiempo de producción unitaria.

La sincronización local o modular se realiza paso a paso según se explica en [1]. Tales pasos son los siguientes:

- 1) Determinar  $T_{DIS}$  para el cual el  $T_{pU}$  y el  $T_F$  o la  $\sum T_F$  son datos conocidos.

Aquí,  $T_{DIS}$ ,  $T_{pU}$ ,  $T_F$  o  $\sum T_F$  son el tiempo de distribución máximo, el tiempo de producción unitaria, el tiempo fijo máximo de operación principal y la sumatoria de tiempos fijos.

- 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  $T_{pU}$ .

La máquina referencial es la que ocupa el mayor tiempo fijo o la más lenta.

- 3) El  $T_{DIS}$  debe ser particionado y distribuido sobre:
  - a) La ruta de acercamiento.
  - b) La ruta de retiro primario.
  - c) La ruta de retiro secundario de la máquina referencial.
- 4) En la distribución de las particiones de  $T_{DIS}$  sobre las rutas de la máquina referencial, se debe tomar en cuenta los rangos permisibles operacionales de la máquina.
- 5) La distribución del  $T_{DIS}$  no es única.
- 6) Una vez distribuidos los tiempos en las rutas de la máquina referencial, dicha distribución debe ser fijada y la suma de los tiempos de ida de la máquina se controlan por dos sensores; uno localizado al inicio de la ruta y otro localizado en la intersección de las rutas de retiro primario y secundario (si se da el caso que la máquina sucesora a la referencial requiera de un sensor).

7) La máquina referencial se dice “sincronizada individualmente” si los pasos anteriores han sido satisfechos. Por otro lado, si la suma de los tiempos de ciclo es igual al  $TpU$ , entonces dicha máquina “opera a ciclo continuo”; es decir, sin detenerse. Si la suma de los tiempos es menor al  $TpU$ , entonces la máquina opera a ciclo intermitente; es decir, se detiene en cada ciclo en su punto de partida.

8) Seleccionar el grupo 1 y sincronizarlo usando los pasos siguientes:

- a) 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.
- b) La suma de los tiempos de ida de la máquina referencial y la sucesora o antecesora debe ser igual al  $TpU$ .
- c) 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 la dos máquinas.

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

9) Seleccionar el grupo 2 y sincronizarlo usando los pasos siguientes:

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

- b) 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.
- c) La suma de los tiempos de ida de las máquinas del grupo 2 debe ser igual al  $T_{pU}$ .
- d) Los tiempos de vuelta de las máquinas antecesora o sucesora del grupo 1 y del grupo 2 se determinan según el paso 8-c)

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

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

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

11) Tomar el grupo "n" y usar el paso 10) las veces que sean necesarias generando proporciones de tiempos a partir de la suma de los tiempos de ida de las máquinas antecesoras y sucesoras de todos los grupos anteriores. Además, la siguiente restricción debe ser satisfecha:

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

Una configuración arbitraria de un vórtice y sus grupos se muestra en la figura 3.1 :

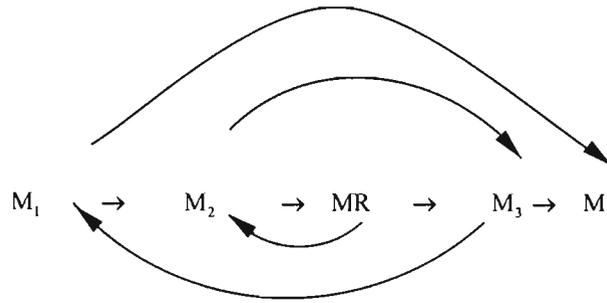


Figura 3.1 Representación geométrica de un vórtice

- 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 = {  $M_1, M_2, M_R, M_3, M_4$  }

La máquina MR es llamada referencial y las máquinas  $M_{1..4}$  son máquinas sucesoras y antecesoras de un módulo.

La técnica del vórtice fue usada en [6] para sincronizar, localmente 3 módulos de producción de la línea MIDCOM INC. En las secciones siguientes se muestran los resultados de la sincronización.

### 3.2 Descripción de los datos conocidos de la línea Midcom Inc.

La distribución de planta ( $D_p$ ) asociada con el segmento de la línea MIDCOM se muestra en la figura 3.2 [6].

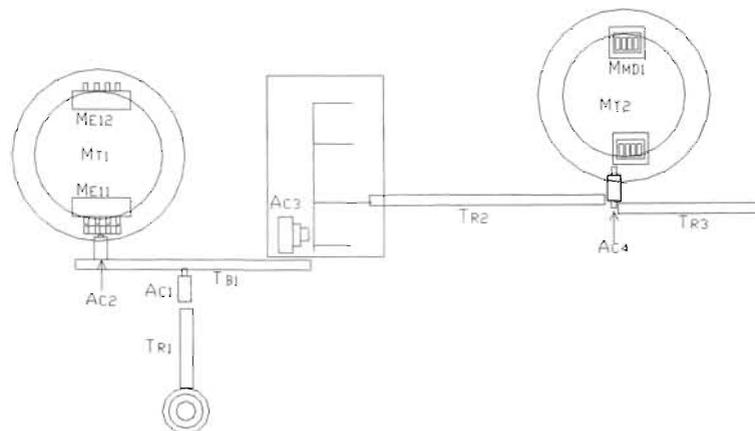


Figura 3.2 Distribución de planta

La tabla 3.1 describe cada uno de los elementos y dispositivos de trabajo que componen la distribución de planta:

Nomenclatura	Descripción
$T_{R1}$	Transportador
$A_{C1}$	Actuador
$T_{B1}$	Transportador
$A_{C2}$	Actuador
$M_{E12}$	Máquina embobinadora
$M_{T1}$	Mesa de trabajo
$M_{E11}$	Máquina encintadora
$A_{C3}$	Actuador
$T_{R2}$	Transportador de riel

Tabla 3.1 Descripción de los elementos de trabajo

Las operaciones y procesos del sistema productivo se describen en la crónica siguiente [6]:

*El proceso inicia al abastecer bobinas dentro del contenedor vibratorio, que como su nombre lo indica, por medio de vibraciones suministra el transportador alimentador no. 1 ( $TR_1$ ), que a su vez, también por medio de vibración transporta la bobina desde el lugar geométrico no. 1 ( $LG_1$ ) al lugar geométrico no. 2 ( $LG_2$ ). Una vez situada la bobina en el lugar geométrico  $LG_2$ , un dispositivo mecánico  $AC_1$  de 3 grados de libertad (3GDL) coloca la bobina de forma secuencial (una en una) en el recipiente alimentador  $RA_1$  hasta completar 8 bobinas en el alimentador, cambiando la posición de  $LG_2$  a  $LG_3$ . Una vez completada la carga de  $RA_1$  en  $LG_3$ , el transportador de banda  $TB_1$  en cantidades de 2 piezas (como se recordará, se va a considerar 1 pieza como el conjunto de 4 bobinas, es decir, suministra la carga completa de  $RA_1$  -8 bobinas en total- a  $TB_1$ ), completando el movimiento de  $LG_3$  al lugar geométrico  $LG_4$ .*

*TB<sub>1</sub> transporta las piezas (nótese que a partir de este momento se llamará pieza al conjunto de 4 subpartes bobina) de LG<sub>4</sub> a LG<sub>5</sub>, donde una pieza (4 subpartes a la vez) es cargada en MT<sub>1</sub>. La otra pieza espera en LG<sub>5</sub> hasta el giro de MT<sub>1</sub>. MT<sub>1</sub> gira de LG<sub>5</sub> a LG<sub>6</sub>, donde se desarrolla la operación A, que corresponde al devanado del transformador –Embobinado-. Al tiempo que la operación A (Embobinado) es desarrollada, la pieza no. 2 es cargada en LG<sub>5</sub> a MT<sub>1</sub> en la 2da estación de trabajo de MT<sub>1</sub>. TB<sub>1</sub> posteriormente se traslada a LG<sub>4</sub> con el objeto de recoger una carga mas de dos piezas en RA<sub>1</sub>. Una vez la carga es recolectada, TB<sub>1</sub> regresa a LG<sub>5</sub> para esperar por las piezas provenientes de MT<sub>1</sub>, con las operaciones A y B completas.*

*Una vez completada la operación A en LG<sub>6</sub>, MT<sub>1</sub> gira y las piezas son transportadas a LG<sub>7</sub>, donde posteriormente se desarrolla la operación B (Encintado). Durante el tiempo de la operación B (Encintado) en LG<sub>7</sub>, en LG<sub>6</sub> se desarrolla la operación A sobre la segunda pieza. Concluida la operación B, TB<sub>1</sub> toma los Subensambles (con operaciones A y B completas) de LG<sub>7</sub> a LG<sub>5'</sub>, donde esperaran por la segunda pieza. Al concluir la operación A en la segunda pieza, MT<sub>1</sub> gira de LG<sub>6</sub> a LG<sub>7</sub> para desarrollar la operación B (Encintado) en la segunda pieza. Al terminar la operación B en la segunda pieza. TB<sub>1</sub> toma la segunda pieza de LG<sub>7</sub> a LG<sub>5'</sub>. Cabe mencionar que las operaciones de TB<sub>1</sub> en estos momentos son de carga-descarga, puesto que descarga MT<sub>1</sub> de subensambles (operación A y B) y carga MT<sub>1</sub> con piezas (conjunto de 4 subpartes bobina).*

*Una vez que las dos piezas están situadas en LG<sub>5'</sub>, TB<sub>1</sub> transporta las piezas a LG<sub>8</sub>. Un dispositivo mecánico AC<sub>2</sub> de 3 GDL toma las dos piezas y las transporta de LG<sub>8</sub> a LG<sub>9</sub>, donde la operación C (inmersión en fundente) se lleva a cabo. Una vez completada la operación C, AC<sub>2</sub> traslada las piezas de LG<sub>9</sub> a LG<sub>10</sub>, lugar donde se desarrolla la operación D (Soldadura \_por inmersión\_). Concluida la operación D, AC<sub>2</sub> transporta las piezas de LG<sub>10</sub> a LG<sub>11</sub>, donde son liberadas en un transportador vibratorio de riel (TR<sub>2</sub>)”.*

Los lugares geométricos  $L_{ti}$  se muestran en las figuras 3.3 y 3.4. Las piezas descritas en la crónica anterior se muestran en la figura 2.2 del capítulo 2. Por otro lado, la figura 3.3 muestra la distribución del sensado de ida y la modularización relacionada con el sistema productivo [6]:

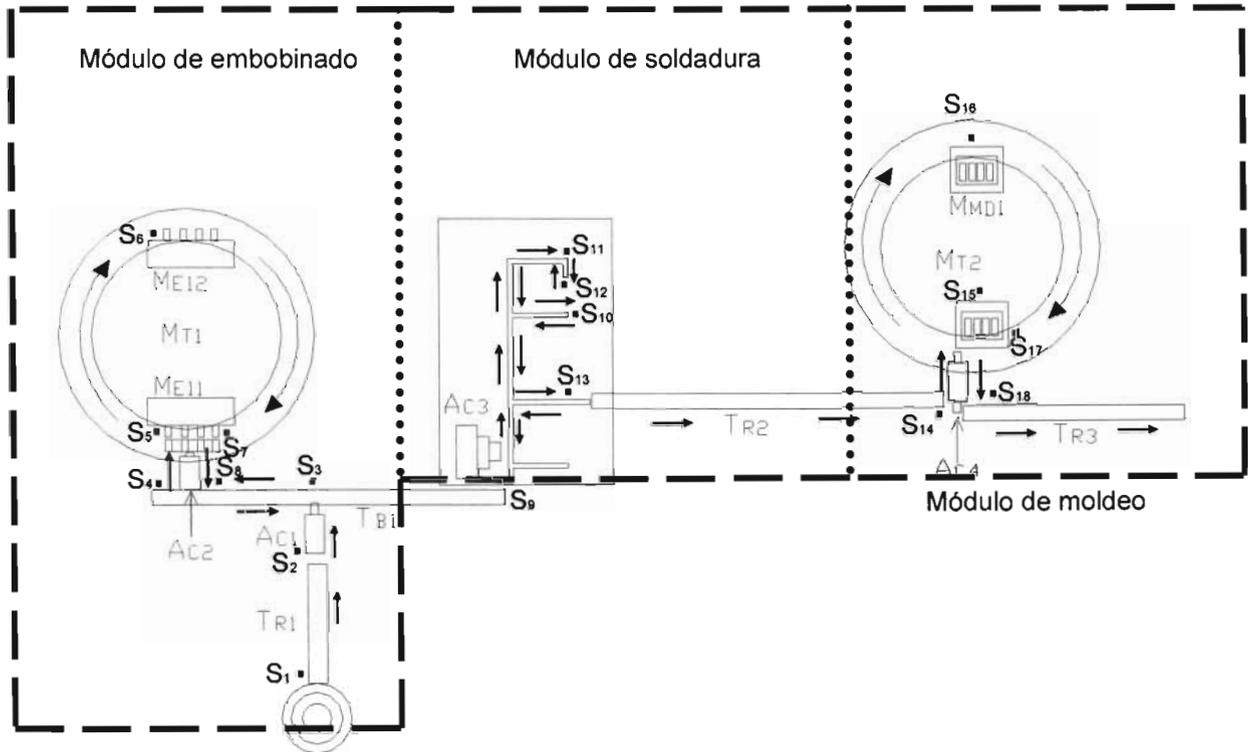


Figura 3.3 Distribución del sensado de ida

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

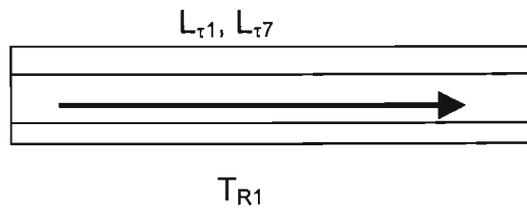
Nomenclatura	Máquina de relación	Descripción
S <sub>1</sub>	T <sub>R1</sub>	S <sub>1</sub> activa a R <sub>1</sub>
S <sub>2</sub>	AC <sub>1</sub>	S <sub>2</sub> activa a AC <sub>1</sub>
S <sub>3</sub>	T <sub>B1</sub>	S <sub>3</sub> activa a T <sub>B1</sub>
S <sub>4</sub>	AC <sub>2</sub>	S <sub>4</sub> 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>7</sub>	M <sub>E11</sub>	S <sub>7</sub> activa a M <sub>E11</sub>
S <sub>8</sub>	AC <sub>2</sub>	S <sub>8</sub> activa a AC <sub>2</sub>

S <sub>9</sub>	A <sub>C3</sub>	S <sub>9</sub> activa a A <sub>C3</sub>
S <sub>10</sub>	A <sub>C3</sub>	S <sub>10</sub> activa a A <sub>C3</sub>
S <sub>11</sub>	A <sub>C3</sub>	S <sub>11</sub> activa a A <sub>C3</sub>
S <sub>12</sub>	A <sub>C3</sub>	S <sub>12</sub> activa a A <sub>C3</sub>
S <sub>13</sub>	T <sub>R2</sub>	S <sub>13</sub> activa a T <sub>R2</sub>
S <sub>14</sub>	A <sub>C4</sub>	S <sub>14</sub> activa a A <sub>4</sub>
S <sub>15</sub>	M <sub>T2</sub>	S <sub>15</sub> activa a M <sub>T2</sub>
S <sub>16</sub>	M <sub>MD1</sub>	S <sub>16</sub> activa a M <sub>MD1</sub>
S <sub>17</sub>	A <sub>C4</sub>	S <sub>17</sub> activa a A <sub>C4</sub>
S <sub>18</sub>	T <sub>R3</sub>	S <sub>18</sub> activa a T <sub>R3</sub>

