

01173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CARACTERIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE  
MANUFACTURA REAL USANDO  
CIRCUNFERENCIAS DE DISTRIBUCIÓN: UNA  
APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE FORMA

**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. SAUL PORTILLO ARANGURÉ**



ASESOR: M. EN I. EUSEBIO JIMÉNEZ LÓPEZ

MÉXICO, D. F. CIUDAD UNIVERSITARIA

2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **Agradecimientos**

A Dios trino y uno, que hace todas las cosas con maestría; que en su sabiduría me ha concedido la vida y la oportunidad de aprehender poniéndome oportunidades delante de mí y la capacidad de decidir por ellas.

A UNAM, quien ha abierto las puertas al interior de la república, arriesgándose a lo que pocas universidades del centro del país, mi profunda admiración y respeto.

Al ITESCA, por su valentía en pleno desarrollo y crecimiento, en buscar nuevos horizontes interinstitucionales beneficiando a más profesionistas en esta región del noroeste del país y a sí misma.

Al M.I. Eusebio Jiménez López, que como maestro y asesor, me mostró con su ejemplo, que sólo el trabajo en la investigación será capaz de lograr el desarrollo del país, tanto en la ciencia como en la tecnología, con el compromiso del desgaste personal por los ideales personales.

A los compañeros del camino, dentro de la maestría que siempre dispuestos a apoyar y colaborar, han hecho de esta experiencia, el entendimiento pragmático de la solidaridad auténtica.

A los familiares y amigos, que con su apoyo y motivación, han sido un impulso grande emocional, necesario para concretar metas personales. Gracias en especial a Papá y Mamá por estar siempre conmigo.

## **Dedicatoria**

Dedico con todo mi corazón a quien tanto amo: a mi esposa Ana Lilia, y a mis hijos Saúl de Jesús y Josué, espero ser buen ejemplo superable para ustedes.

## Prólogo

Este trabajo de tesis tiene el propósito de generar conocimiento escrito para las futuras generaciones de la Maestría en Ingeniería Mecánica y campos afines, interesadas en el diseño y planificación de sistemas productivos.

La distribución de planta es una actividad fundamentalmente importante en la planeación de procesos. De ella depende, en gran medida, una de las etapas críticas del diseño y planificación de sistemas productivos la cual es llamada "planeación operacional"<sup>1</sup>.

Las ubicaciones correctas de las máquinas de operación principal y de transporte, así como el diseño y caracterización de las líneas de flujo de materiales definen, en general, la distribución de maquinaria.

Para poder generar y/o aplicar metodologías sistemáticas en la distribución de maquinaria, es necesario separar la cuestión funcional de la óptima. Es decir, estudiar por separado primero la funcionalidad, después la optimización y posteriormente ambas.

En este trabajo de tesis se usan métodos geométricos y modelos de información para caracterizar la distribución de planta de una línea real de manufactura de la empresa MIDCOM INC. El método geométrico es llamado "circunferencia de distribución"<sup>2</sup> y el modelo de información es denominado "ecuación de forma"<sup>3</sup>.

Es conveniente aclarar que el estudio de la distribución de maquinaria realizada en esta tesis, no se tomará en cuenta modelos de optimización, ni la variable tiempo, razones por las cuales, se considera la distribución de maquinaria "preliminar".

Este trabajo de tesis forma parte de un proyecto que consta de seis partes:

- 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.
- 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) Sincronización local de la línea de producción MIDCOM INC. usando el método del vórtice.
- 6) Sincronización global de la línea MIDCOM INC. usando un código binario.

El estudio realizado en esta tesis corresponde a la parte 3 del proyecto.

Por otro lado, esta tesis pertenece a la línea de investigación "Simulación de sistemas de manufactura" desarrollada en la Sección Mecánica de la DEPMI, UNAM y forma parte del acervo científico y tecnológico del laboratorio de Mecatrónica localizado en dicha sección.

Finalmente, se agradece a todas aquellas personas que contribuyeron a la realización de este trabajo de tesis.

## Resumen

Este trabajo de tesis se utiliza una ecuación de forma y el método geométrico “circunferencia de distribución” para analizar y caracterizar la distribución de planta de una línea de producción real que manufactura transformadores eléctricos para la industria de las telecomunicaciones. Fueron caracterizadas cinco superoperaciones y once suboperaciones de manufactura; 1) dos embobinados, 2) soldaduras por inmersión y 3) un ensamble. Por cada superoperación se caracterizó una circunferencia de distribución y, por cada suboperación se definieron once circunferencias simples. Fueron caracterizadas once líneas de flujo de materiales y en las intersecciones entre circunferencias y líneas de flujo se propusieron 20 máquinas de transporte teóricas. Así mismo, por cada suboperación se definieron máquinas principales teóricas. El número de dichas máquinas fue de once. Posteriormente, se analizó la distribución real de maquinaria de la línea MIDCOM y se comparó con la distribución teórica. De dicha comparación se obtuvieron los siguientes resultados. Primero, se eliminaron cuatro máquinas teóricas principales; segundo, se eliminaron ocho máquinas teóricas de transporte; y tercero, se anexaron seis máquinas reales de transporte. Finalmente, los resultados generados en este estudio, podrán ser utilizados para analizar y modelar la planeación operacional de sistemas productivos tipo serial real.

**Palabras clave:** Planeación de procesos, distribución de maquinaria, ecuaciones de forma, circunferencias de distribución.

## ABSTRACT

This thesis utilizes an equation geometric method(technique) "Distribution Circumference" to analyze and characterize the true plant makeup, production and manufacturing of electrical transformers for the communications industry. Five main(major) and eleven sequ(e), condary manufacturing processes were described. 1) two spools, 2) soldering by emersion(dipping in liquid) and 3) by assembly. Each main process is described by one boundary of distribution and for every secondary process eleven simple boundaries. They were characterized as flowing lines of material from the intersections between boundaries. Flowing lines were proposed for 20 theoretical transportation machines. Likewise for every secondary process main theoretical machines were proposed. The number of proposed machines was eleven. Subsequently the distribution analysis of real machinery was *MIDCOM* and compared with the theoretical distribution system. The comparisons produced the following: *First*, four machines in theory were eliminated, *Secondly*, eight theoretical transportation machines were also eliminated and *Thirdly*, six transportation vehicles(machines) were annexed. Finally the results generated by the study, can be utilized by analyzing and modeling operation planning of productive systems, serial and simultaneous.

*Key words: processing plans, machine distribution, equational forms, distribution circumferences*

# Índice

<b>Agradecimientos y dedicatoria</b>	I
<b>Prólogo</b>	II
<b>Resumen</b>	IV
<b>Índice</b>	VI
<b>Introducción</b>	1
<b>Capítulo 1 Definición del Problema y restricciones</b>	5
1.1 Definición del problema y restricciones	5
1.2 Hipótesis y sistemas de axiomas	7
1.3 Algunas consideraciones sobre el modelo de la distribución de maquinaria	8
<b>Capítulo 2 Ecuación de forma estática y dominio de manufactura del componente estudiado</b>	10
2.1 La ecuación de forma y sus elementos primitivos	10
2.2 La ecuación de forma de un transformador para telecomunicaciones	15
2.2.1 Operaciones y operadores booleanos	17
2.2.2 Sucesión de operaciones	19
2.2.3 Dominio de manufactura	21

2.2.4 Las ecuaciones de subpartes y productos preparados	21
2.2.5 La ecuación de forma del producto terminado PT	23
<b>Capítulo 3 Circunferencias de distribución</b>	26
3.1 La ecuación de forma dinámica	26
3.2 Puntos de distribución, direcciones y líneas de flujo de materiales	30
3.3 Circunferencias de distribución	34
3.4 Caracterización y distribución de maquinaria usando CD	36
3.4.1 Algunas consideraciones sobre la maquinaria principal	40
3.4.2 Discriminación de maquinaria de transporte	41
3.5 Criterios de orden	43
<b>Capítulo 4 Análisis y caracterización de la línea MIDCOM INC.     usando circunferencias de distribución</b>	44
4.1 Superoperaciones y suboperaciones relacionadas con el componente por procesar	44
4.2 Reformulación de la ecuación de forma	46
4.3 Ecuaciones de forma dinámicas y áreas de trabajo	49
4.4 Líneas de flujo de materiales para las superoperaciones	51
4.5 Circunferencias de distribución para superoperaciones	53
4.6. Circunferencias de distribución para suboperaciones y reconfiguración de líneas LMF	54
4.7. Maquinaria de trabajo y distribución sobre la línea de producción	60
4.7.1 Eliminación de líneas de flujo de materiales y	

primera distribución preliminar de maquinaria	61
4.7.2 Caracterización de la línea real MIDCOM INC.	64
4.7.3 Evaluación de la maquinaria MIDCOM INC. con la maquinaria distribuida por circunferencias de distribución	73
4.7.4 Algunas consideraciones sobre la eliminación y anexión de maquinaria	78
<b>Conclusiones</b>	<b>81</b>
<b>Referencias</b>	<b>83</b>

# Introducción

En este trabajo de tesis se pretende alcanzar los siguientes objetivos.

- 1) Usar una ecuación de forma admisible geoméricamente para caracterizar la distribución de planta de la línea MIDCOM INC.
- 2) Usar el método de circunferencias de distribución para determinar la maquinaria de operación principal y transporte de la línea MIDCOM INC para la producción de transformadores para las telecomunicaciones.
- 3) Comparar la distribución de maquinaria teórica preliminar con la real y eliminar y/o anexar maquinaria al modelo teórico.

Una de las actividades más importantes en el diseño y planificación de sistemas productivos es la distribución de maquinaria.<sup>1,2</sup> La funcionalidad de un fábrica, la optimación de recursos y las formas operacionales de la maquinaria entre otras actividades importantes, dependen de una correcta distribución de los elementos de trabajo que integran las líneas de producción. Por otro lado, la funcionalidad de un sistema de manufactura depende de una correcta selección de la maquinaria.

La información requerida para seleccionar y distribuir la maquinaria generalmente se obtiene de los planos de fabricación de los componentes a procesar, de las características y dimensiones de las áreas de trabajo; de los puntos de entrada y salida de los materiales y de los resultados obtenidos de la planeación estratégica (estimado de costos) entre otros factores importantes.

Para la distribución de la maquinaria diversas técnicas han sido propuestas. La ruta crítica<sup>3,4,5</sup>, teoría de restricciones y las redes de Petri<sup>6,7,8,9</sup> son las técnicas más comúnmente usadas. Éstas técnicas combinan información de procesos y métodos de optimación para determinar localizaciones estratégicas de la maquinaria de

trabajo.<sup>4,8</sup> Basadas principalmente en estudios de tiempos y movimientos, la ruta crítica y las redes de Petri buscan obtener formas de distribución de maquinaria en términos óptimos y funcionales<sup>8,9</sup> y, por tanto, requieren de una gran cantidad de información para alcanzar sus objetivos.

Para poder generar nuevas técnicas y procedimientos utilizadas para distribuir maquinaria, es necesario estudiar por separado dos aspectos importantes:

- 1) La funcionalidad de las técnicas de la distribución de maquinaria.
- 2) La optimación de procesos.

Analizar la funcionalidad de una técnica independientemente de la optimación de procesos, permitirá encontrar y/o proponer nuevos criterios para la distribución de maquinaria. Los nuevos criterios podrán estar apoyados en modelos abstractos de manufactura<sup>10</sup>, los cuales utilizan menor información de manufactura y de estudios de tiempos y movimientos que los métodos tradicionales; esto es, por no incluir la optimación de procesos.