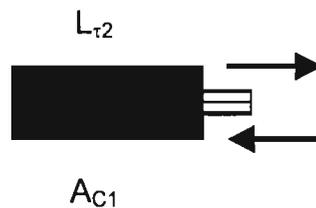
S<sub>i</sub> : sensor principal;

Tabla 3.2 Descripción del sensado de ida

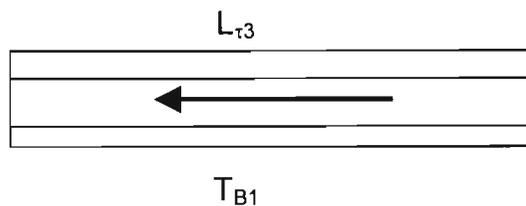
Por otro lado, los lugares geométricos de las trayectorias se muestran en las figuras 3.4 y 3.5:



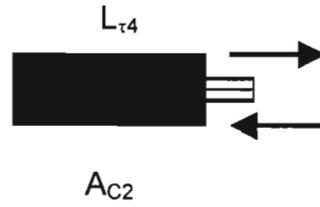
a) Transportador de piezas T<sub>R1</sub>



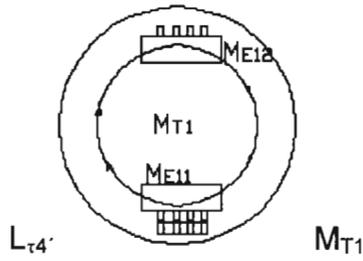
b) Actuador A<sub>C1</sub>



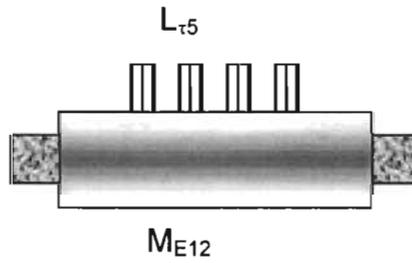
c) Transportador de piezas T<sub>B1</sub>



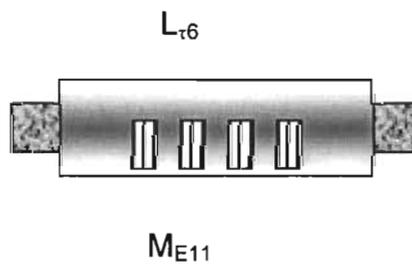
d) Actuador  $A_{C2}$



e) Mesa de trabajo  $M_{T1}$

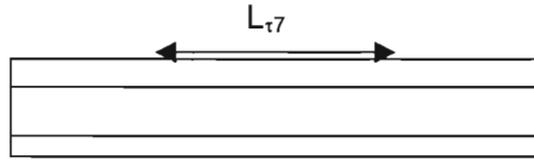


f) Máquina embobinadora  $M_{E12}$

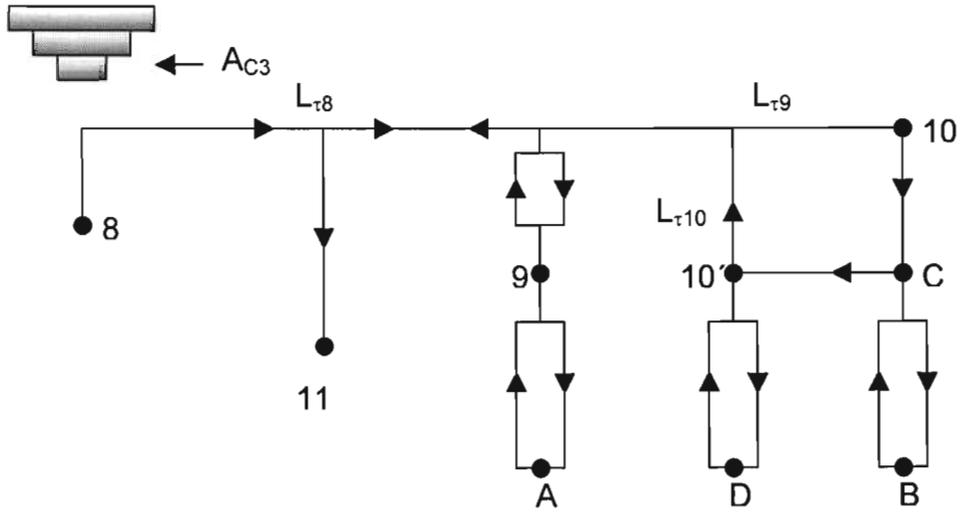


g) Máquina encintadora  $M_{E11}$

Figura 3.4 Lugares geométricos de los ciclos operacionales del módulo de embobinado - empapelado

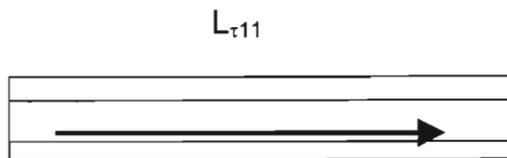


$T_{B1}$   
a) Transportador  $T_{B1}$

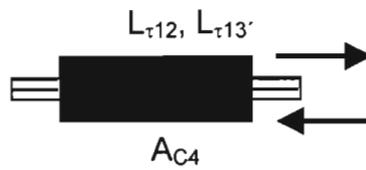


$A_{C3}$

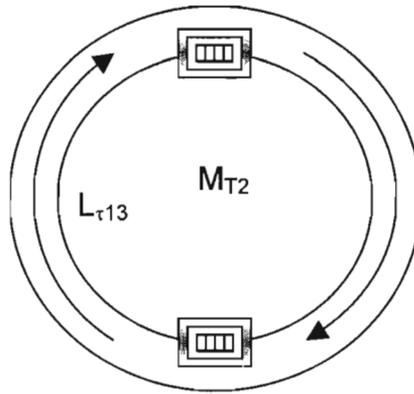
b) Actuador  $A_{C3}$



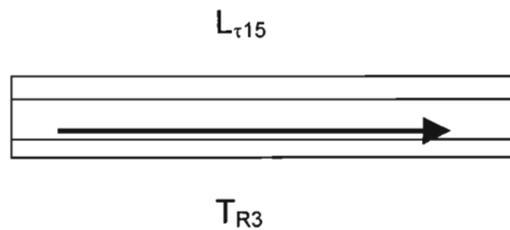
$T_{R2}$   
c) Transportador  $T_{R2}$



$A_{C4}$   
d) Actuador  $A_{C4}$



e) Mesa de trabajo  $M_{T2}$



e) Transportador  $T_{R3}$

Figura 3.5 Lugares geométricos de los ciclos operacionales de los módulos de soldadura y montaje

### 3.3 Resultados del procedimiento de sincronización del módulo de embobinado

Según [1,6], el vórtice relacionado con el módulo de embobinado- empapelado es el mostrado en la figura 3.6.

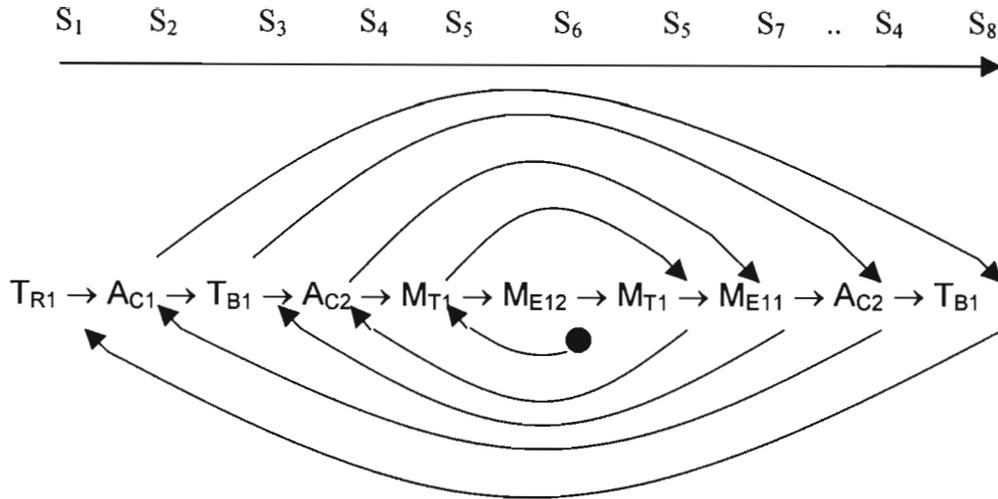


Figura 3.6 Vórtice antecesor del módulo de embobinado y sistema de sensado

Los grupos de sincronización y los sensores son:

Grupos de sincronización [6]:

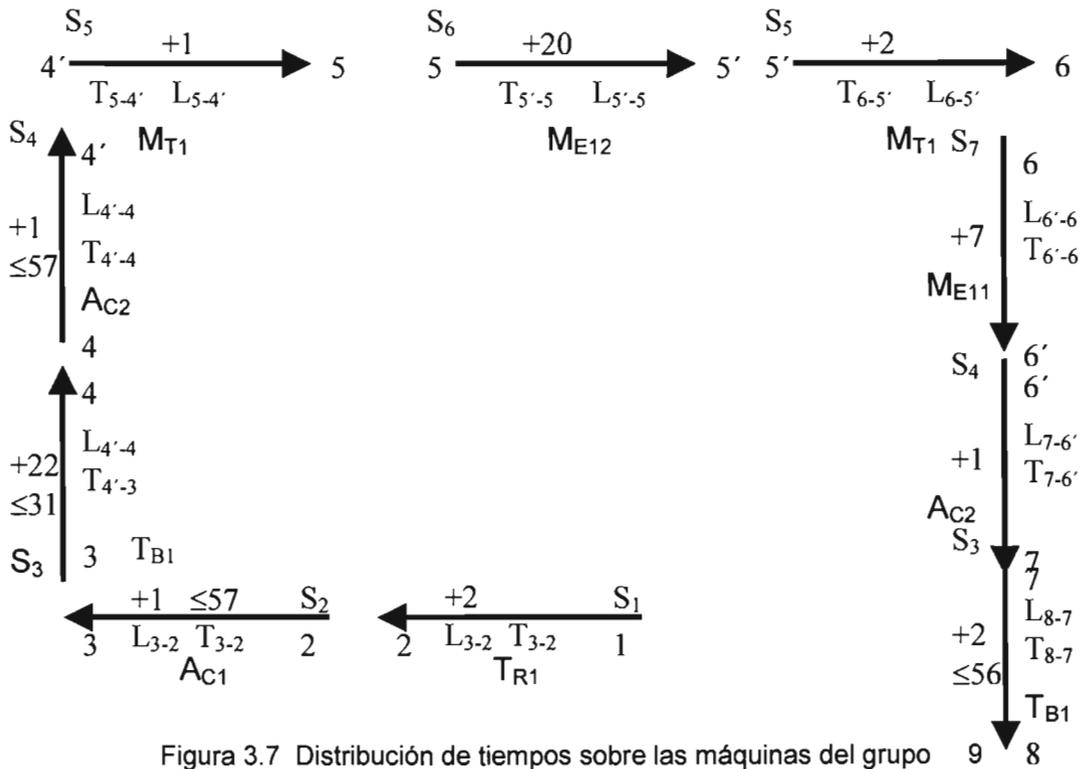
- 1)  $G_1 = \{M_{T1}, M_{E12}\}_{SA}$
- 2)  $G_2 = \{G_1, M_{T1}\} = \{M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}\}_{SB}$
- 3)  $G_3 = \{AC_2, G_2\} = \{AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}\}_{SC}$
- 4)  $G_4 = \{G_3, M_{E11}\} = \{AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}\}_{SD}$
- 5)  $G_5 = \{TB_1, G_4\} = \{TB_1, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}\}_{SE}$
- 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)  $G_9 = \{TR_1, G_8\} = \{TR_1, AC_1, TB_1, AC_2, M_{T1}, M_{E12}, M_{T1}, M_{E11}, AC_2, TB_1\}_{SI}$

Grupos de sensado:

- 1)  $S_A = \{S_5, S_6\}$
- 2)  $S_B = \{S_5, S_A\} = \{S_5, S_6\}$
- 3)  $S_C = \{S_4, S_B\} = \{S_4, S_5, S_6\}$

- 4)  $S_D = \{S_C, S_7\} = \{S_4, S_5, S_6, S_7\}$
- 5)  $S_E = \{S_3, S_D\} = \{S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\}$
- 6)  $S_F = \{S_E, S_4\} = \{S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\}$
- 7)  $S_G = \{S_2, S_F\} = \{S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\}$
- 8)  $S_H = \{S_1, S_G\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\}$
- 9)  $S_I = \{S_G, S_8\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8\}$

El procedimiento de la sincronización local fue realizado usando los pasos descritos en la sección 3.2 de este capítulo. La figura 3.7 muestra la distribución de los tiempos sobre los lugares geométricos relacionados con la máquinas del módulo en cuestión:



Finalmente, la tabla 3.3 muestra los resultados del proceso de sincronización [6].

MÓDULO 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> - S <sub>2</sub>
AC <sub>1</sub>	T <sub>3,2</sub> : + 1	T <sub>2,3</sub> : -1	Intermitente	0	+ 56	S <sub>2</sub> - S <sub>3</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>4</sub> ) . (S <sub>8</sub> - S <sub>9</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> - S <sub>5</sub> ) . (S <sub>7</sub> - S <sub>8</sub> )
MT <sub>1</sub>	T <sub>5,4'</sub> : + 3	0	Ida Pura	+ 55	0	(S <sub>5</sub> - S <sub>6</sub> ) . (S <sub>6</sub> - S <sub>7</sub> )
ME <sub>12</sub>	T <sub>5',5</sub> : + 40	0	Ida Pura	+ 18	0	S <sub>6</sub>
ME <sub>11</sub>	T <sub>6',6</sub> : + 14	0	Ida Pura	+ 44	0	S <sub>7</sub>

Tabla 3.3 Resultados finales del proceso de sincronización

### 3.4 Resultados del procedimiento de sincronización del módulo de soldadura

El vórtice relacionado con el módulo de soldadura es el mostrado en la figura 3.8 [6].

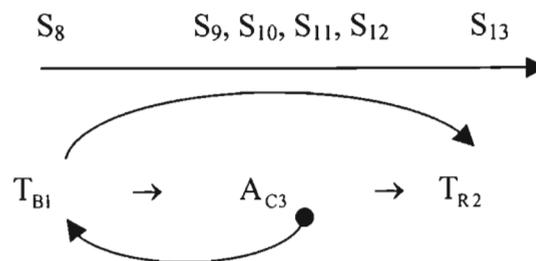


Figura 3.8 Vórtice de sincronización antecesor del módulo de soldadura y sistema de sensado

Los grupos de sincronización y los sensores son [6]:

Grupos de sincronización:

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

Grupos de sensado:

- i)  $S_A = \{S_8, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}\}$

$$ii) S_B = \{S_A, S_{13}\} = \{S_8, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}\}$$

El procedimiento de la sincronización local fue realizado, al igual que en la sección anterior, usando los pasos descritos en la sección 3.2 de este capítulo. La figura 3.9 muestra la distribución de los tiempos sobre los lugares geométricos relacionados con la máquinas del módulo en estudio [6]:

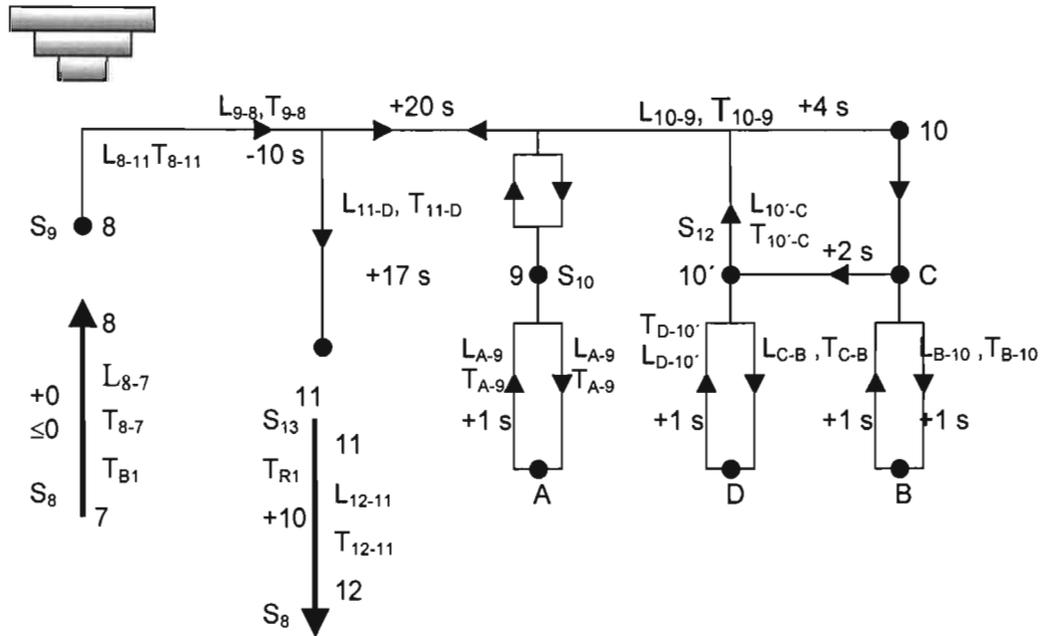


Figura 3.9 Distribución de tiempos sobre las rutas del grupo 2

Finalmente, la tabla 3.4 muestra los resultados del proceso de sincronización [6].

MÓDULO DE SOLDADURA						
TB <sub>1</sub>	T <sub>2,1</sub> : + 0	0	Continuo	0	0	S <sub>8</sub>
AC <sub>3</sub>	T <sub>11,8</sub> : + 48	T <sub>8,11</sub> : -10	Intermitente	0	0	S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub>
TR <sub>2</sub>	T <sub>12,11</sub> : + 10	0	Ida Pura	+ 48	0	S <sub>13</sub>

Tabla 3.4 Resultados finales del proceso de sincronización en el módulo de soldadura

### EL CBOR Y LA SINCRONIZACIÓN GLOBAL

**Introducción.** En esta parte se presenta el Código Binario Operacional Referencial (CBOR) el cual es usado para representar, en código binario, las formas operativas y de control de un sistema productivo serial [1,2,9,10]. Son discutidas algunas consideraciones relacionadas con los tiempos de ida modulares y de recorrido total. Se analizan los elementos primitivos del sistema de control de procesos. Posteriormente, se dan los pasos para construir e interpretar el CBOR. Finalmente, se presenta el proceso de constructibilidad del supermódulo de sincronización global y el CBOR completo.

#### 4.1 Ciclos modulares, tiempo total de ida y algunas consideraciones sobre el supermódulo

En el proceso de la sincronización global se requiere que toda la línea de producción [1] (todos sus módulos) operen sincronizadamente con restricción del TpU. Esto implica la existencia de un “supermódulo” el cual debe integrar todos los tiempos de proceso y el sistema de control de cada uno de los módulos que integran un sistema productivo. Además, dicho supermódulo deberá operar con restricción del TpU. El supermódulo será, por tanto, el último módulo asociado con una línea de producción serial.

Cabe señalar que en un sistema de manufactura tipo serial los módulos de producción que lo componen, están ordenados; es decir,

$$M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow \dots \rightarrow M_i \rightarrow M_{i+1} \rightarrow M_F$$

El módulo  $M_0$  es inicial y  $M_F$  es final. Por tanto,  $M_F$  es el “supermódulo” si:

$$M_F \stackrel{T,C}{\subseteq} M_{i+1} \stackrel{T,C}{\subseteq} M_i \dots \stackrel{T,C}{\subseteq} M_2 \stackrel{T,C}{\subseteq} M_1 \stackrel{T,C}{\subseteq} M_0$$

Aquí,  $\stackrel{T,C}{\subseteq}$  se interpreta como una contención modular en términos de los tiempos de proceso (T) y el sistema de control (C) [1].

Sea  $T_{IDA(MOD)}$  un tiempo de ida modular. Si un sistema productivo serial está compuesto por F- módulos, entonces el tiempo total de ida del sistema de manufactura  $T_{IDA(SM)}$  se obtiene por medio de la siguiente relación:

$$T_{IDA(SM)} = \sum_{i=1}^F T_{IDA(MOD)i}$$

Y, puesto que en un módulo sincronizado localmente satisface la relación:  $T_{IDA(SM)} = F \cdot TpU$ , entonces el tiempo  $T_{IDA(SM)}$  se interpreta de la manera siguiente:

*“Es el tiempo total de recorrido de un componente sobre una línea de producción en el cual el componente es procesado desde las materias primas hasta el producto terminado de tal forma que todas las máquinas han recorrido todas sus rutas de ida”.*

Nótese que si el primer componente ha realizado el recorrido de ida sobre una línea de producción, entonces:

- 1) Todas las máquinas han operado en cuando menos en sus rutas de ida.
- 2) Todos los módulos han sido activados en sus recorridos de ida.
- 3) Todo el sistema de ida ha sido activado.
- 4) El supermódulo; es decir, el final, ha sido activado en su recorrido de ida.

Por otro lado,

- i) Se dice que un módulo ha completado su ciclo operacional si todas las máquinas que lo integran han recorrido las rutas de ida y vuelta.
- ii) El tiempo total de un ciclo operacional modular ( $T_{TCOM}$ ) se obtiene de la manera siguiente:

$$T_{TCOM} = T_{pU} + T_{IDA(SUC)F}$$

Aquí,  $T_{IDA(SUC)F}$  es el tiempo de ida de la máquina sucesora final [1].

La siguiente proposición es importante en este capítulo [1]:

*“Si un supermódulo ha sido activado en sus recorridos de ida de tal forma que se ha manufacturado el primer componente, entonces todos los ciclos operacionales modulares antecesores al supermódulo han sido completados por lo menos una vez.”*

Explícitamente, si se ha producido la primer pieza; es decir, que el supermódulo se halla activado en sus recorridos de ida, entonces:

- 1) El penúltimo módulo ha completado un ciclo operacional.
- 2) El antepenúltimo módulo ha completado dos ciclos operaciones.
- 3) El primer módulo ha completado  $F-1$  ciclos operacionales, siendo  $F$  el número de módulos.

Por tanto, si un sistema productivo está compuesto por  $F = 4$  módulos, entonces: el módulo inicial ha completado 3 ciclos operacionales, el segundo módulo 2, el tercero 1 y el cuarto (supermódulo) ninguno (a menos que su última máquina sucesora del módulo sea de ida pura).

Por otro lado, el número mínimo de sensores de ida; es decir, principales y de completud, se encuentra por medio de la siguiente relación [1]:

$$N_{SIDA} = N_{RUTAS(IDA)}$$

O, equivalentemente:

$$N_{SIDA} = K+1$$

Aquí,  $N_{RUTAS(IDA)}$  es el número de rutas de ida del sistema productivo y “K” es el número total de máquinas. Si una pareja de máquinas trabaja simultáneamente en una misma operación de manufactura usando los mismos tiempos de ida y vuelta, entonces solo se considerará una de ellas en K.

Es importante señalar que la sincronización local de módulos de producción debe estar señalizada en sus extremos; es decir, que el TpU este sensado. Considere la siguiente definición:

“Un sensor se dice de sincronización local o modular si [1,2]:

- 1) Inicializa un módulo.
- 2) Finaliza un módulo.
- 3) Inicia un módulo y/o finaliza otro.

En general, este tipo de sensores son “principales” y, por tanto, ya están distribuidos en el sensado de ida. En casos especiales se agregan nuevos sensores. Por otro lado, un sensor se dice “de sincronización global ” si [1,2,7,8]:

- i) Inicia el primer módulo.
- ii) Finaliza el recorrido de ida del supermódulo; es decir, el último módulo y/o inicializa dicho supermódulo.

Estos sensores, en general, son principales y, por tanto, ya están distribuidos. Por otro lado, existen otro tipo de sensores usados en el control de sistemas productivos y son llamados “bandera”. Dichos sensores se usan para [7,8]:

- 1) Diseñar los sistemas de paro de emergencia.
- 2) Generar señales intermedias para algún propósito de control.
- 3) Señalizar los regresos de la maquinaria a sus punto de partida.
- 4) Son requeridos por alguna restricción de control.

En general los sensores bandera pueden o no pueden ser requeridos en el sistema de control. Por otro lado, el proceso de la sincronización global se caracteriza por [1,2,7,8]:

*“Un sistema productivo se dice globalmente sincronizado si la diferencia temporal entre la primera pieza producida y la segunda es el  $TpU$ ”.*

Además,

*“En un sistema de manufactura globalmente sincronizado, la distribución de piezas de trabajo debe ser tal que no existan alcances de componentes en la línea de producción”.*

Es importante señalar que, al ser sincronizados localmente los módulos usando el método del vórtice, los componentes se distribuyen sobre los puntos extremos de los módulos, esto garantiza que no existan alcances de piezas lo cual, a su vez, implica que al finalizar el recorrido de ida de la línea de producción, todos los sensores de sincronización modular y global estén sensando piezas [1,7,8]. Por tanto, es posible afirmar que la diferencia temporal entre componentes distribuidos sobre la línea de producción es precisamente el  $TpU$ .

## 4.2 Condicionantes de control

En esta sección se discuten algunos aspectos importantes relacionados con el sistema de control de un sistema productivo. Para que una máquina o dispositivo de trabajo pueda iniciar y/o finalizar su operación requiere de una señal o un conjunto de señales que se lo indiquen. Esto es, de sensores. Por tanto, se dice que una máquina “está condicionada” para su operación por un sistema de señales [1,2].

Es necesario, en un sistema productivo, generar señales y, posteriormente, enviarlas a los diferentes sistemas de mando de la maquinaria. Por tanto, se requiere de un dominio operacional (de señales) en el cual sea posible representar los estados de activación de las máquinas y sensores y, en dicho dominio, definir operaciones que permitan el manejo de las señales.

Sea  $A^1 = \{1,0\}$  un dominio binario. Las estructuras  $(A^1, \oplus, \bullet, -)$  y  $(A^1, \underline{\oplus}, \bullet)$  son usadas para el control de las señales [25,26]. Dichas estructuras son conocidas como “álgebra de Boole y álgebra de Zegalkin”, respectivamente. Las operaciones y funciones lógicas relacionadas con las estructuras descritas anteriormente se definen en las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4:

$\oplus$	1	0		$\bullet$	1	0		$\underline{\oplus}$	1	0		X	-X
1	1	1		1	1	0		1	0	1		1	0
0	1	0		0	0	0		0	1	0		0	1

Tabla 4.1 Disyunción    Tabla 4.2 Conjunción    Tabla 4.3 Mod(2)    Tabla 4.4 Negación

Supóngase que  $X_1$  representa un sensor con estados de activación  $X_1 = \{1,0\}$  y  $Y_1$  un elemento de mando de una máquina con estados  $Y_1 = \{1,0\}$ . Considere el siguiente problema:

*“Se requiere controlar una máquina  $M_1(Y_1)$  por medio de dos sensores  $S_1(X_1)$  y  $S_2(X_2)$  de tal forma que dicha máquina opere si uno de los dos sensores está activado”*

El problema descrito anteriormente se modela de la manera siguiente [2]:

$$S_c^0(M_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_1 \vee S_2 \Rightarrow M_1 ; \\ M_1 \Leftrightarrow S_1 \vee S_2 ; \\ Y_1 = X_1 \oplus X_2 ; \end{array} \right.$$

Aquí,  $S_c^0(M_1)$  es el modelo de control de la máquina  $M_1$  [2]. Las primeras dos representaciones están definidas en un dominio proposicional; es decir,  $S_1$ ,  $S_2$  y  $M_2$  se representan por proposiciones y se conectan por los símbolos lógicos “ $\vee$ ” (conectivo “o”),  $\Rightarrow$  (condicional) y  $\Leftrightarrow$  (bicondicional). La última representación es llamada ecuación de estado [1,2]. La tabla siguiente representa la ecuación de estado en términos del dominio operacional  $A^1$  definida anteriormente:

$X_1$	$X_2$	$Y_1$
1	1	1
0	0	0
1	0	1
0	1	1

Tabla 4.5 Representación en  $A^1$  de una ecuación de estado

Por tanto, es posible proponer la siguiente afirmación [2]:

*“Para cada evento de activación/desactivación señalizada de una máquina integrada a un sistema productivo existe un modelo de control”.*

Los modelos de control se clasifican en [2]:

- 1) De ida.
- 2) De sincronización modular.
- 3) De sincronización global.
- 4) Bandera.

De hecho, el número de modelos de control de ida ( $N_{MC}$ ) se obtiene de la manera siguiente:

$$N_{MC} = N_{SIDA}$$

Cabe señalar que tanto  $N_{MCSL}$  como  $N_{MCSG}$  forman parte de  $N_{SIDA}$ . Para finalizar esta sección, es necesario comentar que la ecuación de estado descrita en la tabla 4.5 se puede representar como se muestra en la figura 4.1

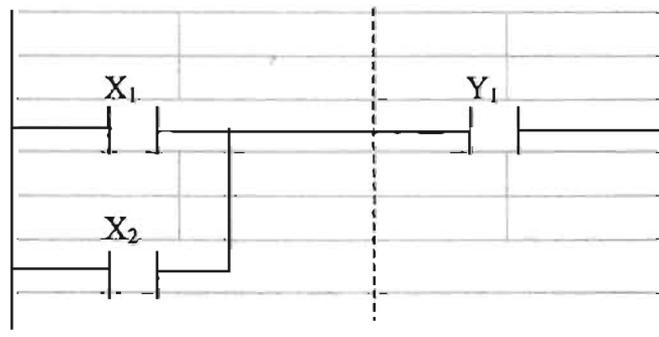


Figura 4.1 Diagrama de contactos

Por tanto, la ecuación de estado se puede representar por medio de un diagrama de contactos el cual se programa en un PLC (Programmable Logic Control).<sup>1,4,5</sup>

### 4.3 El Código Binario Operacional Referencial (CBOR)

El CBOR es un esquema operacional que sirve para representar, en código binario, el sistema de control externo de un sistema productivo, los tiempos de

proceso discretizados, la maquinaria de trabajo, los ciclos operacionales de los módulos de producción y el supermódulo de sincronización global. El CBOR se compone de dos submatrices [1]:

- 1) Tiempo – sensado.
- 2) Maquinaria - tiempo.