En este trabajo de tesis se aplica un método geométrico usado para caracterizar y distribuir preliminarmente la maquinaria de un sistema de manufactura real. El método denominado "circunferencia de distribución" (CD), está basado en un modelo abstracto de manufactura llamado "ecuación de forma"<sup>1,11</sup> (EF) y consiste en definir sobre puntos de distribución, "circunferencias", las cuales intersectan líneas de flujos de materiales. Dichas intersecciones y el interior de la CD determinan las localizaciones preliminares de dos tipos de máquinas genéricas: de transporte y de operación principal. Por la forma de construcción de una ecuación de forma, los tiempos de procesos no son considerados en la definición de las circunferencias de distribución. El procedimiento utilizado para definir una CD permitirá caracterizar algunos elementos primitivos usados en las redes de Petri<sup>7,8</sup> tales como nodos (puntos de distribución) y arcos (líneas de flujo de materiales).

En el primer capítulo se definirá el problema y sus restricciones, de la celda actual para apartir de aquí, en el capítulo segundo obtener la ecuación de forma estática, así como su dominio de manufactura del componente estudiado. En el tercer capítulo se analiza una línea de producción secuencial, usando circunferencias de distribución. Por último se caracterizará la línea MIDCOM INC. de la siguiente manera metodológica y sistemática, aplicada a cualquier línea de producción secuencial por diseñar o caracterizar preliminarmente:

- Las circunferencias de distribución son representaciones geométricas que se usan para caracterizar preliminarmente la maquinaria de trasporte y de operación principal asociada a un sistema de manufactura.
- Para definir las circunferencias de distribución se debe partir de una ecuación de forma estática y, posteriormente, trasformarla en dinámica a través de una segmentación del área de trabajo.
- La segmentación del área de trabajo es el antecedente de las líneas de flujo de materiales.
- Para seleccionar la maquinaria de transporte se debe usar una primitiva de transporte, tomando en cuenta la información de las distancias del área de trabajo.
- Para seleccionar la maquinaria principal o de manufactura se debe utilizar la información geométrica y de manufactura de las primitivas ( de manufactura).
- La clasificación de los tipos de transportes dentro y fuera de las circunferencias de distribución resulta importante para la selección de este tipo de maquinaria.
- El análisis de la caracterización preliminar de maquinaria usando circunferencias de distribución determina los elementos primitivos (puntos y líneas de distribución) usados en las redes de Petri.<sup>8</sup>

La aportación de este trabajo de tesis, consiste en la caracterización de un proceso de manufactura real, dando el avance que hasta ahora, solo modelos teóricos se

habían aplicado obteniendo resultados satisfactorios, y que la aplicación en esta presente tesis, abre el panorama a grandes campos de la investigación en la industria de esta nuevo método, en la planeación táctica de la distribución de planta de los nuevos procesos automatizados de producción.

# Capítulo 1

## Definición del problema y sus restricciones

**Introducción.** En este capítulo se define el problema por solucionar en este trabajo de tesis, así como sus restricciones fundamentales. Es propuesta una hipótesis y un sistema axiomático. Finalmente, se discuten algunas consideraciones importantes relacionados con el problema de la distribución de maquinaria.

### 1.1. Definición del problema y restricciones

En esta sección se define el problema por solucionar, así como sus restricciones fundamentales, esto es:

“Se requiere utilizar un modelo geométrico llamado “circunferencia de distribución (CD)” para caracterizar la distribución de maquinaria y líneas de flujo de materiales (LFM) de una línea de producción de la empresa MIDCOM INC. Se debe utilizar una ecuación de forma admisible geométrica para caracterizar la línea de estudio”.

Las restricciones fundamentales relacionadas con el problema definido anteriormente son las siguientes:

- 1) La ecuación de forma (EF) es fija y conocida ( $R_1$ ).
- 2) El área de trabajo ( $A_T$ ) es fija y conocida ( $R_2$ ).
- 3) La distribución de maquinaria es fija y conocida ( $R_3$ ).
- 4) El modelo de las circunferencias de distribución es atemporal ( $R_4$ ).

5) No se utilizarán métodos de optimización ( $R_5$ ).

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

“Dados,  $D_{MR}$ ,  $A_T$ ,  $L_{FMR}$  y EF, encuentre:

$$M_{DPM}^{CD} = M_{DPM}^{CD}(D_{MR}, A_T, L_{FMR}, EF)$$

tal que:

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

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

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

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

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

Sean satisfechas.”

Aquí:

$D_{MR}$  : es la distribución de maquinaria real.

$A_T$  : es el área de trabajo.

$L_{FMR}$  : son las líneas de flujo de materiales reales.

EF : es una ecuación de forma.

$M_{DPM}^{CD}$  : es el modelo de distribución preliminar de maquinaria por encontrar usando circunferencias de distribución (CD).

## 1.2. Hipótesis y sistemas de axiomas

En esta sección se propone una hipótesis la cual tiene el propósito de guía para la solución del problema, así como un sistema de premisas o axiomas básicos.

Hipótesis:

“Toda distribución de maquinaria real o teórica depende, en general, del número de operaciones de manufactura y de la transición de las materias primas sobre el área de trabajo. Cualesquier método geométrico usado para caracterizar real o preliminarmente la distribución de maquinaria, depende del número de operaciones de manufactura o, equivalentemente, del tamaño de la secuencia de operaciones”.

Las premisas básicas relacionados con el problema definido en la sección anterior son las siguientes:

- Axioma 1.1.        Todo elemento que compone el dominio de manufactura es transportado sobre  $A_T$ .
- Axioma 1.2.        Las transiciones de los elementos del dominio de manufactura satisfacen las leyes de Newton.
- Axioma 1.3        Por cada operación de manufactura existe una máquina de operación principal.

### **1.3. Algunas consideraciones sobre el modelo de la distribución de maquinaria**

En esta sección se discuten algunas consideraciones relacionados con el modelo de la distribución de maquinaria las cuales serán utilizadas para solucionar el problema propuesto en este trabajo de tesis.

El caso que será usado para caracterizar la distribución de maquinaria es de la línea MIDCOM INC es “preliminar” por las siguientes razones:

- 1) La ecuación de forma es generada bajo eventos de operación atemporales.
- 2) El método de las circunferencias de distribución es geométrico y depende de las operaciones principales de manufactura y éstas, al ser atemporales (por ser caracterizadas por eventos de operación), son usados para generar circunferencias atemporales.
- 3) El método de las circunferencias de distribución fue concebido para caracterizar la distribución de maquinaria para nuevos sistemas productivos (donde es necesario seleccionar maquinaria y su distribución). Dicho método será utilizado en esta tesis para analizar y caracterizar la distribución de maquinaria para un sistema de producción ya establecido.

Es importante señalar que el hecho de no considerar el tiempo conducirá a modelar las líneas de flujo de materiales por medio de “eventos de posición atemporales”; es decir, fijar un componente en el extremo de un segmento (que idealiza una línea de flujo de materiales) y, posteriormente, localizar dicho componente en el extremo final del segmento sin considerar la transición de desplazamiento.

Por otro lado, puesto que no se considerará el tiempo, entonces no se aplicará en su extensión el axioma 1.2; es decir, no se analizan las fuerzas y las consideraciones cinemáticas.

Así mismo, el hecho de asociar una máquina de transporte por cada elemento del dominio de manufactura (axioma 1.1) implica la existencia mínima no definitiva de un conjunto de máquinas de este tipo; puesto que en un sistema de manufactura, un componente puede requerir de diversos transportes durante su recorrido por una línea de flujo de materiales. Éstas mismas observaciones se aplican para el caso de la maquinaria de operación principal (axioma 1.3).

Será necesario utilizar criterios de eliminación de maquinaria o, en su caso, de anexión para poder modelar la línea MIDCOM INC.

Con respecto a la hipótesis planteada en la sección 1.2 de este capítulo, es necesario comentar que fue concebida con el propósito de relacionar distribución real con la teórica (generada al usar el método de las circunferencias de distribución), esto a través del número de operaciones de manufactura. Así mismo, el hecho de conocer y fijar la ecuación de forma implica que se conocen:

- 1) El número de operaciones.
- 2) La secuencia de operaciones.
- 3) El dominio de manufactura.

Puesto que éste último será usado para distribuir líneas de flujo, entonces dichas líneas dependen del número de operaciones ya que con tal número, se genera el dominio de manufactura.

## Capítulo 2

### Las ecuaciones de forma

**Introducción.** En este capítulo se presenta la ecuación de forma asociada con el sistema productivo de la empresa MIDCOM INC. El dominio de manufactura y la sucesión de operaciones principales relacionado con dicha ecuación de forma, es caracterizado con el objetivo de utilizarlo en los capítulos posteriores, para la representación de las distribuciones de maquinaria.

#### 2.1 La ecuación de forma y sus elementos primitivos

Para representar las transformaciones geométricas y de manufactura de componentes, diversas formas han sido propuestas. Una de estas formas es conocida como “ecuación de forma” (EF). Formalmente, una EF se define, de acuerdo con (Jiménez E., 2002), de la manera siguiente:

*“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:

- 1)  $B_{MP}$  ; Familia de materias primas.
- 2)  $B_{PP}$  ; Familia de productos preparados.
- 3)  $B_{MAE}$  ; Familia de materiales agregados y extraídos.
- 4)  $B_{SUB}$  ; Familia de subpartes.
- 5)  $B_{PT}$  ; Familia de producto terminado.

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.

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.

Considere que se desea representar el componente mostrado en la figura 2.1. a través de una ecuación de forma.

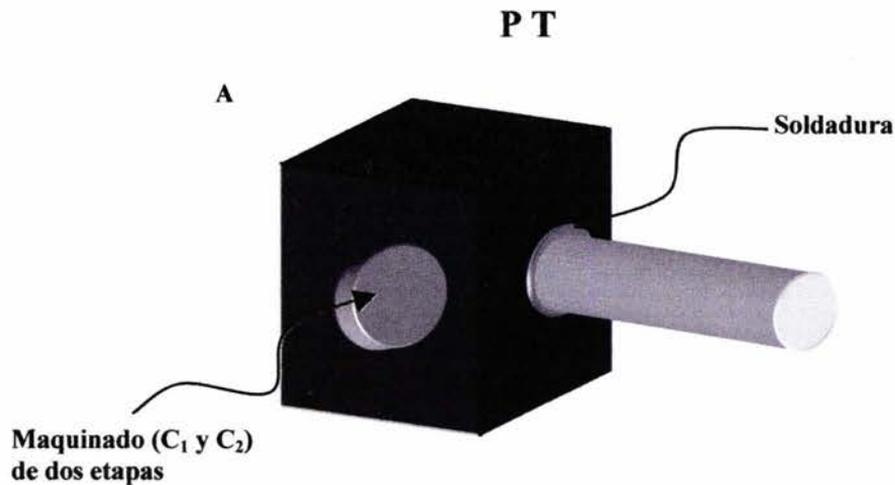


Figura 2.1. Representación gráfica de un componente y operaciones

El número de operaciones principales son dos (soldadura y maquinado) y el número de suboperaciones es dos (maquinado burdo y fino). El dominio de manufactura ( $B^M$ ) para el componente PT mostrado en la figura 2.1. es el siguiente:

- 1)  $B_{MP} = \{ A , C'_1 , B'_{SUB1} , B'_{SUB2} \}$
- 2)  $B_{PP} = \{ B_{PP1} , B_{PP2} , B_{PP3} \}$
- 3)  $B_{MAE} = \{ C_1 , C_2 , S_1 \}$
- 4)  $B_{SUB} = \{ B_{SUB1} , B_{SUB2} , B_{SUB3} \}$
- 5)  $B_{PT} = \{ PT \}$

Por otro lado, sean  $O_1 = \{ O_{11}, O_{12} \}$  y  $O_2$  las operaciones principales de manufactura donde  $O_1$  representa el maquinado y  $O_2$  la soldadura. Los operadores booleanos asociados con las operaciones reales son:  $O_1 \Leftrightarrow M$  y  $O_2 \Leftrightarrow U^S$ .