El CBOR es una representación por eventos de las formas operacionales de un sistema productivo [1,2,9]. La matriz tiempo-sensado se construye de la manera siguiente [1]:

- 1) En la primera fila de representación se colocan los sensores en el orden siguiente:
  - 1.1) Sensores de ida; es decir, sensores principales y de completud.
  - 1.2) Sensores bandera (si existen).
  - 1.3) Sensores de sincronización (si los sensores de este tipo son principales, estos se marcan en el proceso de la sincronización global).

Cabe mencionar que los sensores de sincronización son, en general, principales y basta con identificarlos sobre la tabla del CBOR.

- 2) Sobre la fila de los sensores se colocan variables  $X_{1,\dots,n}$ , una por cada sensor.
- 3) En la primera columna se colocan los tiempos discretizados unitariamente de la siguiente forma:
  - 3.1) El primer tiempo es  $T_0$ .
  - 3.2) El número de filas ( $N_{FILAS}$ ) de los tiempos de proceso se calcula usando la relación siguiente:  $N_{FILAS} = F \cdot T_p U$
  - 3.3) Colocar casillas intercaladas en la columna de los tiempos de proceso las cuales representarán los estados de activación de los

sensores. Dichas casillas se deben colocar siguiendo el recorrido de ida. Además, las casillas de los sensores bandera se colocan hasta el final.

- 3.4) Colocar, si es necesario, casillas que representan eventos de operación de la maquinaria no señalizados en la columna de los tiempos de proceso.

La tabla siguiente muestra un ejemplo de la matriz tiempo – sentido [1]:

Matriz Tiempo - Sensado								
Sensores								
Sincronización (*)								
Sensado de ida				→	Bandera			
	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>
	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>
T <sub>0</sub>								
T <sub>1</sub>								
T <sub>2</sub>								
cTk <sub>1</sub>								
T <sub>3</sub>								
T <sub>3,4</sub>								
T <sub>4</sub>								
cTk <sub>2</sub>								

Tabla 4.6 Ejemplo de una matriz tiempo –sensado

Note en la tabla anterior que, los tiempos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> son tiempos de proceso, cTk<sub>1</sub> y cTk<sub>2</sub> son casillas que representan estados de activación de sensores o líneas de control y T<sub>3,4</sub> es un tiempo instantáneo asociado con el paro de una máquina no señalizado. Por otro lado, una matriz tiempo – maquinaria se construye de la manera siguiente [1]:

- 1) La primer fila está integrada por la maquinaria de trabajo colocada de acuerdo con el recorrido de ida.
- 2) Sobre las filas de las máquinas se colocan variables Y<sub>1,...,n</sub>, una por cada máquina.

- 3) La columna de tiempo es exactamente igual a la asociada con la matriz tiempo –sensado.

La tabla 4.7 muestra una representación de la matriz maquinaria – tiempo:

<b>Matriz Tiempo - Maquinaria</b>					
<b>Maquinaria</b>					
<b>Recorrido de ida →</b>					
Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</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>1</sub>
					T <sub>2</sub>
					cTk <sub>1</sub>
					T <sub>3</sub>
					T <sub>3,4</sub>
					T <sub>4</sub>
					cTk <sub>2</sub>

Tabla 4.7 Ejemplo de una matriz maquinaria – tiempo

Por tanto, el esquema completo de referencia del CBOR se muestra en la tabla 4.8 [1].

<b>Matriz de Código Binario Operacional Referencial</b>															
<b>Matriz Tiempo - Sensado</b>								<b>Matriz Tiempo - Maquinaria</b>							
<b>Sensores</b>								<b>Maquinaria</b>							
<b>Sincronización (*)</b>															
<b>Sensado de ida</b>								<b>Bandera</b>		<b>Recorrido de ida</b>					
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>1</sub>		
													T <sub>2</sub>		
													cTk <sub>1</sub>		
													T <sub>3</sub>		
													T <sub>3,4</sub>		
													T <sub>4</sub>		
													cTk <sub>2</sub>		

Tabla 4.8 El CBOR, representación de referencia

### 4.3.1 Procedimiento de llenado del CBOR

En esta sección se describen, en términos generales, los pasos para llenar las filas y columnas operativas del CBOR; dichos pasos son los siguientes [1,9]:

- 1) Generar las filas y columnas de referencia de la matriz tiempo – sensado. Anexar a dicha matriz el sistema de sensado bandera si existe.
- 2) Generar las filas y columnas de referencia de la matriz maquinaria - tiempo.

Nota: La información básica usada para los pasos descritos anteriormente son: el sensado de ida y la maquinaria.

- 3) Acoplar las matrices descritas en los pasos anteriores para generar las filas y columnas referenciales del CBOR.
- 4) Llenar la columna de los tiempos de proceso asociada con el CBOR usando la relación :  $N_{CTP} = F \cdot TpU$ ; donde F es el número de módulos.
- 5) Una vez llenada la columna de los tiempos de proceso se debe insertar, sobre dicha columna, los cTki o líneas de control de ida. El número de dichas líneas es igual al número de sensores de ida. La inserción de los cTki se realiza de la manera siguiente:

- 5.1) En  $T_0$  colocar  $cTk_0$ .
- 5.2) Por cada tiempo de finalización del recorrido de ida de cada máquina colocar un cTki; es decir, una línea de control por debajo de la línea de trabajo de dicho tiempo.
- 5.3) El último cTki se coloca al final de la casilla del último tiempo del recorrido de ida total.
- 5.4) Identificar, por medio de un código de colores, los cTki principales y de completud.

6) Llenar la matriz tiempo – sentido de la manera siguiente:

6.1) Aislar del CBOR la matriz tiempo – sentido.

6.2) Asociar el símbolo “1/0” en la intersección entre la fila del  $cT_{ki}$  y la columna del sensor  $i$ . Nótese que si  $i = 4$ , entonces la pareja  $(cT_{k4}, S_4) \rightarrow “1/0”$ .

6.3) Asociar símbolos operacionales a las casillas de la matriz tiempo – sentido; esto es:

- En las casillas  $(cT_{ki}, S_j)$  con  $i \neq j$  de las líneas de control se debe asociar el símbolo “0”.
- El símbolo “0” se asocia también a las casillas  $(T_i, S_j)$  si los sensores operan normalmente abiertos o, en su caso, no están activos o relacionados con  $(T_i, S_j)$ . Aquí,  $T_i$  son los tiempos de proceso.
- El símbolo “1” se relaciona con casillas del tipo  $(T_i, S_j)$ . Dicho símbolo representará activaciones de sensores que operan “normalmente cerrados”.
- Las filas y columnas de la matriz tiempo – sentido deben ser indicadas por al menos uno de los siguientes símbolos: “1/0”, “0” y “1”.

7) Llenar la matriz maquinaria – tiempo con el siguiente procedimiento:

7.1) Las columnas de cada máquina deben llenarse con el símbolo “+1” el cual denota “ida”. El número de casillas señalizadas con “+1” se obtiene, para cada máquina, según el tiempo de ida discretizado. La distribución de los tiempos de ida está ordenada, para cada máquina, por las extensiones de las líneas de control

en la matriz maquinaria–tiempo.

- 7.2) Sobre la fila de las líneas de control se coloca el símbolo “0”.
  - 7.3) En las casillas no relacionadas con el símbolo “+1” se debe asociar el símbolo “0” el cual denotará que, en ese tiempo, una o varias máquinas no están operando.
- 8) Acoplar las matrices tiempo – sensado y maquinaria – tiempo para generar el CBOR de ida. Además, se debe señalar la máquina activada por el sensor asociado. Esto se realiza marcando la casilla  $(T_i, M_k)$  localizada por debajo de la línea de control.
  - 9) Asociar los tiempos de vuelta a la matriz del CBOR generado en el paso anterior. Dichos tiempos completan los ciclos operacionales de cada máquina. Las casillas relacionadas con estos tiempos se deben llenar con el símbolo “-1” el cual representa un tiempo de regreso secundario. Este proceso de llenado implicará que el CBOR se extienda hasta que todos los ciclos operacionales de la maquinaria sean representados.
  - 10) Insertar las líneas de control de sensado bandera y los tiempos especiales usando los puntos siguientes:
    - Si el sensado bandera existe y está asociado con los regresos de algunas máquinas, entonces al final del último tiempo de vuelta se debe insertar la línea de control del sensado bandera.
    - Si la línea de control bandera coincide con otra línea, entonces solo se asocia el símbolo “1/0” a la casilla correspondiente.
    - Las características generales de las líneas de sensado bandera son iguales a las líneas del recorrido de ida.
    - Los tiempos especiales se insertan en el CBOR una vez

caracterizadas las líneas de control completas. Dichos tiempos representan paros casi instantáneos de máquinas no señalizados. Los tiempos especiales, si existen, se colocan de acuerdo a su ubicación en el recorrido de ida de las máquinas. En toda la fila de estos tiempos ( $T_{i, i+1}$ ) se coloca el símbolo "0".

#### 4.3.2 El CBOR del supermódulo

En esta sección se dan los pasos para generar el CBOR asociado con el supermódulo de sincronización global. Se seguirá con el orden de pasos para no perder la secuencia [1].

- 11) Identificar los módulos del sistema productivo; es decir, el inicial y el último y los intermedios si existen y, posteriormente, aislarlos del CBOR.
  - 11.1) Seleccionar el último módulo y eliminar el sensado bandera, los tiempos de vuelta y los tiempos especiales.
  - 11.2) Superponer las líneas de control (con el símbolo 1/0) del sensado de ida del módulo antecesor sobre el CBOR del último módulo. Dicha superposición debe realizarse con el mismo procedimiento de llenado de las líneas de control de ida.
  - 11.3) Si una línea de control del módulo antecesor coincide con una línea de control del último módulo, solo se indica la casilla con el símbolo "1/0" de la línea correspondiente y su código de color.
  - 11.4) Distribuir los tiempos de ida del módulo antecesor sobre el CBOR del último módulo.
  - 11.5) Usar los pasos anteriores las veces que sean necesarios para el caso en que existan F – módulos.
- 12) Caracterizar el supermódulo usando los pasos siguientes:

- 12.1) Las primeras y últimas líneas de control del módulo final y su antecesor deben coincidir.
- 12.2) Caracterizar los ciclos de ida modular y automático interpretando la primera y última línea de control del supermódulo.

### **4.3.3 El CBOR completo**

En esta sección se dan los pasos para generar el CBOR completo.

- 13) Acoplar los CBOR de los módulos antecesores con el supermódulo y su extensión.
  - 13.1) Agregar las líneas de control del sensado bandera tanto en el CBOR del módulo antecesor como en el supermódulo.
  - 13.2) Asociar los tiempos especiales y los tiempos de vuelta.

Cabe señalar que el CBOR completo representa [1]:

- 1) Todas las líneas de control del sistema productivo.
- 2) Todos los ciclos operativos completos de la maquinaria.
- 3) Los ciclos de ida o modular y automático del sistema productivo.
- 4) Todos los tiempos especiales.
- 5) Todas las formas de activación de los sensores.
- 6) El dominio "proposicional" de control.
- 7) El dominio "operacional" de control.

#### 4.3.4 Condicionamientos de control, el sistema de control y CBOR funcional

En esta parte se discuten los condicionamientos de control o, más bien dicho, los requerimientos de control usados para el diseño del sistema de control. Se deben considerar dos aspectos fundamentales [1,2,9]:

- 1) Los requerimientos de restricción del sistema productivo; es decir, aquellas restricciones requeridas por el cliente.
- 2) Los requerimientos necesarios para construir funcionalmente el sistema de control.

En otras palabras el sistema de control debe satisfacer los requerimientos del cliente y los asociados a su propia funcionalidad.

Los requerimientos de control del cliente deben ser satisfechos y representados en el dominio operacional; es decir, por ecuaciones de estado. Así, si un requerimiento indica que una máquina ( $y_1$ ) está condicionado por tres sensores ( $x_1, x_2, x_3$ ) bajo una relación de conjunción, entonces:

$$y_1 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Una vez representados los requerimientos del cliente se debe formar el problema de control de la siguiente manera:

“ Conocidas  $cTki, TpU, X, Y$ , encuentre:

$$S_c = S_c(cTki, TpU, X, Y)$$

tal que:

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

$$1) T_{pU} = \hat{T}_{pU}$$

$$2) R_E = \hat{R}_E$$

sean satisfechas. "

Aquí,  $S_C$  es el sistema de control funcional y  $R_E$  son los requerimientos del cliente.

La hipótesis asociada con el problema de control debe relacionar el supermódulo de sincronización; es decir, con los ciclos modulares y automáticos caracterizados sobre las líneas de control [1].

Por otro lado, la premisa básica de la cual se deduce el problema de control se formula considerando que una pieza de trabajo ha recorrido todos los módulos y es sensada por el último sensor de ida.

De la solución del problema de control se obtienen las líneas de control relacionadas con los ciclos modulares y automáticos tanto de los propios módulos como de toda la línea de producción. Dichas relaciones son representadas en términos de ecuaciones de estado.

Una vez encontradas las líneas de control de los ciclos modular y automático se asocian los requerimientos del cliente y se reconstruyen las ecuaciones de estado formando el sistema de control funcional de la línea de producción.

Cabe señalar que, los requerimientos del sensado de ida pueden ser proporcionados por el cliente o, simplemente, el mismo sistema de control los tomará como restricción de funcionalidad.

Las relaciones del sistema de control se representan en el CBOR generando el CBOR funcional; es decir, la representación completa de los módulos operacionales de la maquinaria y su sistema de control sincronizados local y globalmente a TpU.

Las consideraciones relativas al sistema de control y el CBOR funcional se resumen en los pasos siguientes [1]:

14) Definir los requerimientos de control del cliente y relacionarlos por medio del dominio operacional; es decir, por ecuaciones de estado.

14.1) Definir el problema de control.

14.2) Solucionar el problema de control en términos de sus relaciones con los ciclos de ida y automáticos.

14.3) Asociar los requerimientos del paso 13) y reconstruir las ecuaciones de estado.

14.4) Representar en el CBOR, las relaciones del paso anterior y generar el CBOR funcional.

#### **4.3.5 Interpretación del CBOR funcional, diagrama escalera y algunas consideraciones sobre los dominios proposicional y operacional**

El CBOR funcional está representado por dos dominios: 1) el proposicional y 2) el operacional. Ambos dominios, en términos de control, son equivalentes. Los símbolos "1/0" relacionan dichos dominios en términos de los tiempos de ida y de las activaciones sensor – máquina. Nótese que el hecho de considerar un TpU perfecto y discretizable unitariamente, permite relacionar los dominios en términos de los tiempos de ida.

El dominio proposicional caracteriza las relaciones entre máquinas y sensores en términos de proposiciones, y puesto que su dominio es  $D_{pro} = \{V, F\}$ ; es decir, “V” representa el significado verdadero si tales condiciones se cumplen y “F” representa el valor de falsedad en los significados de las proposiciones [25], entonces:

$$D_{pro} \approx A^1 \quad ; \quad \text{si y solo si } V \Leftrightarrow 1 \text{ y } F \Leftrightarrow 0$$

Nótese que la fórmula:

$$p_1 \Leftrightarrow (\Gamma_1 \vee \Gamma_2) \wedge \Gamma_3 \vee (\neg \Gamma_4) \vee \Gamma_5$$

es equivalente a:

$$y_1 = (x_1 \oplus x_2) \bullet x_3 \oplus (\neg x_4) \oplus x_5$$

siendo,  $p_1$  y  $\Gamma_1 \dots \Gamma_5$  proposiciones asociadas con una máquina y con sensores, respectivamente. Además,  $\neg$ ,  $\vee$ ,  $\wedge$ , y  $|\Leftrightarrow|$  son conectivos que relacionan proposiciones [25].