La representación gráfica de la ecuación de forma asociada al componente PT se muestra en la figura 2.2.

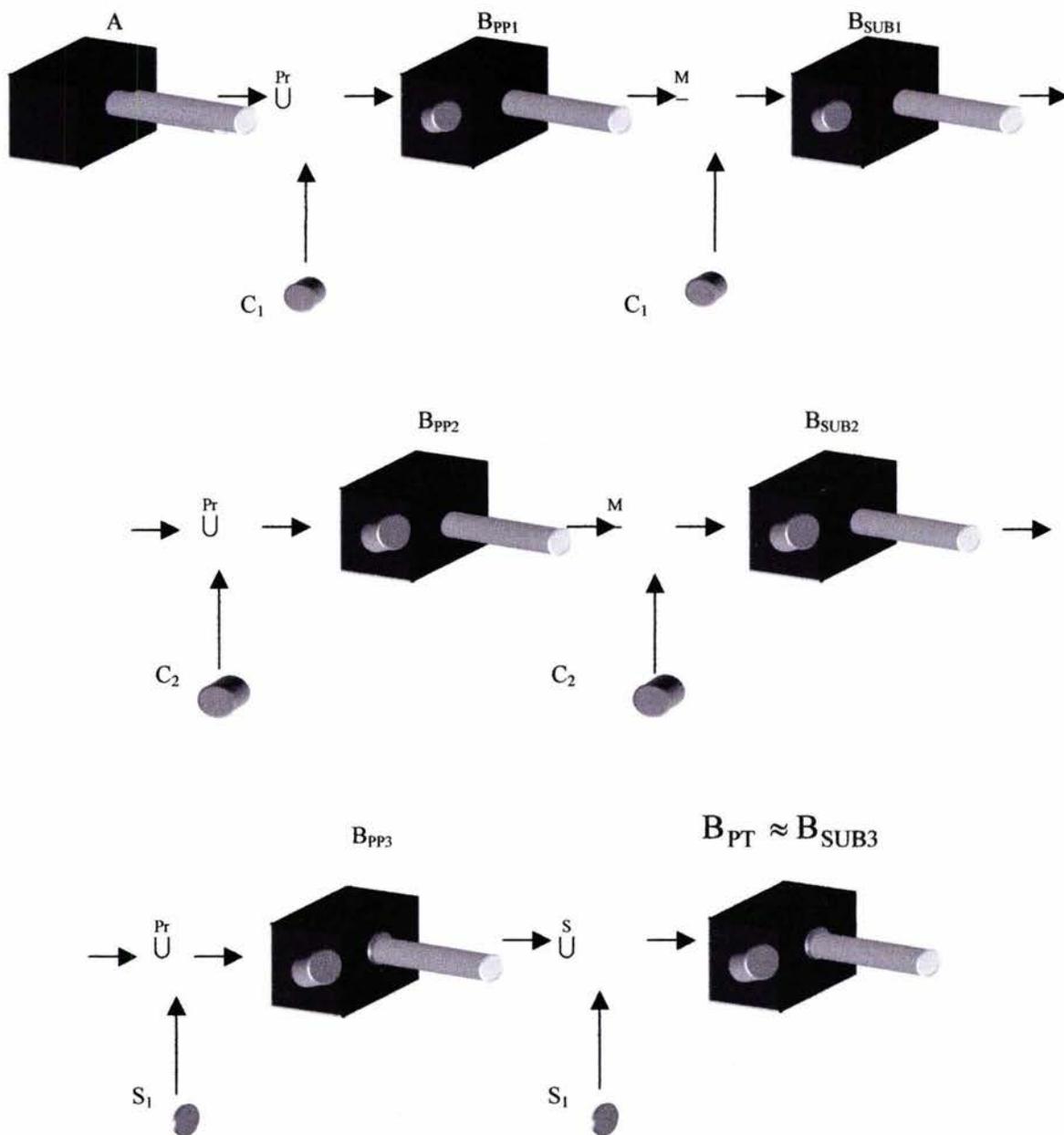


Figura 2.2. Representación geométrica de la ecuación de forma

## 2.2. La ecuación de forma de un transformador para telecomunicaciones

En esta sección se construye la ecuación de forma relacionada con un componente utilizado en las telecomunicaciones. Dicha pieza es un transformador compuesto por dos bobinas y dos cuerpos de plástico, así como dos empapelados. La figura siguiente muestra el producto estudiado en esta sección:

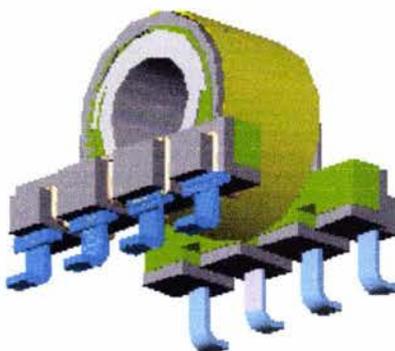


Figura 2.3 Transformador para telecomunicaciones (PT)

Por otro lado, la materia prima base con la cual se genera el componente PT se muestra en la figura 2.4.

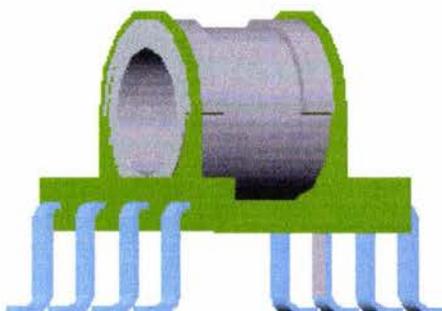


Figura 2.4 Materia prima base

La descripción y nomenclatura de las partes que componen el producto PT es la siguiente:

- 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.

La figura siguiente muestra los elementos descritos anteriormente:

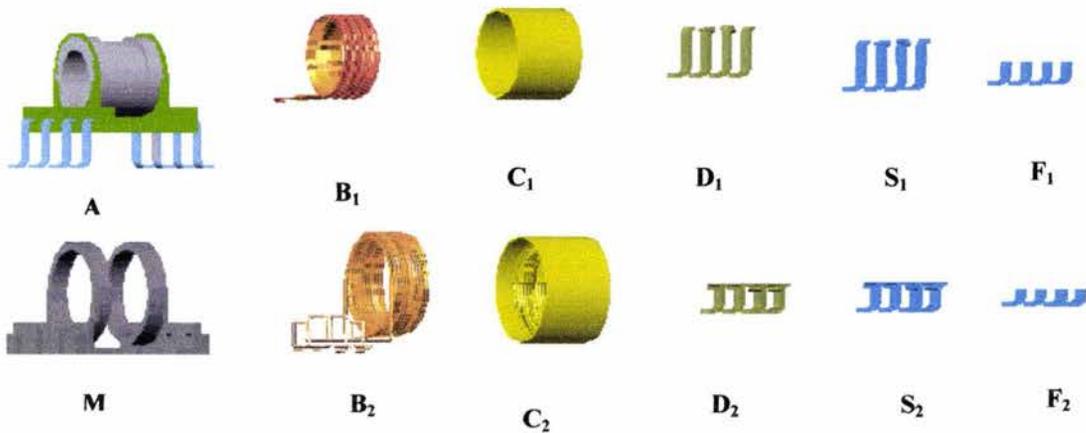


Figura 2.5 Partes del PT

A continuación se describen las operaciones principales para manufacturar el componente PT:

“Sobre el cuerpo A mostrado en la figura 2.5 se monta la bobina B<sub>1</sub>, posteriormente se encinta con un papel C<sub>1</sub> la bobina B<sub>1</sub>. Se aplica una película de flux D<sub>1</sub> a las terminales de A y, posteriormente, se recubren con soldadura líquida. El excedente de soldadura F<sub>1</sub> es quitado después de la aplicación. El componente M es moldeado en una inyectora de plástico y, posteriormente, ensamblado o montado sobre el empapelado C<sub>1</sub>. Sobre M se monta una segunda bobina B<sub>2</sub> y luego dicha bobina se empapela (C<sub>2</sub>). Posteriormente, sobre las partes del cuerpo generado se aplica una película de flux D<sub>2</sub> y luego se aplica soldadura líquida S<sub>2</sub> sobre las terminales. Finalmente, se quita el exceso de soldadura y el producto obtenido es PT.”

### 2.2.1. Operaciones y operadores booleanos

En esta sección se caracterizan las operaciones principales y suboperaciones relacionadas con el componente PT. Asimismo se asociará un operador booleano parametrizado. Las operaciones principales son:

- 1) O<sub>1</sub><sup>P</sup> : Montajes.
- 2) O<sub>2</sub><sup>P</sup> : Soldadura.
- 3) O<sub>3</sub><sup>P</sup> : Moldeo.

Las suboperaciones relacionadas con las operaciones principales (O<sub>1</sub><sup>P</sup> , O<sub>2</sub><sup>P</sup> , O<sub>3</sub><sup>P</sup>) son las siguientes:

$$1) O_1^P = \begin{cases} O_{11}; \text{ Embobinado 1} \\ O_{12}; \text{ Empapelado 1} \\ O_{13}; \text{ Montaje (M)} \\ O_{14}; \text{ Embobinado 2} \\ O_{15}; \text{ Empapelado 2} \end{cases}$$

$$2) O_2^P = \begin{cases} O_{11}; \text{ Aplicación de Flux} \\ O_{12}; \text{ Soldadura 1} \\ O_{13}; \text{ Quitado de excedente 1} \\ O_{14}; \text{ Aplicación de Flux} \\ O_{15}; \text{ Soldadura 2} \\ O_{16}; \text{ Quitado de excedente 2} \end{cases}$$

$$3) O_3^P = \{O_{11}; \text{ Moldeo } \}$$

La tabla siguiente muestra los operadores booleanos asociados con las operaciones descritas anteriormente:

$O_1^P$	$O_2^P$	$O_3^P$	Operador	Descripción
$O_{11}$	-	-	M,B U	Unión por montaje de bobina.
$O_{12}$	-	-	M,P U	Unión por montaje empapelado.
$O_{13}$	-	-	M U	Unión por montaje.
$O_{14}$	-	-	M,B U	Unión por montaje de bobina.
$O_{15}$	-	-	M,P U	Unión por montaje empapelado.
-	$O_{11}$	-	R U	Unión por recubrimiento.
-	$O_{12}$	-	S U	Unión por soldadura sin cordón de aporte.
-	$O_{13}$	-	E -	Diferencia de excedente.
-	$O_{14}$	-	R U	Unión por recubrimiento.

-	$O_{15}$	-	S U	Unión por soldadura sin cordón de aporte.
-	$O_{16}$	-	E -	Diferencia de excedente.
-	-	$O_{11}$	-	No aplicable.

Tabla 2.1. Asociación de operadores booleanos

Cabe señalar que la operación de moldeoado  $O_3^P$  no será analizada en este trabajo de tesis, puesto que no se tiene operador booleano que la represente.

### 2.2.2. Sucesión de operaciones

En esta sección será caracterizado el orden de las operaciones realizadas sobre las materias primas que componen al producto PT motivo de estudio. De acuerdo con la crónica de operaciones descrita al inicio de la sección 2.2, la aplicación de dichas operaciones es secuenciada, esto es:

$$(O_{11}, O_{12}) O_1^P \rightarrow (O_{11}, O_{12}, O_{13}) O_2^P \rightarrow (O_{13}, O_{14}, O_{15}) O_1^P \rightarrow (O_{14}, O_{15}, O_{16}) O_2^P$$

Considere ahora un renombramiento de las operaciones, es decir:

- 1)  $O_{11} \rightarrow O_1 (O_1^P)$
- 2)  $O_{12} \rightarrow O_2 (O_1^P)$
- 3)  $O_{11} \rightarrow O_3 (O_2^P)$
- 4)  $O_{12} \rightarrow O_4 (O_2^P)$
- 5)  $O_{13} \rightarrow O_5 (O_2^P)$
- 6)  $O_{13} \rightarrow O_6 (O_1^P)$

$$7) O_{14} \rightarrow O_7 (O_1^P)$$

$$8) O_{15} \rightarrow O_8 (O_1^P)$$

$$9) O_{14} \rightarrow O_9 (O_2^P)$$

$$10) O_{15} \rightarrow O_{10} (O_2^P)$$

$$11) O_{16} \rightarrow O_{11} (O_2^P)$$

La sucesión general de operaciones de manufactura es la siguiente:

$$O_{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11} \Leftrightarrow SO^{F_1 O_{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}}$$

La tabla siguiente representa los eventos de la secuencia de operaciones:

SO <sup>F<sub>1</sub></sup> O <sub>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11</sub>											
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 Γ	Γ <sub>1</sub> <sup>i</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>ii</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>iii</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>iv</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>v</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>vi</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>vii</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>viii</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>ix</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>x</sup>	Γ <sub>1</sub> <sup>xi</sup>

Tabla 2.2. Representación por eventos de una sucesión de operaciones

### 2.2.3. Dominio de manufactura

En esta sección se genera el dominio de manufactura relacionado con el componente PT mostrado en la figura 2.3. Para esta pieza, el dominio  $B^M$  de manufactura es general, pues las operaciones son secuenciadas. El dominio  $B^M$ , de acuerdo con (Murillo I, 2003), es el siguiente:

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

### 2.2.4. Las ecuaciones de subpartes y productos preparados

Una vez establecido el dominio de manufactura y la sucesión de operaciones, es posible determinar las subpartes y los productos preparados de la ecuación de forma, esto es:

- 1)  $B_{PP1} = A \overset{Pr}{\cup} B_1$
- 2)  $B_{SUB1} = B_{PP1} \overset{M,B}{\cup} B_1$
- 3)  $B_{PP2} = B_{SUB1} \overset{Pr}{\cup} C_1$
- 4)  $B_{SUB2} = B_{PP2} \overset{M,P}{\cup} C_1$
- 5)  $B_{PP3} = B_{SUB2} \overset{Pr}{\cup} D_1$

$$6) \mathbf{B}_{\text{SUB3}} = \mathbf{B}_{\text{PP3}} \overset{\text{R}}{\cup} \mathbf{D}_1$$

$$7) \mathbf{B}_{\text{PP4}} = \mathbf{B}_{\text{SUB3}} \overset{\text{Pr}}{\cup} \mathbf{S}_1$$

$$8) \mathbf{B}_{\text{SUB4}} = \mathbf{B}_{\text{PP4}} \overset{\text{S}}{\cup} \mathbf{S}_1$$

$$9) \mathbf{B}_{\text{PP5}} = \mathbf{B}_{\text{SUB4}} \overset{\text{Pr}}{\cup} \mathbf{F}_1$$

$$10) \mathbf{B}_{\text{SUB5}} = \mathbf{B}_{\text{PP5}} \overset{\text{E}}{-} \mathbf{F}_1$$

$$11) \mathbf{B}_{\text{PP6}} = \mathbf{B}_{\text{SUB5}} \overset{\text{Pr}}{\cup} \mathbf{M}$$

$$12) \mathbf{B}_{\text{SUB6}} = \mathbf{B}_{\text{PP6}} \overset{\text{M}}{\cup} \mathbf{M}$$

$$13) \mathbf{B}_{\text{PP7}} = \mathbf{B}_{\text{SUB6}} \overset{\text{Pr}}{\cup} \mathbf{B}_2$$

$$14) \mathbf{B}_{\text{SUB7}} = \mathbf{B}_{\text{PP7}} \overset{\text{R,B}}{\cup} \mathbf{B}_2$$

$$15) \mathbf{B}_{\text{PP8}} = \mathbf{B}_{\text{SUB7}} \overset{\text{Pr}}{\cup} \mathbf{C}_2$$

$$16) \mathbf{B}_{\text{SUB8}} = \mathbf{B}_{\text{PP8}} \overset{\text{M,P}}{\cup} \mathbf{C}_2$$

$$17) \mathbf{B}_{\text{PP9}} = \mathbf{B}_{\text{SUB8}} \overset{\text{Pr}}{\cup} \mathbf{D}_2$$

$$18) \mathbf{B}_{\text{SUB9}} = \mathbf{B}_{\text{PP9}} \overset{\text{R}}{\cup} \mathbf{D}_2$$

$$19) \mathbf{B}_{\text{PP10}} = \mathbf{B}_{\text{SUB9}} \overset{\text{Pr}}{\cup} \mathbf{S}_2$$

$$20) \mathbf{B}_{\text{SUB10}} = \mathbf{B}_{\text{PP10}} \overset{\text{S}}{\cup} \mathbf{S}_2$$

$$21) \mathbf{B}_{\text{PP11}} = \mathbf{B}_{\text{SUB10}} \overset{\text{Pr}}{\cup} \mathbf{F}_2$$

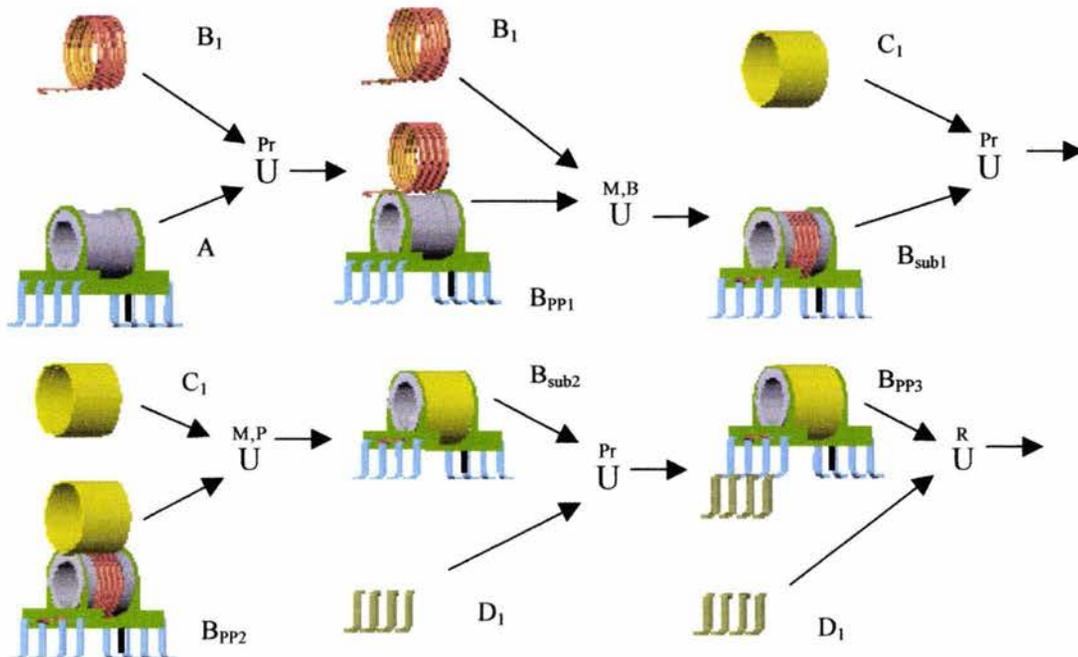
$$22) \mathbf{B}_{\text{SUB11}} = \mathbf{B}_{\text{PP11}} \overset{\text{E}}{-} \mathbf{F}_2$$

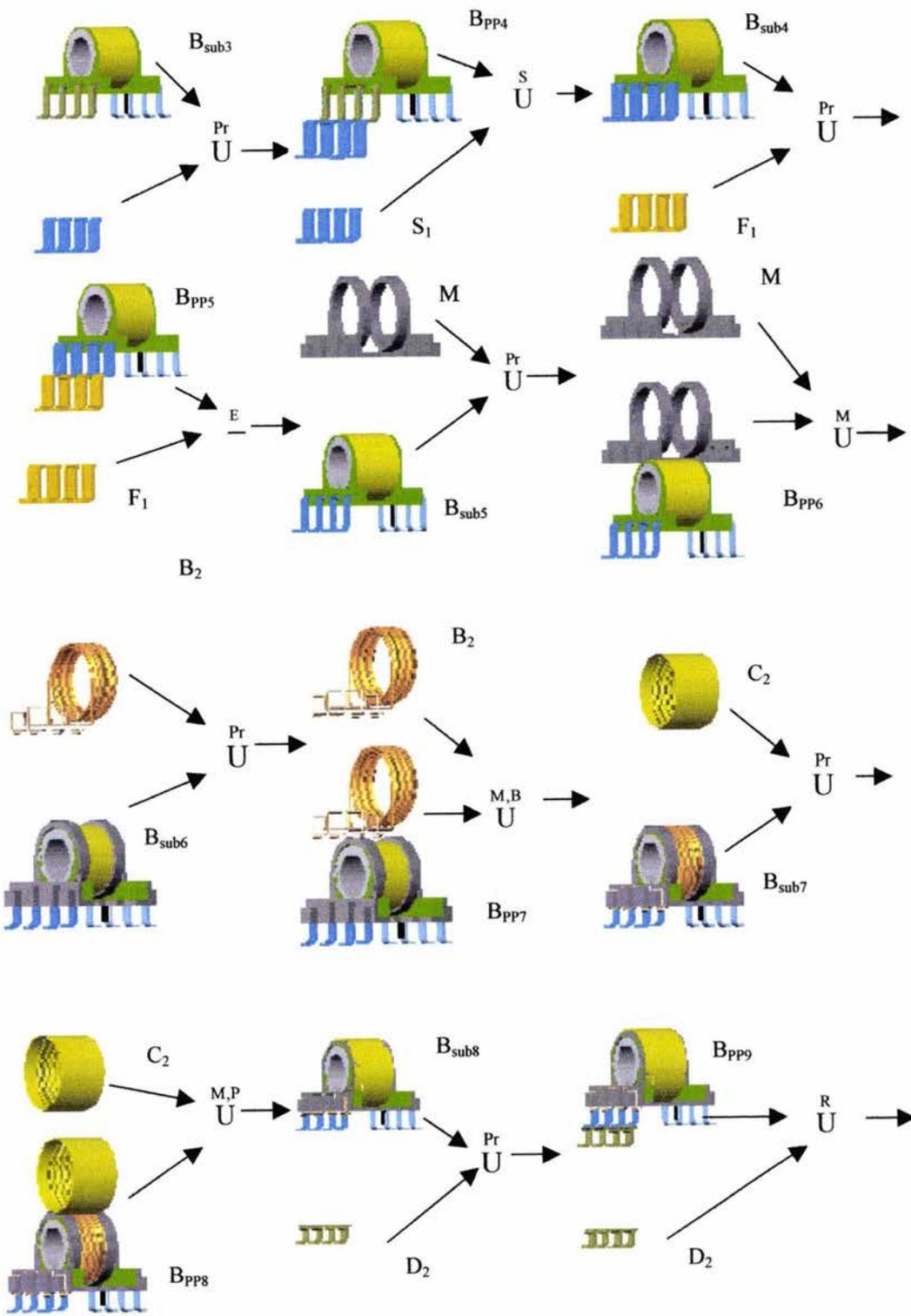
### 2.2.5. La ecuación de forma del producto terminado PT