Por tanto, siempre que las máquinas y sensores del CBOR se representen por proposiciones; es decir, por ejemplo, “ $p_1$ : la máquina  $M_1$  está activada y  $\Gamma_1$ : el sensor  $S_1$  está activado”, entonces el CBOR es un modelo global proposicional. Nótese que el solo hecho de que un sensor esté asociado con una casilla de la matriz tiempo – sensado implica el siguiente sujeto y verbo: “el sensor está” y el símbolo “1/0” representa activado “1” y no activado “0”. Por tanto, una relación  $(S_1, 1/0)$  representa la proposición: “El sensor  $S_1$  está activado” o, en su caso, “el sensor  $S_1$  está no activado”. Es decir;  $1/0 \Leftrightarrow F/V$ .

El dominio proposicional es, de hecho, el primer lenguaje abstracto con que se relacionan diversos eventos en términos de proposiciones. Es decir, es el

lenguaje natural usado para representar los objetos y sus relaciones, en este caso, máquinas y sensores.

Por otro lado, el dominio operacional se usa, por decirlo así, como un lenguaje más abstracto. Se puede afirmar que el control proposicional se usa para programar las líneas de control en un software de alto nivel, en tanto el control operacional se utiliza para construir las líneas de control en un PLC. Así, una representación proposicional es [2]:

$$M_1 \text{ IF ONLY IF } S_1$$

y su equivalencia en términos del dominio operacional es el siguiente:

$$y_1 = x_1$$

y, puesto que toda ecuación de estado se puede representar por un diagrama de contactos, entonces [1]:

*“ El sistema de control relacionado con un CBOR funcional tiene asociado un diagrama escalera construido con las líneas de control y sus relaciones operacionales. ”*

Cabe señalar que los símbolos “0” y “1” (sin considerar los símbolos “+” y “-”) asociados con una columna de la matriz maquinaria – tiempo representan estados de activación de la maquinaria. Así, las secuencias de columna:

1) 0, 1

2) 1, 0

Representan los eventos activación / desactivación o recíprocamente de una máquina.

Por otro lado, los símbolos +1 y -1 denotan el espectro unitario de los ciclos operacionales de la maquinaria. Dichos símbolos se usan, en forma unitaria, puesto que el  $TpU$  es perfecto y representable por un número entero [1].

Las secuencias de columna:

1) +1, -1

2) -1, +1

denotan un seguimiento del recorrido de ida continuo o un paro instantáneo y el cambio en la dirección del movimiento de las máquinas o, más bien dicho de las herramientas. Además, el hecho de que existe una secuencia +1, 0, +1 y siempre que el símbolo "0" sea un tiempo de paro instantáneo no sensado o una línea de control, no implica que la máquina se detenga.

El CBOR funcional y su diagrama escalera asociado permiten representar y programar los modos o formas operacionales de la maquinaria en términos de las líneas de control y sus relaciones. Asimismo, por el hecho de que el  $TpU$  es perfecto y representable por un número entero, entonces [1]:

*" Todo diagrama escalera asociado con un CBOR funcional está gobernado por el  $TpU$ . "*

Cabe señalar que, en la realidad, el diagrama escalera es atemporal y el  $TpU$  no es perfecto lo que implica que las máquinas no sean perfectas. Por tanto, el CBOR funcional y su diagrama escalera asociado solo son esquemas referenciales basados en un volumen de producción perfecto con  $TpU$  perfecto y representable por un número entero y, por tanto, la maquinaria opera en términos "perfectos".

Finalmente, el siguiente paso termina el proceso de interpretación del CBOR.

- 15) Una vez generado el CBOR funcional diseñar el diagrama escalera de control.

En el capítulo 5 de esta tesis se construirá un CBOR funcional y un diagrama escalera ambos relacionados con el estudio de la línea de producción motivo de estudio.

#### **4.4 Ciclo de arranque y ciclo automático**

Para que un sistema productivo opere en términos de su funcionalidad y sobre la base de un volumen de producción fijo, es necesario diseñar un sistema de control capaz de garantizar dos aspectos fundamentales [1,2,9]:

- 1) Que el recorrido de ida de al menos una pieza de trabajo sea satisfecho.
- 2) Que la diferencia temporal entre la primera pieza de trabajo y la segunda sea precisamente el tiempo de producción unitaria.

El diseño del sistema de control tiene como elementos primitivos las líneas de control del CBOR completo y sus relaciones. Estas últimas deben generarse o, dicho de otra manera, deben determinarse en términos de:

“Para que el recorrido de ida de una pieza de trabajo sobre la línea de producción sea satisfecho, es necesario que al menos todo el sensado de ida se halla activado lo que implica que toda la maquinaria también se halla activado. En otras palabras, que las líneas de control hallan funcionado, es decir, que hallan cambiado de estado cuando menos una sola vez.”

A la secuencia de activaciones del ciclo de ida de la maquinaria se le llama “ciclo de arranque”.

Así, si una pieza de trabajo se localiza sobre la región de trabajo; es decir, sobre las rutas de trabajo de la última máquina de la línea de producción y esta máquina ha sido activada, entonces se dice que ha finalizado el ciclo de arranque global del sistema productivo. En otras palabras, en el preciso momento en que el antepenúltimo sensor de ida se halla activado y dicha activación implique que la última máquina se active, entonces ha finalizado el ciclo global de arranque

Por tanto el inicio y término del ciclo global de arranque está gobernado por el primer sensor del sistema y el antepenúltimo, ambos sensores de ida, o en otras palabras por la primera línea de control de ida y antepenúltima del CBOR completo.

Sin embargo, el hecho de que dichas líneas se activen, implica que todas las líneas intermedias de ida han sido activadas. Por tanto,

“El ciclo de arranque global satisface los requerimientos de funcionalidad del sistema en cuando menos el primer proceso de manufactura de la primera pieza de trabajo”.

El ciclo de arranque se divide en [1]:

- 1) Modular.
- 2) Global.

Así, el ciclo de arranque modular está asociado con el sistema de sensado de ida de un módulo en particular. Por tanto, si todas las máquinas finales de cada módulo que componen una línea de producción han sido activadas, entonces los ciclos modulares y el ciclo de arranque global han sido satisfechos.

Cabe hacer notar que, el hecho de que el ciclo de arranque global halla sido satisfecho, no implica que el sistema productivo opere en términos de TpU; es decir, que dicho sistema este globalmente sincronizado.

Observe, por otro lado, que para que el TpU sea satisfecho es necesario que la diferencia temporal entre la primera pieza de trabajo y la segunda sea precisamente el TpU. Sin embargo, dicha diferencia debe trasladarse de la primer pieza a los subproductos. Por tanto, si la diferencia temporal entre la primer pieza y la subparte antecesora; es decir, el subproducto que requiere de la última operación de manufactura u operaciones de manufactura si se trata de un módulo compuesto por más de una máquina de operación principal, es el TpU, implicará que la diferencia entre la primera y segunda pieza terminada sea el TpU y, por tanto, el sistema esta sincronizado globalmente.

Las líneas de control que señalicen, en términos del TpU y, por tanto, en términos de los tiempos de proceso, las localizaciones de la primer pieza de trabajo y las subpartes antecesoras, son llamadas líneas de control para “ciclo automático”.

El ciclo automático es, por tanto, una secuencia de activaciones de los sensores sobre las líneas de control que inicializan y finalizan las operaciones de los módulos que componen una línea de producción serial. De tal forma que, tenga como objetivo principal garantizar la funcionalidad del sistema de manufactura en términos de TpU.

El ciclo automático se divide en [1]:

- 1) Ciclo modular.
- 2) Ciclo global.

Un módulo de producción es gobernado por el ciclo automático si la activación del primer sensor de ida del módulo sucesor condiciona el segundo, tercero, cuarto, etc. ciclo de arranque del módulo antecesor. Dicha condición es por tanto, lo que garantiza la sincronización local y global del sistema productivo.

Nótese que el hecho de que la primera pieza de trabajo se localice sobre un lugar asociado a la finalización de la ruta de ida de la última máquina de tal forma que el último sensor de ida se active implica:

- 1) Si el último sensor de ida condiciona el arranque de todos los módulos antecesores al supermodelo, es decir, el final, entonces se dice que el sistema productivo es gobernado por el ciclo automático global, y por consiguiente, todos los sensores de ida relacionados con el condicionamiento son, al mismo tiempo, sensores de sincronización local y global.
- 2) Si el último sensor de ida se activo, implica que el penúltimo sensor de ida también se activo lo que a su vez implica que el ciclo de arranque global ha sido satisfecho.

Por tanto [1],

“El diseño funcional de un sistema de control que sea capaz de sincronizar local y globalmente a TpU una línea de producción serial depende de los ciclos de arranque y automático globales.”

Para finalizar esta sección, es necesario hacer notar que el sistema de control completo debe integrar los requerimientos de control de cliente.

## CAPÍTULO 5

### EL CBOR Y EL SUPERMÓDULO DE SINCRONIZACIÓN GLOBAL DEL CASO DE ESTUDIO

**Introducción.** En este capítulo se construye, sistemáticamente, el CBOR relacionado con la línea de producción estudiado en esta tesis. Es generado y analizado el “supermódulo de sincronización global”. Del CBOR extendido y funcional, se interpretan las líneas de control y se construye el diagrama escalera. En dicho diagrama, se podrá interpretar los ciclos modulares y automático relacionados con el sistema de control. Se define el sistema del control para el caso de estudio y sus restricciones, así como una hipótesis y una premisa básica. Se usarán las consideraciones de capítulo anterior y los resultados del proceso de la sincronización local descritos en el capítulo 3.

#### 5.1 Filas y columnas de referencia de la matriz tiempo – sensado

De acuerdo con la sección 4.3. del capítulo 4 de esta tesis, la fila de referencia de la matriz tiempo – sensado se genera distribuyendo el sistema de sensado sobre dicha fila siguiendo el orden del sensado de “ida”. Además, se deben agregar casillas asociadas con los mecanismos  $A_{C1}$ ,  $A_{C2}$ ,  $A_{C3}$  y  $T_{B1}$  con el propósito de detectar si retornaron a sus puntos de partida; esto es, dos sensores bandera, uno ( $S_{B1}$ ) para  $A_{C1}$ , otro ( $S_{B2}$ ) para  $A_{C2}$ , otro más ( $S_{B3}$ ) para  $T_{B1}$  y un último ( $S_{B4}$ ) para  $A_{C3}$ . Por tanto, existen 15 sensores principales ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$ ,  $S_7$ ,  $S_8$ ,  $S_8'$ ,  $S_9$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{14}$ ), 5 de completud ( $S_{C1}$ ,  $S_{C2}$ ,  $S_{C3}$ ,  $S_{C4}$ ,  $S_{C5}$ ) y 4 sensores bandera ( $S_{B1}$ ,  $S_{B2}$ ,  $S_{B3}$ ,  $S_{B4}$ ). La tabla siguiente muestra la fila y columna de referencia de la matriz tiempo – sensado ( $M_{T-S}$ ).

Matriz de Código Binario Operacional Referencial																		
Matriz Tiempo - Sensado																		
Sensores																		
Sincronización (-)																		
Sensado de ida																		
	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>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>
T / M	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>C1</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>C2</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>8'</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>C3</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>C4</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>C5</sub>
T <sub>0</sub>																		

Tabla 5.1 Fila y columna de referencia de M<sub>T-S</sub>

Note en la figura anterior que, se ha agregado sobre la fila de los sensores las variables X<sub>1</sub> ... X<sub>20</sub>. Dichas variables serán usadas en las secciones posteriores para construir las ecuaciones de estado asociadas con el sistema de control. Por otro lado, en la columna de los tiempos de proceso solo se ha puesto, como referencia, el tiempo T<sub>0</sub>.

## 5.2 Filas y columnas de referencia de la matriz maquinaria – tiempo

En esta sección se generan las filas y columnas de referencia relacionadas con la matriz maquinaria – tiempo (M<sub>M-T</sub>). De acuerdo con la sección 4.3.1 del capítulo 4, la fila principal de M<sub>M-T</sub> se genera distribuyendo la maquinaria de trabajo sobre dicha fila siguiendo el orden de recorrido de la maquinaria. Además, por encima de la fila principal se coloca otra fila, la cual contiene las variables Y<sub>1</sub> ... Y<sub>9</sub>. Dichas variable, junto con las variables X<sub>1</sub> ... X<sub>12</sub>, conforman el dominio operacional de control. La tabla siguiente muestra las filas y columnas de referencia de la matriz M<sub>M-T</sub>:

Matriz Tiempo - Maquinaria									
Maquinaria									
→									
Recorrido de ida									
Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>	
TR <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	TB <sub>1</sub>	AC <sub>2</sub>	MT <sub>1</sub>	ME <sub>12</sub>	ME <sub>11</sub>	AC <sub>3</sub>	TR <sub>2</sub>	T / M
									T <sub>0</sub>

Tabla 5.2 Filas y columnas de referencia de la matriz M<sub>M-T</sub>

Cabe recordar que, la columna de referencia de los tiempos de la matriz  $M_{M-T}$  es igual a la columna de la matriz  $M_{T-S}$ .

### 5.3 Filas y columnas de referencia del CBOR

Las filas y columnas de referencia del CBOR se generan uniendo las matrices  $M_{T-S}$  y  $M_{M-T}$ . Dicha unión se muestra en la tabla 5.3.

Matriz de Código Binario Operacional Referencial																		
Matriz Tiempo - Sensado									Matriz Tiempo - Maquinaria									
Sensores									Maquinaria									
Sincronización (→)									→									
Sensado de ida					Bandera				Recorrido de ida									
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	...	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>24</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>
T / M	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>		S <sub>14</sub>	•S <sub>B1</sub>	•S <sub>B2</sub>	•S <sub>B3</sub>	•S <sub>B4</sub>	TR <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	TB <sub>1</sub>	AC <sub>2</sub>	MT <sub>1</sub>	ME <sub>12</sub>	ME <sub>11</sub>	AC <sub>3</sub>	TR <sub>2</sub>

Tabla 5.3 Filas y columnas de referencia del CBOR

Es importante señalar que, la fila que contiene sensores y máquinas denota "el dominio proposicional" del CBOR y la fila que integra las variables  $X_1 \dots X_{24}$  y  $Y_1 \dots Y_9$  representa "el dominio operacional" del CBOR. En tanto la columna de tiempos relaciona, en el tiempo, ambos dominios.