La representación en términos abstractos de las transformaciones de materias primas en la generación del componente PT se obtiene al expandir la subparte B<sub>SUB11</sub>. Con Dicha expansión se genera la ecuación de forma asociada con la sucesión  $SO^{F_1, O_{2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}}$ , esto es:

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

Cabe señalar que la ecuación de forma descrita anteriormente representa las formas operativas del sistema productivo localizado en la empresa MIDCOM INC. La figura siguiente muestra la representación gráfica de la ecuación de forma descrita anteriormente:





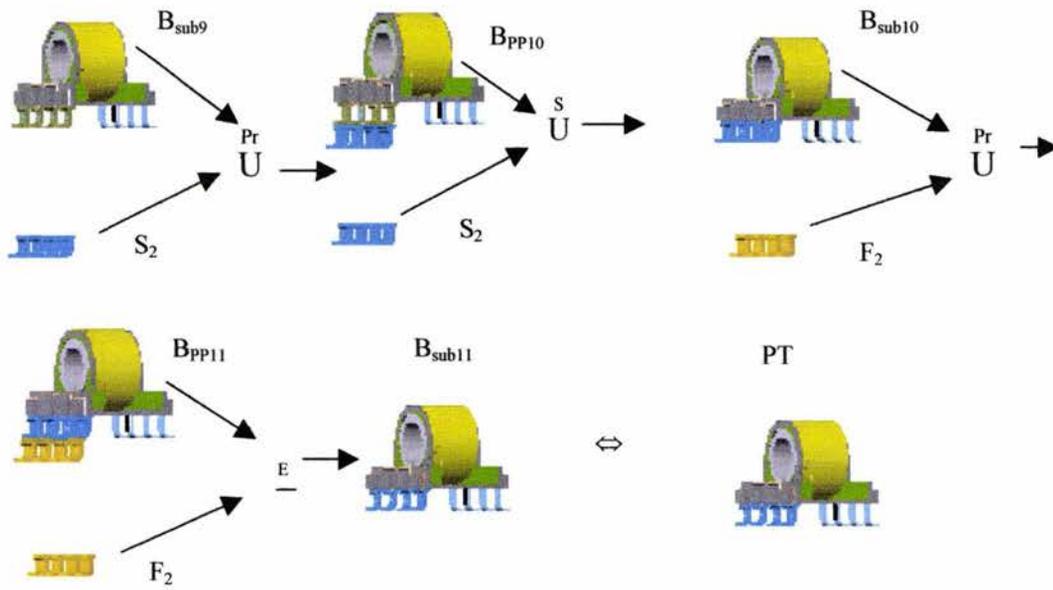


Figura 2.6 Representación gráfica de la ecuación de forma y el dominio de manufactura

## Capítulo 3

### Circunferencia de distribución

**Introducción.** En esta sección se presenta un método geométrico utilizado para caracterizar la distribución de maquinaria de un sistema productivo. Dicho método, es llamado “circunferencia de distribución (CD)”. Para poder utilizar el método CD, es necesario transformar las ecuaciones de forma de un concepto inmóvil o rígido a una forma dinámica, pues cada uno de los elementos que integra el dominio de manufactura, debe ser desplegado dentro de un sistema productivo. Son definidos puntos y líneas de distribución sobre un área analítica de trabajo y, posteriormente, se asocian circunferencias de distribución sobre los puntos de distribución. Se discuten en breves términos algunas consideraciones sobre la selección de maquinaria. Finalmente, el contenido de este capítulo está direccionado al análisis de distribución de maquinaria para sistemas productivos nuevos. Además las operaciones modeladas son perfectas.

#### 3.1. La ecuación de forma dinámica

En esta sección se discuten los procedimientos lógicos necesarios para transformar una ecuación de forma estática a una ecuación dinámica. Para ello, se definirán el concepto de “evento de posición” y la segmentación de un área de trabajo. Considere ahora la ecuación de forma descrita en la sección 2.1 del capítulo anterior. Dicha ecuación es la siguiente:

$$PT \approx B_{SUB3} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{(A \cup C_1)}^{Pr}} - C_1}_{B_{PP1}} \cup C_2}_{B_{SUB1}} - C_2}_{B_{PP2}} \cup S_1}_{B_{SUB2}} \cup S_1}_{B_{PP3}}}_{B_{SUB3}}$$

Los elementos que integra la ecuación de forma descritos anteriormente (sólidos y operaciones) representan en general, las formas primitivas de manufactura de un sistema productivo, es decir; operaciones y materiales de transición sobre líneas de producción. De hecho, cada uno de los elementos del dominio de manufactura ( $B^M$ ) tienen una cierta movilidad sobre el área de trabajo de un sistema de manufactura.

Sin embargo, por el hecho de utilizar operaciones perfectas de manufactura, el tiempo de ejecución de las operaciones no es considerado. Esto es, se han utilizado eventos de operación con dos estados y, por tanto, la ecuación de forma es una representación por "eventos". Una EF con éstas características es llamada rígida o estática.

El objetivo es utilizar otro esquema de representación por eventos, el cual permita transformar la EF estática a un concepto dinámico ( $\leftrightarrow$ ) sin involucrar el tiempo. Para ello, es necesario introducir el área de trabajo y definir sobre dicha área, un conjunto de segmentos, las cuales serán en términos de manufactura, líneas de flujo de materiales. Un evento de posición, es una forma de representar un movimiento sin considerar el tiempo; es decir, el evento tiene su estado inicial y un estado final, y una transición entre dichos estados, es solo una representación.

Sea  $A_T$  un área de trabajo arbitraria, funcional y analítica asociada con la ecuación de forma descrita anteriormente.  $A_T$  es analítica si es posible representarla a través de la unión siguiente:

$$A_T = I_{AT} \cup \partial_{AT}$$

Aquí,  $I_{AT}$  y  $\partial_{AT}$  representan el interior y la frontera de  $A_T$ . Por otro lado,  $A_T$  se dice funcional, si es posible definir sobre dicha área un conjunto de segmentos y si la geometría de  $A_T$  es representativa y funcional para la ecuación de forma. La figura

3.1 muestra un área de trabajo analítica y algunos segmentos definidos en dicha área.

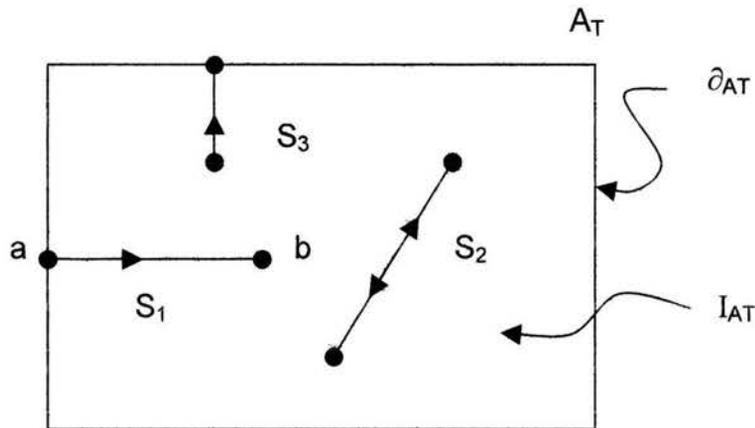


Figura 3.1. Área de trabajo analítica y segmentos

En un área analítica asociada con una EF se puede definir tres tipos de segmentos:

- 1) Segmento frontera – interior ( $S_1$ ).
- 2) Segmento interior – interior ( $S_2$ ).
- 3) Segmento interior – frontera ( $S_3$ ).

El tipo de segmento descrito anteriormente, se caracteriza de acuerdo con la fijación de dos puntos; un extremo inicial (a para  $S_1$ ) y otro extremo final (b para  $S_1$ ). Si el punto inicial se localiza en la frontera  $\partial A_T$ , entonces es un segmento frontera -interior. También, si el punto final se ubica sobre la frontera, entonces el segmento es de interior – frontera. Finalmente, si el punto inicial y final se localizan en el interior de  $A_T$ , entonces el segmento es interior – interior.

Considere ahora la siguiente proposición:

*“Todo sistema productivo tiene cuando menos los tres tipos de segmentos si y solo si existen más de una operación principal de manufactura aplicada a las materias primas”.*

Para poder relacionar la segmentación del área de trabajo de manufactura con la ecuación de forma en términos concretos, es necesario relacionar el dominio, esto es:

“Sea  $L$  Un conjunto finito de segmentos bien definidos en un área analítica  $A_T$ . La segmentación de  $A_T$  se dice completa y asociada con la ecuación de forma si y solo si el número de segmentos está determinado por la cardinalidad del conjunto  $B^{MK}$  donde  $B^{MK} = \{B^{M_i}\} - \{B_{PT}\}$ . Además, cada segmento está asociado con uno y solo un elemento de  $B^{MK}$ .”

Se dice entonces que la pareja  $(B^M, L)$  representa un dominio de manufactura segmentado y la ecuación de forma asociada a dicho dominio, se considera “dinámica”.

Considere ahora la siguiente función:

$$R_{ep} : B^M \times S \rightarrow \{1,0\}$$

definida por:

- 1)  $R_{ep}(B_1, S_1) = 1 \Leftrightarrow B_1(b) ; \forall B_1 \in B^M, S_1 \in S$
- 2)  $R_{ep}(B_1, S_1) = 0 \Leftrightarrow B_1(a) ; \forall B_1 \in B^M, S_1 \in S$

Aquí, “b” es un extremo final del segmento  $S_1$  y “a” un punto del extremo inicial. La función  $R_{ep} : B^M \times S \rightarrow \{1,0\}$  es llamada relación evento – posición.



Cada uno de estos elementos tiene propiedades que los caracterizan. Por ejemplo, las partes (PES) se localizan en  $\partial_{AT}$ , los puntos (PO) se ubican en  $\partial_{AT}$ , las direcciones (DF) se determinan por el evento de posición y el tipo de elemento de traslado de  $B^M$  y las líneas de flujo están asociadas con el conjunto de segmentos L.

Considere ahora la siguiente definición:

“Sea  $A \in B_{MP}$  una materia prima “líder” y  $PT$  un producto terminado. Entonces existe un segmento principal  $L_P$  y un evento de posición principal  $E_{VP}$  tal que:

- 1)  $\Gamma_0 \Rightarrow A(a) ; a \in PES.$
- 2)  $\Gamma_1 \Rightarrow PT(b) ; b \in PES.$

Aquí,  $a \in \partial_{AT}$  y  $b \in \partial_{AT}$ , “a” es el inicio de  $L_P$  y “b” el punto terminal”.

La siguiente proposición se implica de la definición anterior:

“Todo segmento principal  $L_P$  pasa por al menos un punto  $k \in I_{AT}$ , en el cual existe cuando menos una operación de manufactura asociada.”

La figura siguiente muestra un segmento principal relacionado a un área  $A_T$ .

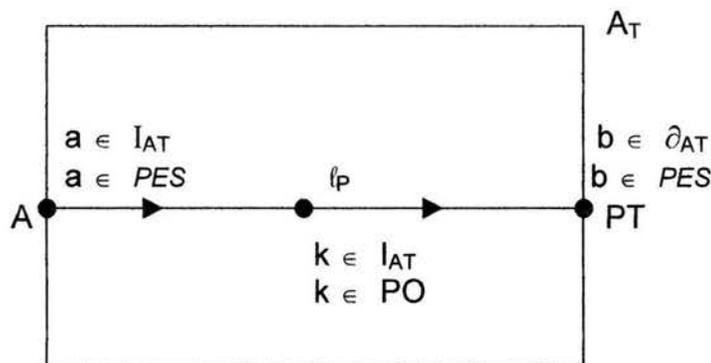


Figura 3.2. Segmento principal en  $A_T$  y punto interior  $k \in I_{AT}$

La siguiente proposición se deduce de la definición de segmento principal:

“En toda área de trabajo  $A_T$  asociada con un sistema productivo existe un segmento  $L_P$  y cuando menos tres puntos:

- 1)  $a, b \in PES \Rightarrow a \in \partial_{AT}$  y  $b \in \partial_{AT}$ .
- 2)  $K \in PO \Rightarrow K \in I_{AT}$ .

Si  $K \in PO$  tal que en dicho punto se asocia una operación principal, entonces  $K \in I_{AT}$  se llama “punto de distribución”.

Por otro lado, todo punto relacionado con la frontera de  $A_T$  es llamado “de entrada y/o salida”.

Asimismo, todo segmento asociado con un elemento  $B^{MK} = B^K - \{B_{PT}\}$  es llamado “línea de flujo de materiales” y su dirección se determina según los estados de posición.

En general se satisfacen las siguientes direcciones:

- 1) La familia  $B_{MP}$  tiene estado  $\Gamma_0$  en  $\partial_{AT}$  y  $\Gamma_1$  en  $k \in I_{AT}$ . Por tanto, la dirección de las líneas es frontera – interior.
- 2) Las familias  $B_{PP}$  y  $B_{SUB}$  tienen  $\Gamma_0$  en un  $k_0 \in I_{AT}$  y:
  - 2.1)  $B_{SUB}$  tiene  $\Gamma_1$  en  $k_1 \in I_{AT}$  si existe más de un punto de distribución.
  - 2.2)  $B_{SUB}$  tiene  $\Gamma_1$  en un punto  $a \in PES$  si  $B_{SUB} \approx PT$ , o sea la última subparte.
  - 2.3)  $B_{PP}$  tiene  $\Gamma_1$  en  $I_{AT}$ , dicho estado ( $\Gamma_1$ ) no caracteriza un punto  $k_1 \in I_{AT}$ .
- 3) La familia  $B_{MAE}$  tiene:
  - 3.1)  $\Gamma_0$  en  $a \in PES$  y  $\Gamma_1$  en  $k_1 \in PO$  si es un insumo.
  - 3.2)  $\Gamma_0$  en  $a \in PES$  y  $\Gamma_1$  en  $k_1 \in PO$  si es un desperdicio.

Para poder definir las líneas de flujo de materiales sobre  $A_T$  considere las siguientes proposiciones:

- 1) *“Si existen  $k_1, k_2, k_n \in PO$  en una línea de producción, entonces toda  $L_P$  pasa por dichos puntos si y solo si las operaciones del sistema productivo son seriales”.*
- 2) *“Si  $L_P$  es una línea principal, entonces toda la segmentación de  $B^M$  toca a dicha línea si y solo si las operaciones son secuenciales”.*

Considere ahora la siguiente caracterización de la ecuación de forma dinámica y su dominios de manufactura, ambas definidas en la sección anterior, entonces:

- 1) Existen dos operaciones principales:
  - a) maquinado por etapas y b) soldadura.
- 2) Existen tres operaciones de preparación.
- 3) A es la materia prima.
- 4)  $C_1 \cup C_2$  es un desperdicio.
- 5)  $S_1$  es insumo.
- 6) Existen tres productos preparados ( $B_{PP1}, B_{PP2}, B_{PP3}$ ).
- 7) Existen tres subpartes ( $B_{SUB1}, B_{SUB2}, B_{SUB3}$ ).
- 8) Las operaciones son secuenciadas.
- 9) El maquinado por etapas (dos operaciones).
- 10) A es materia prima base.

La segmentación del área de trabajo asociada con la caracterización descrita anteriormente, se muestra en la figura siguiente:

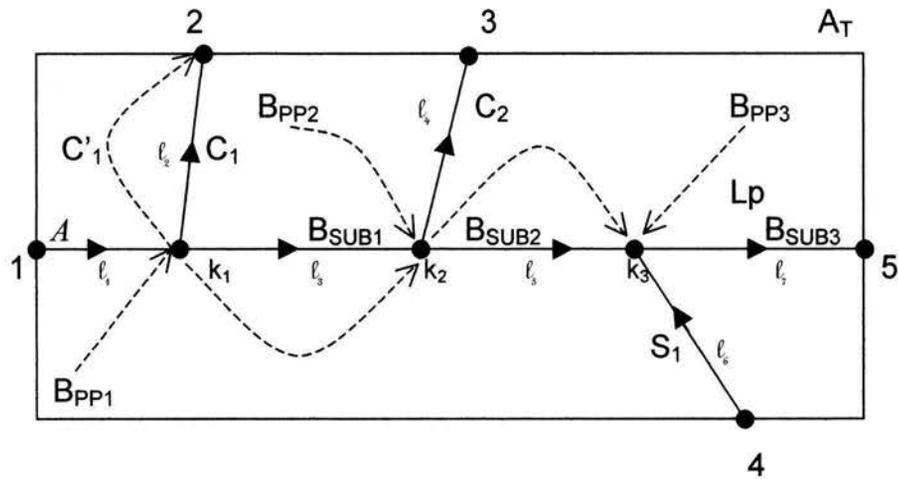


Figura 3.3. Líneas de flujo de materiales para el dominio de manufactura

De acuerdo con la figura 3.3, los puntos 1, 2, 3, 4, 5  $\in$  PES y  $k_1, k_2, k_3 \in$  PO. Además las líneas punteadas representan líneas de flujo de materiales relacionadas con entidades matemáticas producto de la constructibilidad del dominio de manufactura (dichas líneas no son consideradas, pues en la realidad no existen).

Por otro lado, las líneas  $l_2, l_4, l_5$  y  $l_7$  están relacionadas la línea principal  $L_p$  y las líneas  $l_2, l_4$  y  $l_6$  son líneas conectadas a  $L_p$ .

Es importante señalar que el insumo  $S_1$  que representa el cordón de soldadura se ha considerado como un material que entra en el área de trabajo, en realidad no existe dicha línea.

### 3.3. Circunferencia de distribución

En esta sección se define un concepto de fundamental importancia para la planeación táctica. Dicho concepto es llamado "circunferencia de distribución (CD)".

Considere la siguiente definición:

*“Una CD es una región contenida totalmente en el área de trabajo con centro en el punto  $k \in PO$  y radio funcional nunca mayor o igual a cualquier distancia de una línea de flujo que converja a  $k \in PO$ ”.*

La definición anterior conduce a las siguientes proposiciones:

- 1) *“Por cada  $k \in PO$  existe una y solo una CD”.*
- 2) *“Si  $l_{dis}$  es la distancia asociada con un segmento ( $S_1$ ) que converge a un  $k \in PO$  y  $r_0$  es radio de la circunferencia y  $r_0 < l_{dis}$ , entonces existe un punto de intersección en CD y  $S_1$ .”*

Una CD se considera analítica si:

$$CD = I_{CD} \cup \partial_{CD}$$

Aquí,  $I_{CD}$  y  $\partial_{CD}$  representa el interior y la frontera de una CD.

Las siguientes proposiciones son importantes en este trabajo de tesis:

- 1) *“Sean  $k_1, k_2, \dots, k_n \in PO$  puntos de distribución asociados con una línea de producción estrictamente secuencial. Entonces existirán  $CD_1, CD_2, \dots, CD_n$  asociadas a  $k_1, k_2, \dots, k_n \in PO$ , tal que:*
  - a)  $CD_1 \cap CD_2 \cap \dots \cap CD_n = \phi$
  - b) *Si  $CD_1 \cup CD_2 \neq \phi \exists p \in \partial_{CD1}$  y  $p \in \partial_{CD2}$  tal que  $p \in \partial_{CD1} \cap \partial_{CD2}$ .*
- 2) *Si en un área de trabajo  $A_T$  existen  $CD_1, CD_2, \dots, CD_n$  circunferencias, entonces toda línea LFM o, equivalentemente, toda segmentación asociada con un  $B^M$  se intersecta en un punto  $p \in \partial_{CD1}$  con alguna circunferencia. (excepto en la segmentación asociada con la familia  $B_{PP}$ ).*

- 3) Los radios de cada  $CD_n$  quedan determinados por la condición:  $CD_1 \cap CD_2 \cap \dots \cap CD_n = \phi$ .

La figura siguiente muestra la asociación de circunferencias de distribución para proceso secuencial arbitrario.

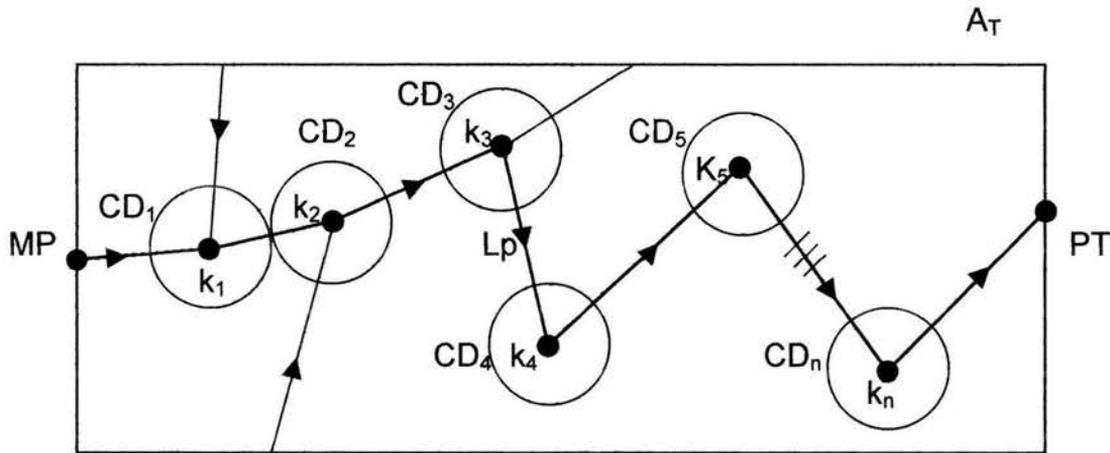


Figura 3.5 CD,s en  $A_T$

### 3.4. Caracterización y distribución de maquinaria usando CD

El interés en esta sección es discutir en términos generales el uso de las CD,s para caracterizar y distribuir maquinaria. De acuerdo con (Jiménez E., 2002), los puntos de intersección entre líneas LFM y CD,s caracterizan maquinaria de transporte y los puntos PO maquinaria de operación principal.

Las siguientes definiciones son fundamentales en este trabajo:

- 1) "Por cada  $k \in PO$  asociar una máquina principal ( $M^i$ )".
- 2) "Por cada  $p \in CD \cap LFM$  o  $p \in CD_1 \cap CD_2 \cap LFM$  asociar dos máquinas ( $M_i$ ) de transporte con el siguiente procedimiento:
  - 2.1) Una máquina de transporte cerca de "p" y en el exterior de CD.
  - 2.2) Una máquina de transporte cerca de "p" y en el exterior de CD.