### 5.4 Llenado de la Fila de Tiempos de Proceso

En esta sección se caracteriza la columna de los tiempos de proceso asociada con el CBOR. En este caso, solo se tomarán en cuenta los tiempos de proceso sin incluir los  $cT_{ki}$ . De acuerdo con la sección 4.3.1 del capítulo 4, el número de casillas de los tiempos de proceso ( $N_{CTP}$ ) se encuentran por medio de la relación:

$$N_{CTP} = F \cdot T_{pU}$$

Puesto que  $F = 2$ ; es decir, dos módulos y el  $T_{pU} = 58$  s, entonces  $N_{CTP} = 116$  s. tabla 5.4 muestra la columna de los tiempos del CBOR:

Matriz de Código Binario Operacional Referencial											
Matriz Tiempo - Sensado									Matriz Tiempo - Maquinari		
Sensores									Maquinaria		
Sincronización (*) →									→		
Sensado de ida →					Bandera				Recorrido de ida		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	...	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	...	X <sub>24</sub>	Y <sub>1</sub>	...	Y <sub>9</sub>
T / M	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	*S <sub>B1</sub>	*S <sub>B3</sub>	*S <sub>B4</sub>	TR <sub>1</sub>	AC <sub>3</sub>	TR <sub>2</sub>
t <sub>1</sub>											
t <sub>2</sub>											
t <sub>3</sub>											
⋮											
t <sub>56</sub>											
t <sub>57</sub>											
t <sub>58</sub>											
t <sub>59</sub>											
t <sub>60</sub>											
t <sub>61</sub>											
⋮											
t <sub>114</sub>											
t <sub>115</sub>											
t <sub>116</sub>											
T / M	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	*S <sub>B1</sub>	*S <sub>B3</sub>	*S <sub>B4</sub>	TR <sub>1</sub>	AC <sub>3</sub>	TR <sub>2</sub>
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	...	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	...	X <sub>24</sub>	Y <sub>1</sub>	...	Y <sub>9</sub>

Tabla 5.4 Columna de los tiempos de proceso

Es importante señalar que el tiempo  $T_0$  es en realidad un  $cT_{ki}$  y, por tanto, la contabilización de los tiempos de proceso se inicia en el tiempo  $T_1$ .

### 5.5 Inclusión de los $cT_{ki}$ de ida en el CBOR

En esta sección se generan las filas de los  $cT_{ki}$  o líneas de control del CBOR. En este caso, dichas líneas están asociadas únicamente con el orden del "sensado de ida". De acuerdo con la sección 4.3.1 del capítulo 4, el número de líneas de control se determina por el número sensores de ida. Por tanto, existen 20  $cT_{ki}$  de ida. La colocación de dichas líneas se realiza contabilizando, sobre la fila de los tiempos de proceso, los tiempos de ida de cada máquina e insertando, por

debajo de cada tiempo final de ida, la fila cTki correspondiente. La tabla 5.5 muestra la inclusión de las líneas de control de ida sobre el CBOR. Cabe mencionar que se eliminará las líneas de referencia del CBOR esto con el propósito de no repetir información.

Por otro lado, cabe señalar que la diferencia temporal entre cada cTki, debe ser precisamente el tiempo de ida de la máquina gobernada por el sensor de inicio y de término. El siguiente código de colores será usado para identificar los cTki:

- 1) Gris : cTki principales.
- 2) Azul : cTki de completud.
- 3) Verde : cTki bandera.
- 4) Rojo : cTki de sincronización.

Una combinación de colores indicará que una o varias líneas de control serán, al mismo tiempo, una pareja, terna o cuadrúpleta de cTki con alguna de las cuatro características o tipos de elementos de señalización.

Matriz de Código Binario Operacional Referencial																									
Matriz Tiempo - Sensado															Matriz Tiempo - Maquinaria										
Sensores															Maquinaria										
Sincronizacion (τ)																									
Sensado de Ida															Bandera				Recorrido de Ida						
T / M	X <sub>1</sub>	...	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	...	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	...	X <sub>24</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	...	Y <sub>9</sub>	T / M			
	S <sub>1</sub>	...	S <sub>6</sub>	S <sub>C1</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>C2</sub>	S <sub>8</sub>	...	S <sub>C4</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>C5</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	-S <sub>B1</sub>	...	-S <sub>B4</sub>	TR <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	TB <sub>1</sub>	AC <sub>2</sub>	TR <sub>2</sub>				
cT <sub>K0</sub>																							cT <sub>K0</sub>		
⋮																								l <sub>4</sub>	
cT <sub>K3</sub>																								cT <sub>K3</sub>	
⋮																								l <sub>6</sub>	
cT <sub>K7</sub>																								cT <sub>K7</sub>	
⋮																								l <sub>9</sub>	
cT <sub>K8</sub>																								cT <sub>K8</sub>	
⋮																								l <sub>27</sub>	
cT <sub>K10</sub>																								cT <sub>K10</sub>	
l <sub>35</sub>																								l <sub>35</sub>	
cT <sub>K11</sub>																								cT <sub>K11</sub>	
l <sub>38</sub>																								l <sub>38</sub>	
cT <sub>K12</sub>																								cT <sub>K12</sub>	
⋮																								l <sub>37</sub>	
cT <sub>K13</sub>																								cT <sub>K13</sub>	
l <sub>48</sub>																								l <sub>48</sub>	
cT <sub>K14</sub>																								cT <sub>K14</sub>	
⋮																								l <sub>49</sub>	
cT <sub>K15</sub>																								cT <sub>K15</sub>	
l <sub>56</sub>																								l <sub>56</sub>	
cT <sub>K16</sub>																								cT <sub>K16</sub>	
l <sub>57</sub>																								l <sub>57</sub>	
cT <sub>K17</sub>																								cT <sub>K17</sub>	



$$7) (cTk_{28}, S_{11}) \cong (cTk_{29}, S_{C4}) \cong (cTk_{30}, S_{12}) \cong 1/0$$

$$8) (cTk_{31}, S_{C5}) \cong (cTk_{36}, S_7) \cong 1/0$$

Las relaciones cTki con la fila de sensores se muestra en la tabla 5.6

Cabe señalar que las relaciones de control mostradas en la tabla anterior, son equivalentes a las relaciones en el dominio operacional en términos de la discretización unitaria de los tiempos de proceso.

Por otro lado, las casillas de la matriz maquinaria – tiempo se llenan usando los resultados descritos en la tablas 3.3 y 3.4 del capítulo 3. Para este caso, el símbolo asociado con las casillas (Mk, Ti) es “+1” el cual denota tiempos de ida. La tabla 5.7 muestra la distribución de los tiempos de ida sobre la matriz maquinaria – tiempo.

T / M	Sensado de ida																				Bandera				
	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>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>24</sub>	
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>	S <sub>16</sub>	S <sub>17</sub>	S <sub>18</sub>	S <sub>19</sub>	S <sub>20</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>23</sub>	S <sub>24</sub>	
cT <sub>101</sub>	1/0																								
b <sub>1</sub>																									
cT <sub>102</sub>		1/0																							
b <sub>2</sub>																									
cT <sub>103</sub>			1/0																						
b <sub>3</sub>																									
cT <sub>104</sub>				1/0																					
b <sub>4</sub>																									
cT <sub>105</sub>					1/0																				
b <sub>5</sub>																									
cT <sub>106</sub>						1/0																			
b <sub>6</sub>																									
cT <sub>107</sub>							1/0																		
b <sub>7</sub>																									
cT <sub>108</sub>								1/0																	
b <sub>8</sub>																									
cT <sub>109</sub>									1/0																
b <sub>9</sub>																									
cT <sub>110</sub>										1/0															
b <sub>10</sub>																									
cT <sub>111</sub>											1/0														
b <sub>11</sub>																									
cT <sub>112</sub>												1/0													
b <sub>12</sub>																									
cT <sub>113</sub>													1/0												
b <sub>13</sub>																									
cT <sub>114</sub>														1/0											
b <sub>14</sub>																									
cT <sub>115</sub>															1/0										
b <sub>15</sub>																									
cT <sub>116</sub>																1/0									
b <sub>16</sub>																									
cT <sub>117</sub>																	1/0								
b <sub>17</sub>																									
cT <sub>118</sub>																		1/0							
b <sub>18</sub>																									
cT <sub>119</sub>																			1/0						
b <sub>19</sub>																									
cT <sub>120</sub>																					1/0				
b <sub>20</sub>																									



lea				+1				
cTki8								
lea			+1					
lea			+1					
cTki8								
lea	+1							+1
lea	+1							+1
cTki8								
lea		+1						+1
cTki0								
lea			+1					+1
cTki1								
lea				+1				+1
cTki2								
lea					+1			+1
cTki3								
lea				+1				+1
cTki4								
lea				+1	+1			+1
cTki5								
lea					+1			+1
cTki6								
lea					+1			+1
cTki7								
lea					+1			+1
cTki8								
lea					+1			+1
cTki9								
lea					+1	+1		+1
cTki0								
lea					+1	+1		+1
cTki1								
lea					+1	+1		+1
cTki2								
lea					+1	+1		+1
cTki3								
lea					+1	+1		+1
cTki4								
lea					+1	+1		+1
cTki5								
lea					+1	+1		+1
cTki6								
lea					+1	+1		+1
cTki7								
lea					+1	+1		+1
cTki8								
lea					+1	+1		+1
cTki9								
lea					+1	+1		+1
cTki0								
lea					+1	+1		+1
cTki1								
lea					+1	+1		+1
cTki2								
lea					+1	+1		+1
cTki3								
lea					+1	+1		+1
cTki4								
lea					+1	+1		+1
cTki5								
lea					+1	+1		+1
cTki6								
lea					+1	+1		+1
cTki7								
lea					+1	+1		+1
cTki8								
lea					+1	+1		+1
cTki9								

Tabla 5.7 Distribución de los tiempos de ida sobre la matriz  $M_{M-T}$  incluyendo los  $cTki$  de ida

Note en la tabla anterior que, se han incluido los  $cTki$  de ida sobre el inicio y finalización de cada recorrido de ida de las máquinas. Dicha inclusión tiene como principal objetivo relacionar las matrices  $M_{T-S}$  y  $M_{M-T}$ .

### 5.7 Acoplamiento de las submatrices del CBOR para el recorrido de ida

En esta sección se acoplan las matrices  $M_{T-S}$  y  $M_{M-T}$  usando para este propósito, las líneas de control. Dicho acoplamiento genera el CBOR asociado con el recorrido de ida; en otras palabras, se relaciona la tripleta  $(T_i, S_j, M_k)$  por medio

de las líneas de control cTki. La tabla 5.8 muestra el CBOR asociado con el recorrido de ida.

Note en la tabla 5.8 que se ha identificado cada línea de control con su maquinaria asociada con lo cual el dominio proposicional se relaciona con el dominio operacional; esto es:

- 1)  $(cTk_0, S_1) \cong (X_1, Y_1) \cong 1/0$
- 2)  $(cTk_1, S_2) \cong (X_2, Y_2) \cong 1/0$
- 3)  $(cTk_2, S_3) \cong (X_3, Y_3) \cong 1/0$
- 4)  $(cTk_3, S_4) \cong (X_4, Y_4) \cong 1/0$
- 5)  $(cTk_4, S_5) \cong (X_5, Y_5) \cong 1/0$
- 6)  $(cTk_5, S_6) \cong (X_6, Y_6) \cong (cTk_5, S_4) \cong (X_4, Y_4) \cong 1/0$
- 7)  $(cTk_8, S_{C1}) \cong (cTk_8, S_5) \cong (X_7 \cdot X_5, Y_5) \cong 1/0$
- 8)  $(cTk_9, S_7) \cong (X_8, Y_7) \cong (cTk_9, S_6) \cong (X_6, Y_6) \cong 1/0$
- 9)  $(cTk_{10}, S_{C2}) \cong (X_9, Y_4) \cong 1/0$
- 10)  $(cTk_{13}, S_{C1}) \cong (X_7 \cdot X_5, Y_5) \cong 1/0$
- 11)  $(cTk_{14}, S_7) \cong (X_8, Y_7) \cong 1/0$
- 12)  $(cTk_{15}, S_{C2}) \cong (X_9, Y_4) \cong 1/0$
- 13)  $(cTk_{16}, S_8) \cong (cTk_{16}, S_8') \cong (X_{10} * X_{11}, Y_3) \cong 1/0$
- 14)  $(cTk_{18}, S_9) \cong (X_{12}, Y_8) \cong 1/0$
- 15)  $(cTk_{26}, S_{10}) \cong (X_{13}, Y_8) \cong 1/0$
- 16)  $(cTk_{27}, S_{C3}) \cong (X_{14}, Y_8) \cong 1/0$
- 17)  $(cTk_{28}, S_{11}) \cong (X_{15}, Y_8) \cong 1/0$
- 18)  $(cTk_{29}, S_{C4}) \cong (X_{16}, Y_8) \cong 1/0$
- 19)  $(cTk_{30}, S_{12}) \cong (X_{17}, Y_8) \cong 1/0$
- 20)  $(cTk_{31}, S_{C5}) \cong (X_{18}, Y_8) \cong 1/0$
- 21)  $(cTk_{36}, S_{13}) \cong (X_{19}, Y_9) \cong 1/0$









- 1)  $(cTk_3, S_{B1}) \cong (X_{21}, Y_2) \cong 1/0$
- 2)  $(cTk_5, S_{B2}) \cong (X_{22}, Y_4) \cong 1/0$
- 3)  $(cTk_{19}, S_{B3}) \cong (X_{23}, Y_2) \cong 1/0$
- 4)  $(cTk_{40}, S_{B4}) \cong (X_{24}, Y_1) \cong 1/0$

### 5.9 Representación y caracterización del supermódulo de sincronización global

En esta sección se genera el CBOR particular asociado con el supermódulo de sincronización global. Para ello, es necesario aislar el módulo de Embobinado, que para este caso, es inicial, del módulo de Soldadura el cual representa el módulo final. Dicho módulo es llamado "supermódulo". Las tablãs 5.11 y 5.12 muestran los CBOR,s relacionados con cada uno de los módulos que componen el sistema productivo motivo de estudio:

	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>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>24</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>					
T/M	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>C1</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>C2</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>C3</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>C4</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>C5</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>23</sub>	S <sub>24</sub>	TR <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	TB <sub>1</sub>	AC <sub>2</sub>	MT <sub>1</sub>	ME <sub>12</sub>	ME <sub>11</sub>	AC <sub>3</sub>	TR <sub>2</sub>	T/M					
cTk <sub>0</sub>	1.0																																		cTk <sub>0</sub>			
h <sub>1</sub>																											+1									h <sub>1</sub>		
h <sub>2</sub>																											+1									h <sub>2</sub>		
cTk <sub>1</sub>		1.0																																		cTk <sub>1</sub>		
h <sub>3</sub>																													+1								h <sub>3</sub>	
cTk <sub>2</sub>			1.0																																		cTk <sub>2</sub>	
h <sub>4</sub>																																					h <sub>4</sub>	
cTk <sub>3</sub>				1.0																																	cTk <sub>3</sub>	
h <sub>5</sub>																																					h <sub>5</sub>	
cTk <sub>4</sub>					1.0																																cTk <sub>4</sub>	
h <sub>6</sub>																																					h <sub>6</sub>	
cTk <sub>5</sub>				1.0		1.0																															cTk <sub>5</sub>	
h <sub>7</sub>																																					h <sub>7</sub>	
cTk <sub>6</sub>					1.0																																	cTk <sub>6</sub>
h <sub>8</sub>																																						h <sub>8</sub>
h <sub>9</sub>																																						h <sub>9</sub>
h <sub>10</sub>																																						h <sub>10</sub>
h <sub>11</sub>																																						h <sub>11</sub>
h <sub>12</sub>																																						h <sub>12</sub>
h <sub>13</sub>																																						h <sub>13</sub>
h <sub>14</sub>																																						h <sub>14</sub>
h <sub>15</sub>																																						h <sub>15</sub>
h <sub>16</sub>																																						h <sub>16</sub>
h <sub>17</sub>																																						h <sub>17</sub>
h <sub>18</sub>																																						h <sub>18</sub>
h <sub>19</sub>																																						h <sub>19</sub>
h <sub>20</sub>																																						h <sub>20</sub>
h <sub>21</sub>																																						h <sub>21</sub>
h <sub>22</sub>																																						h <sub>22</sub>
h <sub>23</sub>																																						h <sub>23</sub>
h <sub>24</sub>																																						h <sub>24</sub>
h <sub>25</sub>																																						h <sub>25</sub>
h <sub>26</sub>																																						h <sub>26</sub>











La primera observación indica que la primera línea del supermódulo caracteriza:

- 1) La finalización del ciclo de ida modular del módulo de embobinado. ( $Y_8 = X_{12} \mid Y_1 = X_1 * X_{12}$ ).
- 2) La inicialización del primer ciclo automático del módulo de embobinado. ( $Y_1 = X_1 * X_{12}$ ).
- 3) La inicialización del ciclo de ida modular del módulo de soldadura. ( $Y_8 = X_{12}$ )

Por otro lado, la segunda observación caracteriza:

- 1) La finalización del ciclo modular total. ( $S_{14} - X_{20}$ )
- 2) La inicialización del segundo ciclo automático del módulo de embobinado. ( $Y_1' = X_1 * X_{12}$ ).
- 3) La inicialización del ciclo automático del módulo de soldadura. ( $Y_8' = X_{12}$ )
- 4) La inicialización del ciclo automático global del sistema productivo.