La figura siguiente muestra un área de trabajo, un Lp y un CD y maquinaria de trabajo distribuida según los pasos anteriores:

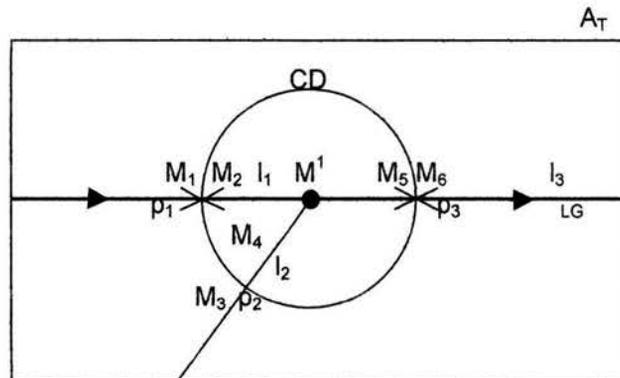


Figura 3.6 Distribución de maquinaria principal y de transporte

Las máquinas  $M_1$ ,  $M_3$  y  $M_6$  de transporte están localizadas en el exterior de CD, en tanto, las máquinas  $M_2$ ,  $M_4$  y  $M_5$  se ubican en el interior, ambos conjuntos de máquinas cercanas a los puntos de  $p \in CD \cap LFM$ .

En general, las operaciones de transporte sobre una línea LFM se puede realizar con una o varias máquinas. La selección adecuada del número de máquinas de transporte depende de las características del material por transportar, las distancias y de los grados de libertad (GDL) requeridos para dichas operaciones. Una gran diversidad de maquinaria o dispositivos para transportar materiales se dispone en los mercados por ejemplo:

- 1) Robots industriales.
- 2) Bandas síncronas.
- 3) Actuadores neumáticos e hidráulicos.
- 4) Sistemas de desplazamientos por vibración.
- 5) Transportes móviles (AGV,s).

Sin embargo, es posible agrupar parámetros fundamentales para selección de la maquinaria de transporte. Dichos parámetros se muestran en la “primitiva de transporte ( $P_{TRS}^M$ )” siguiente:

$$P_{TRS}^M = \{ GDL, L_{DIS}, \text{Peso} \}$$

Aquí,  $L_{DIS}$  es la distancia a transporta y “Peso” el peso por transportar.

Los transportes localizados en el exterior de los CD,s generalmente son bandas y los transportes ubicados en el interior de los CD,s son máquinas especializadas. Cuatro clases de transportes pueden ser definidas:

- 1) Clase 1 (de precisión).
- 2) Clase 2 (de 1 hasta 6 GDL).
- 3) Clase 3 (de grandes distancias).
- 4) clase 4 (auxiliares).

Las dos primeras clases de transportes se pueden localizar en el interior de los CD,s y los dos restantes en el exterior. Con una primitiva descrita por:

$$P_{TRS}^M = \{ 5 \text{ GDL}, 2 \text{ metros}, 5 \text{ Kg.} \}$$

se puede seleccionar un robot industrial. Por ejemplo, con una primitiva  $P_{TRS}^M = \{ 1 \text{ GDL}, 10 \text{ metros}, 20 \text{ kgs} \}$  se podrá selección una banda síncrona.

Suponga que una LFM requiere de las cuatro clases de transporte. Entonces una representación por primitivas sería la siguiente:

- 1)  $P_{TRS1}^M = \{ 1 \text{ GDL}, 10 \text{ cm}, 2 \text{ kg}, E_{CD} \}$ ; (actuador).
- 2)  $P_{TRS2}^M = \{ 1 \text{ GDL}, 5 \text{ cm}, 2 \text{ kg}, E_{CD} \}$ ; (banda).
- 3)  $P_{TRS3}^M = \{ 5 \text{ GDL}, 1.5 \text{ cm}, 2 \text{ kg}, I_{CD} \}$ ; (robot).

$$4) \quad P_{TRS4}^M = \{1\text{GDL}, 0.1 \text{ cm}, 2 \text{ kg}, I_{CD}\}; \quad (\text{actuador}).$$

Aquí,  $E_{CD}$  y  $I_{CD}$  representan el interior y el exterior de una CD. La figura siguiente muestra la distribución de los transportes anteriormente caracterizados:

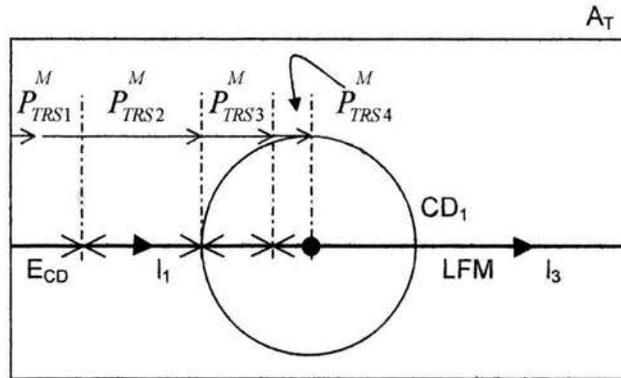


Figura 3.7 Clases de transportes en una líneas LMF

En general, la primitiva  $P_{TRS1}^M$  caracteriza transporte de pequeñas distancias y se pueden localizar en los almacenes, la primitiva  $P_{TRS2}^M$  idealiza transporte de distancias considerables, los GDL requeridos normalmente son 1 y 2. La primitiva  $P_{TRS3}^M$  caracteriza transporte de 1 hasta 6GDL y distancias mucho menores que la clase 3. La primitiva  $P_{TRS4}^M$  idealiza transporte de precisión y se relacionan con productos preparados o cuando un transporte clase 2 no ubica correctamente el componente sobre un lugar específico.

Es importante señalar que existen transportes realizados por una sola máquina o dispositivo. En ocasiones la geometría de los componentes también es un parámetro que se debe considerar. Puesto que en esta tesis se trabajó con piezas pequeñas y de geometría irregular, se añadirá a las primitivas la geometría. Por tanto, los parámetros finales mínimos que se requieren para seleccionar un transporte son:

$$P_{TRS(C_i)}^M = \{GDL, L_{DIS}, \text{Peso}, G, \{E_{CD}, I_{CD}\}\}.$$

Aquí,  $C_i$  indica la clase,  $G$  es una geometría del componente y el conjunto  $\{E_{CD}, I_{CD}\}$  indica la localización del transporte ya sea en el exterior o interior de una CD.

La circunferencia de distribución puede definir clases de transporte; esto es:

- 1) Clase 1 y 2; en el exterior de una CD.
- 2) Clase 3 y 4; en el interior de una CD.

Finalmente, para transportes realizados con una sola máquina o dispositivo, se considerará que para esa máquina, los cuatro clases coinciden o son equivalentes.

### **3.4.1 Algunas consideraciones sobre la maquinaria principal**

Para seleccionar la maquinaria principal, es necesario caracterizar la familia  $B_{MAE}$  en términos de primitivas de manufactura, puesto que se supone que una vez generadas las primitivas se han hecho los cálculos e interpretaciones relativas a las tolerancias y a la selección de los herramientas.

Así mismo, para las máquinas principales, al igual que las máquinas de transporte, se tienen una gran variedad de marcas, tipos y configuraciones. Su selección en términos estrictamente técnicos depende en general de:

- 1) La primitiva de manufactura ( $P^M_{MAE}$ ).
- 2) La tasa de producción (TP).
- 3) Flexibilidad (FLE).
- 4) Grado de automatización (GA).

El hecho de que la maquinaria principal dependa de la familia  $B_{MAE}$  es que dicha familia es caracterizada por las operaciones principales.

Una primitiva generalizada, es decir, que represente la información mínima ( $P^M_{MAE}$ ) y la información adicional (TP, FLE Y GA), puede ser la siguiente:

$$P_{PRINCIPAL}^M = \left\{ \left\{ P_{MAE}^M \right\}, \left\{ TP, FLE, GA \right\} \right\}$$

Suponga que se desea seleccionar una máquina para realizar taladrados en una pieza. Entonces, la primitiva generalizada puede ser la siguiente:

$$P_{PRINCIPAL}^M = \left\{ \left\{ \left\{ P_{MAE}^M \right\}, \left\{ G_{TAL} \right\} \right\}, \left\{ \left\{ p \in \partial_{MP}, \underline{e}_1, \phi, \ell \right\} \right\}, \left\{ \left\{ \tau_{CORTE}, v_{AVANCE}, W_H, W_{MP} \right\} \right\}, \left\{ \left\{ H \right\}, \left\{ k_{ij} \right\} \right\}, \left\{ \left\{ Alta \right\}, \left\{ Mediana \right\}, \left\{ Mediana \right\} \right\} \right\}$$

Aquí,  $P_{MP}^M$  es una primitiva de la materia prima (subparte o producto preparado,  $G_{TAL}$  es la geometría del taladrado,  $p \in \partial_{MP}$  es un punto de contacto de la herramienta  $H$ ,  $\underline{e}_1$  es la dirección del corte,  $\phi$  el diámetro,  $\ell$  la profundidad,  $\tau_{CORTE}$  es una trayectoria,  $V_{AVANCE}$  una velocidad,  $W_H$  el movimiento de la herramienta,  $W_{MP}$  el movimiento de la materia prima,  $H$  la herramienta y  $k_{ij}$  un conjunto de parámetros técnicos adicionales.

Cabe señalar que cada operación tiene asociada su primitiva generalizada y la selección de la maquinaria principal depende de dicha primitiva y de otros factores no señalados en este trabajo de tesis. Las circunferencias de distribución solamente señalan que la localización de la maquinaria debe ser cercana a los puntos  $k \in PO$ .

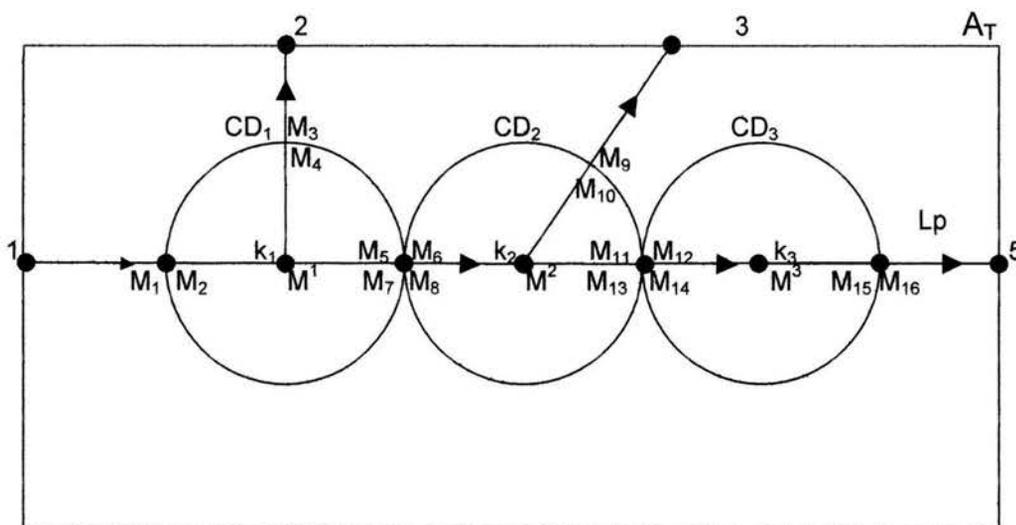
### 3.4.2. Discriminación de maquinaria de transporte

La maquinaria de transporte distribuida, de acuerdo con la figura 3.6, puede ser excesiva, pues para una sola operación se requiere seis máquinas o dispositivos de transportes. Para poder discriminar maquinaria de este tipo, es necesario evaluar las primitivas de transporte. Por ejemplo, si las máquinas  $M_1$  y  $M_3$  pueden transportar y posicionar las materias primas sobre una mesa sobre la cual, se localice el punto  $k$ , entonces  $M_1 \equiv M_2$  y  $M_3 \equiv M_4$ . También si la máquina  $M_5$  puede transportar y posicionar el componente generado de la mesa de operación a la frontera del área de trabajo, entonces  $M_5 \equiv M_6$ . Entonces, solo se requerirán tres máquinas de transporte.