Cabe señalar que, el hecho de que el sistema productivo inicialice el ciclo automático, implica que al finalizar el segundo recorrido de ida del módulo de soldadura, se genere la segunda pieza de trabajo, esto es a TpU. Por tanto, si un sistema de manufactura inicia su ciclo automático, entonces dicho sistema ha sido sincronizado globalmente. Además, un supermódulo de sincronización global tiene asociada la siguiente característica:

*“Todos los módulos antecesores superpuestos en el módulo final inician y terminan sus rutas de ida en las líneas de control inicial y final del supermódulo.”*

Por otro lado,  $S_1$ ,  $S_9$  y  $S_{14}$  son sensores de sincronización global, puesto que  $S_1$  inicia el sistema productivo,  $S_9$  inicia el supermódulo y  $S_{14}$  termina el recorrido





Note en la tabla descrita anteriormente que las líneas de control del sensado bandera han sido superpuestas sobre el CBOR completo, puesto que dicho código debe representar toda la transición de operaciones y eventos de control de los dos módulos. Además, se han colocado los eventos de operación del tercer ciclo modular del módulo de marcaje y el segundo inicio modular del módulo de soldadura. Por otro lado, el CBOR completo se interpreta de la siguiente manera:

- 1) CBOR del módulo antecesor: Representa las formas operacionales y de control del módulo de embobinado en su primera activación modular.
- 2) CBOR del supermódulo: Representa las formas operacionales y de control del supermódulo (módulo final) y las formas operacionales y de control del módulo antecesor. Este último módulo (embobinado) se ha activado por segunda vez.
- 3) CBOR de extensión: Esta parte del código puede o no puede existir. Existe si el regreso de una máquina excede la última línea de control del supermódulo. No existe si el regreso de la última máquina (o penúltima) del supermódulo coincide con la última línea de control (por ejemplo una banda no tiene recorrido de vuelta). La extensión del CBOR, si existe, representa:
  - 1) La última línea del sensado bandera si la última máquina requiere de este tipo de sensores.
  - 2) El tercer inicio del módulo de embobinado.
  - 3) El segundo inicio del módulo de soldadura.

## 5.12 Condicionamientos de control y CBOR funcional

En esta sección se analizarán los condicionamientos de control asociados con el CBOR completo. La representación de dichos condicionamientos en el código dará como resultado el CBOR funcional.

Para poder generar los condicionamientos se deben considerar los siguientes aspectos:

- 1) El balanceo de piezas sobre toda la línea de producción.
- 2) El condicionamiento de operación máquina por máquina para la coordinación y la sincronización local.
- 3) La verificación de los regresos, a sus puntos de origen, de las máquinas y/o dispositivos de trabajo.
- 4) Los condicionamientos modulares para la sincronización global.
- 5) Los sistemas de paro de emergencia.

Por otro lado, un condicionamiento se llama “puntual” si un sensor de cualquier tipo condiciona la operación de una máquina. Un condicionamiento se llama “local”, si un sensor (no asociado directamente con la máquina) o varios sensores condicionan las operaciones de una o varias máquinas en un módulo de producción.

También, un condicionamiento se llama “intermodular”, si un sensor de un módulo condiciona una o varias máquinas de otro módulo. El condicionamiento se llama “de sincronización modular”, si uno o varios sensores gobiernan las operaciones iniciales y/o finales de los módulos. Finalmente, un

condicionamiento se llama "global", si existen sensores que gobiernan el inicio y término de las operaciones de toda una línea de producción.

Los condicionamientos están asociados con las líneas de control y se pueden generar de la manera siguiente:

- 1) Condicionamiento sobre líneas de control coincidentes.
- 2) Condicionamiento sobre líneas de control no coincidentes.

Supóngase los siguientes requerimientos de control( $R_3$ ):

- 1) El sensado de ida debe condicionar las operaciones de cada máquina de acuerdo con su orden.
- 2) Se debe condicionar el segundo inicio de cada módulo con su término.
- 3) El segundo inicio de operaciones del módulo de embobinado debe condicionarse con el primer inicio del módulo de soldadura.
- 4) El segundo inicio del módulo de embobinado se condiciona con el regreso de la banda  $TB_1$ .
- 5) Todas las piezas deben estar señalizadas cuando se localicen al final de los recorridos de ida modular y dicha señalización gobierna el tercer arranque del módulo de embobinado y el segundo arranque del módulo de soldadura.
- 6) El inicio y término de las operaciones de la línea de producción deben estar señalizadas y condicionan el tercer inicio del módulo de embobinado y el segundo inicio del módulo de soldadura.

Es importante señalar que los condicionamientos de control en realidad son requerimientos y, para satisfacerlos, es necesario usar el dominio operacional y sus operaciones lógicas. Esto es:

1) El condicionamiento del sensado de ida es:

- a)  $y_1 = x_1$ ;    b)  $y_2 = x_2$ ;    c)  $y_3 = x_3$ ;    d)  $y_4 = x_4$   
e)  $y_5 = x_5$ ;    f)  $y_6 = x_6$ ;     $y_4 = x_4 \cdot x_6$ ;    g)  $y_5 = x_5 \cdot x_7$   
h)  $y_7 = x_8$ ;     $y_6 = x_6$ ;    i)  $y_4 = x_9$ ;    j)  $y_5 = x_5 \cdot x_7$   
k)  $y_7 = x_8$ ;    l)  $y_4 = x_9$ ;    m)  $y_3 = x_{10} \cdot x_{11}$   
n)  $y_8 = x_{12}$ ;    o)  $y_8 = x_{13}$ ;    p)  $y_8 = x_{14}$ ;    q)  $y_8 = x_{15}$   
r)  $y_8 = x_{16}$ ;    s)  $y_8 = x_{17}$ ;    t)  $y_8 = x_{18}$ ;    u)  $y_9 = x_{19}$

2) El segundo requerimiento es satisfecho si:

$$y_1 = x_1 \cdot x_{12}$$

$$y_8 = x_{12} \cdot x_{20}$$

3) La expresión:

$$y_1 = x_1 \cdot x_{12}$$

satisface el tercer requerimiento.

4) Para el caso del requerimiento 4) se tiene:

$$y_8 = x_8 \cdot x_{11}$$

5) Las expresiones:

$$y_1 = x_1 \cdot x_{12} \quad ; \quad y_9 = x_{12}$$

satisface el quinto requerimiento.

6) El requerimiento 6) se satisface si

a)  $y_1 = x_1 \cdot x_{12} \cdot x_{20}$

b)  $y_8 = x_1 \cdot x_{12} \cdot x_{20}$

Es importante señalar que, el hecho de haber caracterizado las formas de condicionamiento asociadas con los requerimientos, no implica que dichas formas sean los modelos definitivos de control. En realidad las formas de condición representan parte de los elementos compuestos del diseño del control de operaciones.

### 5.12.1 Diseño del sistema de control operacional

Para poder diseñar el sistema de control de un sistema de manufactura serial se plantea el siguiente problema:

“ Dados;  $X$ ,  $Y$ ,  $T_{pU}$  y  $cT_{ki}$ , encuentre:

$$S_C = S_C(X, Y, cT_{ki}, T_{pU})$$

tal que:

$$1) R_E = \hat{R}_E$$

$$2) T_{pU} = \hat{T}_{pU}$$

sean satisfechas. ”

Aquí,  $R_E$  es el conjunto de requerimientos de control.

Considere ahora la siguiente hipótesis:

*“ En un sistema productivo serial globalmente sincronizado a  $T_{pU}$  existe un conjunto de líneas de control que gobiernan el sistema de control operacional de una línea de producción. El diseño de dicho sistema depende de las relaciones entre el ciclo automático total y el ciclo de arranque global y del número de módulos que integra la línea de producción.”*

La solución al problema definido anteriormente se obtiene bajo un simple

proceso de sistematización; esto es:

Premisas:

- 1) El sistema productivo está compuesto por dos módulos.
- 2) El sistema inicia su primer ciclo automático total.

El desarrollo del problema es el siguiente:

- 1) Si se inicia el primer ciclo automático total, entonces:

$Y_9 = X_{19}$	Activación del último sensor de ida.
$Y_8 = X_{12}$	Activación del primer sensor de ida del supermódulo.
$Y_1 = X_1 \cdot X_{12}$	Activación del primer sensor de ida del módulo de ensamble.
$Y_1 = X_1 \cdot X_{12} \cdot X_{20}$	Inicio doblemente condicionado del módulo de ensamble como lo marca el ciclo automático.
$Y_8 = X_1 \cdot X_{12} \cdot X_{20}$	Inicio doblemente condicionado del módulo de soldadura como lo marca el ciclo automático

- 2) Si el ciclo automático total se inicia, entonces finalizó el ciclo total de arranque; es decir:

$$y_9 = x_{19}$$

$$y_8 = x_{18}$$

$$y_8 = x_{17}$$

$$y_8 = x_{16}$$

$$y_8 = x_{15}$$

$$y_8 = x_{14}$$

$$y_8 = x_{13}$$

$$y_8 = x_{12}$$

$$y_3 = x_{10} \cdot x_{11}$$

$$y_4 = x_9$$

$$y_7 = x_8$$

$$y_5 = x_5 \cdot x_7$$

$$y_4 = x_9$$

$$y_6 = x_6 ; y_7 = x_8$$

$$y_5 = x_5 \cdot x_7$$

$$y_4 = x_4 \cdot x_6 ; y_6 = x_6$$

$$y_5 = x_5$$

$$y_4 = x_4$$

$$y_3 = x_3$$

$$y_2 = x_2$$

$$y_1 = x_1$$

3) Si  $F = 2$  y  $Y_1 = X_1 \cdot X_{12} \cdot X_{20}$  y además  $Y_8 = X_1 \cdot X_{12} \cdot X_{20}$  entonces:

$$3.1) \quad Y_1 = X_1''' \cdot X_{12}'' \cdot X_{20}$$

$$3.2) \quad Y_8 = X_1''' \cdot X_{12}'' \cdot X_{20}$$

Aquí,  $X_1'''$  y  $X_{12}''$  representan la tercera y segunda activación de los sensores de ida iniciales de cada modulo.

4) Las secuencias de activaciones sensor – máquina son:

$$4.1) Y_1 = X_1' \rightarrow Y_1 = X_1'' \cdot X_{12}' \rightarrow Y_1 = X_1''' \cdot X_{12}'' \cdot X_{20}$$

$$4.2) Y_8 = X_{12}' \rightarrow Y_8 = X_1''' \cdot X_{12}'' \cdot X_{20}$$

5) Si  $Y_1 = X_1'' \cdot X_{12}'$ , entonces:  $Y_2 = X_2'$ ,  $Y_3 = X_3'$  y  $Y_4 = X_4'$

6) Si  $Y_1 = X_1''' \cdot X_{12}'' \cdot X_{20}$ , entonces:  $Y_2 = X_2''$ ,  $Y_3 = X_3''$  y  $Y_4 = X_4''$

Supóngase que no se consideran el número de activaciones de los sensores, entonces:

$$\begin{array}{l}
 \text{SC}_{\text{PRE}} \left\{ \begin{array}{l}
 y_1 = x_1 \\
 y_2 = x_2 \\
 y_3 = x_3 \\
 y_4 = x_4 \\
 y_5 = x_5 \\
 y_6 = x_6 \quad ; \quad y_4 = x_4 \cdot x_6 \\
 y_5 = x_5 \cdot x_7 \\
 y_7 = x_8 \quad ; \quad y_6 = x_6 \\
 y_4 = x_9 \\
 y_5 = x_5 \cdot x_7 \\
 y_7 = x_8 \\
 y_4 = x_9 \\
 y_3 = x_{10} \cdot x_{11} \\
 y_8 = x_{12} \quad ; \quad y_1 = x_1 \cdot x_{12} \\
 y_2 = x_2 \\
 y_3 = x_3 \\
 y_4 = x_4 \\
 y_5 = x_5
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{SC}_{\text{PRE}} \\
 \text{Continuación}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 y_6 = x_6 \quad ; \quad y_4 = x_4 \cdot x_6 \\
 y_8 = x_{13} \\
 y_8 = x_{14} \\
 y_8 = x_{15} \quad ; \quad y_5 = x_5 \cdot x_7 \\
 y_6 = x_6 \quad ; \quad y_7 = x_8 \quad ; \quad y_8 = x_{16} \\
 y_8 = x_{17} \\
 y_8 = x_{18} \\
 y_4 = x_9 \\
 y_5 = x_5 \cdot x_7 \\
 y_7 = x_8 \quad ; \quad y_9 = x_{19} \\
 y_4 = x_9 \\
 y_3 = x_{10} \cdot x_{11}
 \end{array}
 \right.$$

Aquí,  $\text{SC}_{\text{PRE}}$  es el sistema de control inicial. Es inicial puesto que falta introducir los requerimientos de control  $R_E$ . Para ello considere las siguientes condiciones:

- 1) La pareja ( $\text{SC}_{\text{PRE}}$ ,  $R_E$ ) conforman el sistema de control completo.
- 2) El  $\text{SC}_{\text{PRE}}$  es quien garantiza la funcionalidad del sistema productivo y, por tanto, los requerimientos  $R_E$  no pueda modificar al  $\text{SC}_{\text{PRE}}$  de tal forma que:
  - a) Que la funcionalidad del control se afecte
  - b) Que la sincronizaciones locales y globales sean afectadas.

Es importante hacer notar que el sistema  $\text{SC}_{\text{PRE}}$  solo acepta modificaciones de extensión y de condicionamiento de  $R_E$ . Considere las siguientes reglas:

- 1) Si una condición de  $R_E$  es equivalente con una condición de  $\text{SC}_{\text{PRE}}$ , entonces  $\text{SC}_{\text{PRE}}$  bajo esa condición no se modifica.
- 2) Si una condición de  $R_E$  es equivalente con un solo término de una condición de  $\text{SC}_{\text{PRE}}$ , entonces  $\text{SC}_{\text{PRE}}$  no se modifica.

- 3) Si una condición de  $R_E$  integra un término o toda la condición de  $SC_{PRE}$ , entonces la condición de  $R_E$  modifica en extensión a  $SC_{PRE}$ .

Obsérvese que bajo estas reglas el sistema de control completo es el siguiente:

$$\begin{array}{l}
 SC_{FIN} \left\{ \begin{array}{l}
 y_1 = x_1 \\
 y_2 = x_2 \\
 y_3 = x_3 \\
 y_4 = x_4 \\
 y_5 = x_5 \\
 y_6 = x_6 \quad ; \quad y_4 = x_4 \cdot x_6 \cdot x_{22} \\
 y_5 = x_5 \cdot x_7 \\
 y_7 = x_8 \quad ; \quad y_6 = x_6 \\
 y_4 = x_9 \cdot x_{22} \\
 y_5 = x_5 \cdot x_7 \\
 y_7 = x_8 \\
 y_4 = x_9 \cdot x_{22} \\
 y_3 = x_{10} \cdot x_{11} \\
 y_8 = x_{12} \quad ; \quad y_1 = x_1 \cdot x_{12} \\
 y_2 = x_2 \cdot x_{21} \cdot x_{23} \\
 y_3 = x_3 \\
 y_4 = x_4 \\
 y_5 = x_5 \\
 y_6 = x_6 \quad ; \quad y_4 = x_4 \cdot x_6 \cdot x_{22} \\
 y_8 = x_{13} \\
 y_8 = x_{14} \\
 y_8 = x_{15} \quad ; \quad y_5 = x_5 \cdot x_7 \\
 y_6 = x_6 \quad ; \quad y_7 = x_8 \quad ; \quad y_8 = x_{16} \\
 y_8 = x_{17} \\
 y_8 = x_{18} \\
 y_4 = x_9 \cdot x_{22}
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{SC}_{\text{FIN}} \\
 \text{Continuación}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 y_5 = x_5 \cdot x_7 \\
 y_7 = x_8 \quad ; \quad y_9 = x_{19} \\
 y_4 = x_9 \cdot x_{22} \\
 y_3 = x_{10} \cdot x_{11}
 \end{array}
 \right.$$

Aquí,  $\text{SC}_{\text{FIN}}$  es el sistema de control final. Nótese que las modificaciones reales del  $\text{SC}_{\text{PRE}}$  fueron por anexión; es decir, por la introducción de los requerimientos  $R_E$  relacionados con el sensado bandera.

### 5.12.2 CBOR funcional

En esta sección se presenta el CBOR funcional y su diagrama escalera. La tabla 5.16 muestra el código binario funcional:

**Matriz de Código Binario Operacional Referencial**

Matriz de Código Binario Operacional Referencial																																
Matriz Tiempo - Sensado												Matriz Tiempo - Maquinaria																				
Sensores												Maquinaria																				
Sincronizacion (-)												Sincronizacion (-)																				
Sensado de ida												Bandera				Recorrido de ida																
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>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>24</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>

T / M	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>C1</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>C2</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>C3</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>C4</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>C5</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	-S <sub>B1</sub>	-S <sub>B2</sub>	-S <sub>B3</sub>	-S <sub>B4</sub>	TR <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	TB <sub>1</sub>	AC <sub>2</sub>	MT <sub>1</sub>	ME <sub>12</sub>	ME <sub>11</sub>	AC <sub>3</sub>	TR <sub>2</sub>	T / M				
cT <sub>101</sub>	1/0																																		cT <sub>101</sub>		
t <sub>1</sub>																											+1									t <sub>1</sub>	
t <sub>2</sub>																											+1									t <sub>2</sub>	
cT <sub>102</sub>		1/0																																		cT <sub>102</sub>	
t <sub>3</sub>																												+1								t <sub>3</sub>	
cT <sub>103</sub>			1/0																																	cT <sub>103</sub>	
t <sub>4</sub>																																				t <sub>4</sub>	
cT <sub>104</sub>				1/0																																cT <sub>104</sub>	
t <sub>5</sub>					1/0																															t <sub>5</sub>	
cT <sub>105</sub>				1/0		1/0																														cT <sub>105</sub>	
t <sub>6</sub>																																				t <sub>6</sub>	
cT <sub>106</sub>					1/0																																cT <sub>106</sub>
t <sub>7</sub>																																					t <sub>7</sub>
cT <sub>107</sub>						1/0																															cT <sub>107</sub>
t <sub>8</sub>																																					t <sub>8</sub>
cT <sub>108</sub>																																					cT <sub>108</sub>
t <sub>9</sub>																																					t <sub>9</sub>
t <sub>10</sub>																																					t <sub>10</sub>
t <sub>11</sub>																																					t <sub>11</sub>
t <sub>12</sub>																																					t <sub>12</sub>
t <sub>13</sub>																																					t <sub>13</sub>
t <sub>14</sub>																																					t <sub>14</sub>
t <sub>15</sub>																																					t <sub>15</sub>
t <sub>16</sub>																																					t <sub>16</sub>
t <sub>17</sub>																																					t <sub>17</sub>
t <sub>18</sub>																																					t <sub>18</sub>
t <sub>19</sub>																																					t <sub>19</sub>
t <sub>20</sub>																																					t <sub>20</sub>
t <sub>21</sub>																																					t <sub>21</sub>
t <sub>22</sub>																																					t <sub>22</sub>
t <sub>23</sub>																																					t <sub>23</sub>
t <sub>24</sub>																																					t <sub>24</sub>
t <sub>25</sub>																																					t <sub>25</sub>
t <sub>26</sub>																																					t <sub>26</sub>
cT <sub>109</sub>					1/0		1/0																														cT <sub>109</sub>
t <sub>27</sub>																																					t <sub>27</sub>
cT <sub>110</sub>						1/0		1/0																													cT <sub>110</sub>
t <sub>28</sub>																																					t <sub>28</sub>
t <sub>29</sub>																																					t <sub>29</sub>
t <sub>30</sub>																																					t <sub>30</sub>
t <sub>31</sub>																																					t <sub>31</sub>
t <sub>32</sub>																																					t <sub>32</sub>
t <sub>33</sub>																																					t <sub>33</sub>





Tabla 5.16 CBOR funcional

Matriz de Código Binario Operacional Referencial																																						
Matriz Tiempo - Sensado																	Matriz Tiempo - Maquinaria																					
Sensores																	Maquinaria																					
Sincronización (-)																	Recorrido de ida																					
Sensado de ida																	Bandera				Recorrido de ida																	
T / M	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>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>24</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>	T / M				
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	SC1	S <sub>7</sub>	SC2	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	SC3	S <sub>11</sub>	SC4	S <sub>12</sub>	SC5	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	-SB1	-SB2	-SB3	-SB4	TR <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	TB <sub>1</sub>	AC <sub>2</sub>	MT <sub>1</sub>	ME <sub>12</sub>	ME <sub>11</sub>	AC <sub>3</sub>	TR <sub>2</sub>						
t <sub>95</sub>																																				t <sub>95</sub>		
t <sub>96</sub>																																					t <sub>96</sub>	
t <sub>97</sub>																																					t <sub>97</sub>	
t <sub>98</sub>																																					t <sub>98</sub>	
t <sub>99</sub>																																					t <sub>99</sub>	
t <sub>100</sub>																																					t <sub>100</sub>	
t <sub>101</sub>																																					t <sub>101</sub>	
t <sub>102</sub>																																					t <sub>102</sub>	
t <sub>103</sub>																																						t <sub>103</sub>
t <sub>104</sub>																																						t <sub>104</sub>
t <sub>105</sub>																																						t <sub>105</sub>
CT <sub>105</sub>							1/0																														CT <sub>105</sub>	
t <sub>106</sub>																																						t <sub>106</sub>
CT <sub>106</sub>								1/0										1/0																				CT <sub>106</sub>
t <sub>107</sub>																																						t <sub>107</sub>
t <sub>108</sub>																																						t <sub>108</sub>
t <sub>109</sub>																																						t <sub>109</sub>
t <sub>110</sub>																																						t <sub>110</sub>
t <sub>111</sub>																																						t <sub>111</sub>
t <sub>112</sub>																																						t <sub>112</sub>
t <sub>113</sub>																																						t <sub>113</sub>
CT <sub>113</sub>								1/0																														CT <sub>113</sub>
t <sub>114</sub>																																						t <sub>114</sub>
CT <sub>114</sub>																																						CT <sub>114</sub>
t <sub>115</sub>																																						t <sub>115</sub>
CT <sub>115</sub>																																						CT <sub>115</sub>
t <sub>116</sub>																																						t <sub>116</sub>
CT <sub>116</sub>	1/0																																					CT <sub>116</sub>

# CONCLUSIONES

A través de este trabajo de tesis fueron cumplidos los objetivos siguientes:

- 1) Se sincronizaron globalmente tres módulos de la línea Midcom Inc usando el CBOR.
- 2) Se generó el sistema de control para sincronización local y global.
- 3) Fueron presentados los proyectos relacionados con la línea Midcom Inc.

En esta tesis se aplicó el método desarrollado en [1], para sincronizar globalmente dos módulos de producción relacionados con la línea Midcom Inc. Los resultados obtenidos se resumen en los puntos siguientes:

- La aplicación del método en el procedimiento de la sincronización global resultó sencilla, clara y eficiente, puesto que al ser paso a paso dicho método, su conducción permitió facilitar la construcción del CBOR y el diseño del sistema de control.
- Es necesario realizar primero, el procedimiento de la sincronización local, pues de él depende la construcción del CBOR y el ciclo de arranque.
- Los tipos de componentes manufacturados resultan no ser importantes para realizar la sincronización global, puesto que solo el sistema de sensado principal está asociado con los componentes y la sincronización global se refiere a sensores, maquinas y tiempos.
- El CBOR y el método del vórtice pueden ser aplicados a cualesquier línea de producción serial.

- La concepción sistemática del supermódulo permitió generar el procedimiento de la sincronización global y, además, del supermódulo se generaron las líneas de control principales y sus relaciones para construir el sistema de control operacional.
- Se debe proponer una discretización no unitaria de los tiempos de proceso, para tener un control mas aproximado de los modos operativos de la maquinaria.
- Para cada volumen de producción se requiere de un nuevo CBOR y, por tanto, es necesario automatizar tanto los procedimientos de la sincronización local como la global, de tal forma que se posible construir el CBOR más rápido.

Es importante señalar que, con esta tesis se concluyen los proyectos académicos realizados a la línea Midcom Inc. Se puede concluir que, es necesario contar con la ayuda de las universidades para que colaboren con las industrias en la solución de los problemas, pues solo así se podrá generar verdaderos proyectos de investigación y aplicación industrial, los cuales permitan, por un lado, que la tecnología hecha por mexicanos sea trasladada a las empresas, y por otro lado, que la industria financie proyectos con los cuales pueden solucionar sus problemas.

Futuros trabajos por desarrollar relacionados con esta tesis son:

- Sincronización local y global con TpU discretizado no unitario.
- EL CBOR de líneas de producción no serial.
- Automatización del CBOR.
- Metodología para simplificar el diseño de control usando CBOR.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JIMÉNEZ E., Reyes L., Galindo F., García D., González I., Hito O., Mercado I. 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] MURILLO I. Representación Abstracta de las Transformaciones Geométricas de un transformador eléctrico usado en telecomunicaciones. (2004). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [4] PORTILLO S. Distribución y Caracterización Preliminar de Maquinaria Usando Circunferencias de Distribución de una Celda de Manufactura Real. (2004). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [5] 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.
- [6] HITO O. Sincronización Local Usando el Método del Vórtice, de la Línea MIDCOM INC. (Por presentarse). (Tesis de Maestría en Ingeniería

Mecánica) UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.

- [7] JIMÉNEZ E., Reyes A., García D., González L., González I., Campos A., Barbosa. Sincronización Local de una Celda de Manufactura Didáctica Usando el Método del Vórtice. SOMIM. (2003) Veracruz Ver., México
- [8] 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. México.
- [9] 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. México.
- [10] 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.
- [11] CASTILLO, L., Fernández, J.,González, A. Automatic Generation of Control Secuences for Manufacturing Systems Based on Partial Order Planning Techniques. Artificial Intelligence in Engineering. (2000) Vol 14. p.p 15-30.
- [12] HU, W. Starr, A., Leung, T. Two Diagnostic Models for PLC Controlled Flexible Manufacturing Systems. International Journal of Machine Tools and Manufacture.(1999) Vol. 39 p.p 1979-1991.
- [13] W. Hu, A. Starr, T. Leung. Operational Fault Diagnosis of Manufacturing Systems. Journal of Materials Processing Technology. (2002) 5808. p.p

1-10.

- [14] PASCALIN T., Le P., Marchand H., Rutten E. The Signal Data Flow Methology Applied to a Production Cell. (1995). INRIA, Rapport de Recherche N0 2522, France.
  
- [15] CHAUVET F., Proth J. Scheduling and Controlling Work-In\_Process An On-line Study for Shop Problems. (2000). INRIA, Rapport de Recherche N0 3950, France.
  
- [16] CHUANG C., Lan X., Chen J. A Systematic Procedure for Designing State Combination Circuits in PLC,s (1999). Journal of Industrial Technology. Vol 15 N0 3.
  
- [17] FÉLIX J. Sincronización Local Usando el Método del Vórtice, de la Línea MIDCOM INC. (Por presentarse). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica) UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
  
- [18] COHEN M., Nagel E. Introducción a la Lógica y al Método Científico: Lógica Aplicada y Método Científico II. (1961). Harcour, Brace World Inc., Argentina.
  
- [19] COHEN M., Nagel E. Introducción a la Lógica y al Método Científico: Lógica Aplicada y Método Científico I. (1961). Harcour, Brace World Inc., Argentina.
  
- [20] MARTÍNEZ J. Modelación Cinemática y de Trayectoria de un Robot Cartesiano para la Aplicación de la operación de soldadura en la línea MIDCOM INC. (Por presentarse). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica) UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de

Posgrado, Sección Mecánica.

- [21] 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. México.
  
- [22] L. Marín. Las Ecuaciones de Volúmenes Modificadas. (2000) (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
  
- [23] JIMÉNEZ E., Reyes A., Galindo F., Esquer H., González I., Luna J., Mercado M., Portillo S. Simulación Computacional de una Trayectoria Continua para la Aplicación de Soldadura por Inmersión de Estaño de un Componente Electrónico. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Por presentarse en Congreso 2003.
  
- [24] JIMÉNEZ, E., Reyes, L., Portillo, S., González, J., Tinajero, L., Valdés C. Caracterización y Distribución Preliminar de Maquinaria Usando Ecuaciones de Forma y Circunferencia de Distribución. SOMIM, (2002).
  
- [25] JIMÉNEZ, E., Reyes, L., Torres, D., Ruelas, J., Danzos, A. Sistematización del álgebra de Boole en el conjunto binario. Informe interno de investigación DEPFI-SME-MME-DMEC-MAV-01-2001. UNAM –ITESCA. ISBN 968-36-9840-9
  
- [26] F. Gécseg and I. Peák. Algebraic Theory of Automata. (1972). Akadémiai kiado. Budapest.