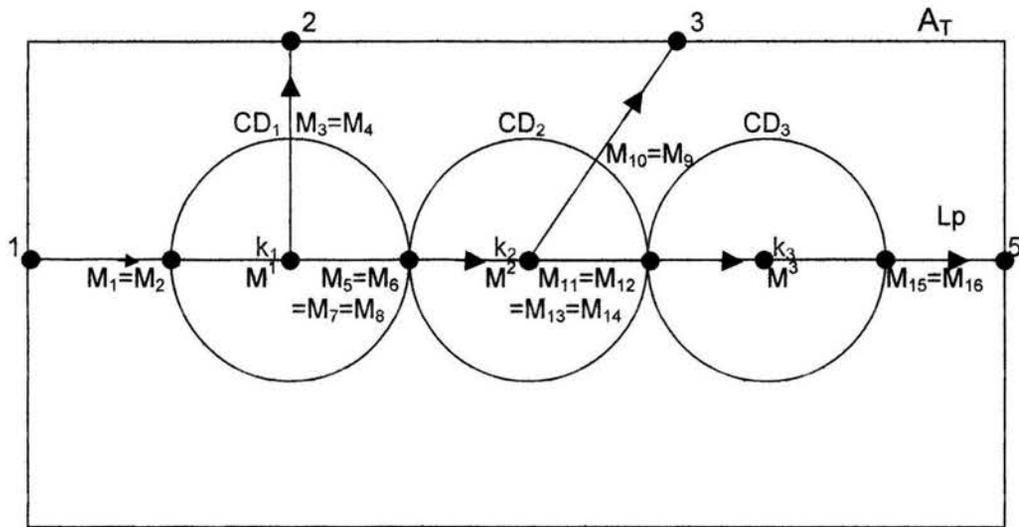
De hecho, las circunferencias y la distribución de maquinaria de transporte indican el número máximo admisible de máquinas de este tipo y su posible clasificación. El número mínimo de máquinas de transporte dependerá de las primitivas de transporte, las distancias de las líneas de flujo, entre otros factores importantes. Si se tomará como premisa el hecho de que por cada punto  $p \in CD \cap LMF$  se asociaría dos máquinas de transporte, se puede inferir las proposiciones siguientes:

- 1) “El número de máquinas de transporte depende del número de líneas LFM.”
- 2) Las intersecciones  $p \in CD \cap LMF$  determinan clases de transporte ( en el interior y en el exterior de una CD); clase 1 y 2 en  $E_{CD}$  y clase 3 y 4 en  $I_{CD}$ .”

Las figuras siguientes muestran la distribución de maquinaria principal y de transporte para los ejemplos mostrados en las figura 3.3, así como discriminación hipotética de maquinaria de transporte:



a)



b)

Figura 3.8 Distribución de maquinaria para procesos seriales; a) usando criterio CD; b) discriminación

### 3.5. Criterios de orden

En esta sección se presentan algunos criterios de orden relacionados con los puntos PO, PES y las líneas LFM, así como los CD,s generadas a partir de la secuencia o sucesión de operaciones con la cual fue construida la ecuación de forma. Considere ahora la siguiente restricción:

*“Los puntos PES asociados con una línea principal de flujo de materiales son fijos y conocidos”.*

Las siguientes proposiciones son importantes en este trabajo de tesis:

- 1) *El orden para la distribución de puntos PO está determinado por sucesión de operaciones.*
- 2) *El orden de distribución de las CD,s está determinado por el orden de los PO.*
- 3) *El orden de distribución de líneas LFM no principales está determinado por la sucesión de operaciones.*

## Capítulo 4

### Análisis y caracterización de la línea MIDCOM INC usando circunferencias de distribución

**Introducción.** En este capítulo se utilizan circunferencias de distribución para caracterizar la maquinaria de trabajo de un proceso productivo real (línea de Midcom). La ecuación de forma estática relacionada con el proceso de estudio ha sido desarrollada en el capítulo 2 de este trabajo de tesis. 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, PES y PO, respectivamente.

#### 4.1. Superoperaciones y suboperaciones relacionadas con el componente por procesar

De acuerdo con la sección 2.2.1 del capítulo 2, las operaciones principales de manufactura relacionadas con el componente "transformador eléctrico" procesado en la línea MIDCOM INC son las siguientes:

- 1)  $O_{11}^{P1}$  : Embobinado.
- 2)  $O_{12}^{P1}$  : Empapelado.
- 3)  $O_{13}^{P1}$  : Ensamble.
- 4)  $O_{14}^{P1}$  : Embobinado.
- 5)  $O_{15}^{P1}$  : Empapelado.
- 6)  $O_{11}^{P2}$  : Recubrimiento por flux.
- 7)  $O_{12}^{P2}$  : Soldadura por recubrimiento.
- 8)  $O_{13}^{P2}$  : Eliminación de excedentes.

- 9)  $O_{14}^{P2}$  : Recubrimiento por flux.
- 10)  $O_{15}^{P2}$  : Soldadura por recubrimiento.
- 11)  $O_{16}^{P2}$  : Eliminación de excedentes.

Cabe señalar que el símbolo  $O_{11}^{P1}$  indica: P1 operación principal y  $O_{11}$  la suboperación principal. Por otro lado, la operación de inyección no será analizada en este trabajo de tesis (dicha operación será sustituida por un ensamble  $O_{13}^{P1}$ ).

Para lograr los objetivos de este trabajo se utilizará la siguiente caracterización de superoperaciones y suboperaciones:

1) Superoperación  $O_1^{SE}$  de embobinado 1.

$O_1^S$  : Suboperación de embobinado 1.

$O_2^S$  : Suboperación de empapelado 1.

2) Superoperación  $O_2^{SS}$  de soldadura 1.

$O_1^S$  : Suboperación de recubrimiento por flux 1.

$O_2^S$  : Suboperación de soldadura por recubrimiento 1.

$O_3^S$  : Suboperación de eliminación de excedente 1.

3) Superoperación  $O_3^E$  de ensamble.

$O_1^S$  : Suboperación de ensamble.

4) Superoperación  $O_4^{SE}$  de embobinado 2.

$O_1^S$  : Suboperación de embobinado 2.

$O_2^S$  : Suboperación de empapelado 2.

5) Superoperación  $O_5^{SS}$  de soldadura 2.

$O_1^S$  : Suboperación de recubrimiento por flux 2.

$O_2^S$  : Suboperación de soldadura por recubrimiento 2.

$O_3^S$  : Suboperación de eliminación de excedente 2.

Nótese que el sistema real de manufactura MIDCOM tiene asociadas 5 superoperaciones y 11 suboperaciones.

#### 4.2. Reformulación de la ecuación de forma

En esta sección se reformulará la ecuación de forma relacionada con el componente "transformador eléctrico". Para ello, se usarán las superoperaciones y suboperaciones descritas en la sección anterior.

Supóngase ahora que cada superoperación (junto con sus suboperaciones) generen los siguientes dominios de manufactura:

1)  $(B_1^M, O_1^{SE})$ :

1.1)  $B_{MP} = \{ A, B'_1, B'_{SUB1} \}$

1.2)  $B_{PP} = \{ B_{PP1}, B_{PP2} \}$

1.3)  $B_{MA} = \{ B_1, C_1 \}$

1.4)  $B_{SUB} = \{ B_{SUB1}, B_{SUB2} \}$

1.5)  $B_{PT} = \{ PT_1 \}$

2)  $(B_2^M, O_2^{SS})$ :

2.1)  $B_{MP} = \{ PT_1, D'_1, B'_{SUB1}, B'_{SUB2} \}$

2.2)  $B_{PP} = \{ B_{PP3}, B_{PP4}, B_{PP5} \}$

2.3)  $B_{MA} = \{ D_1, S_1, F_1 \}$

$$2.4) B_{SUB} = \{ B_{SUB3}, B_{SUB4}, B_{SUB5} \}$$

$$2.5) B_{PT} = \{ PT_2 \}$$

$$3) (B_3^M, O_3^E):$$

$$3.1) B_{MP} = \{ PT_2, M' \}$$

$$3.2) B_{PP} = \{ B_{PP6} \}$$

$$3.3) B_{MA} = \{ M \}$$

$$3.4) B_{SUB} = \{ B_{SUB6} \}$$

$$3.5) B_{PT} = \{ PT_3 \}$$

$$4) (B_4^M, O_4^{SE}):$$

$$4.1) B_{MP} = \{ PT_3, B'_2, B'_{SUB1} \}$$

$$4.2) B_{PP} = \{ B_{PP7}, B_{PP8} \}$$

$$4.3) B_{MA} = \{ B_2, C_2, \}$$

$$4.4) B_{SUB} = \{ B_{SUB7}, B_{SUB8} \}$$

$$4.5) B_{PT} = \{ PT_4 \}$$

$$5) (B_5^M, O_5^{SS}):$$

$$5.1) B_{MP} = \{ PT_4, D'_2, B'_{SUB1}, B'_{SUB2} \}$$

$$5.2) B_{PP} = \{ B_{PP9}, B_{PP10}, B_{PP11} \}$$

$$5.3) B_{MA} = \{ D_2, S_2, F_2 \}$$

$$5.4) B_{SUB} = \{ B_{SUB9}, B_{SUB10}, B_{SUB11} \}$$

$$5.5) B_{PT} = \{ PT_5 \}$$

Es importante señalar que los dominios de manufactura descritos anteriormente están dados en términos de subpartes. Nótese que al ser los procesos y operaciones de la línea MIDCOM INC secuenciales, entonces  $PT_5 \approx PT$ .

Las ecuaciones de forma y subforma relacionadas con los dominios de manufactura mencionadas anteriormente son las siguientes:

$$\text{a) } PT_1 \approx B_{SUB2} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{(A \overset{Pr}{U} B'_1)}_{B_{PP1}}} \overset{M,B}{U} B_1)}_{B_{SUB1}}} \overset{Pr}{U} C_1)}_{B_{PP2}} \overset{M,P}{U} C_1)$$

$$\text{b) } PT_2 \approx B_{SUB5} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{(PT_1 \overset{Pr}{U} D_1)}_{B_{PP3}}} \overset{R}{U} D_1)}_{B_{SUB3}}} \overset{Pr}{U} S_1)}_{B_{PP4}}} \overset{S}{U} S_1)}_{B_{SUB4}} \overset{Pr}{U} F_1)}_{B_{PP5}} - F_1)$$

$$\text{c) } PT_3 \approx B_{SUB6} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{(PT_2 \overset{Pr}{U} M)}_{B_{PP6}}} \overset{M}{U} M)}_{B_{SUB6}}$$

$$\text{d) } PT_4 \approx B_{SUB8} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{(PT_3 \overset{Pr}{U} B_2)}_{B_{PP6}}} \overset{M,B}{U} B_2)}_{B_{SUB7}}} \overset{Pr}{U} C_2)}_{B_{PP8}} \overset{M,P}{U} C_2)$$

$$\text{e) } PT_5 \approx B_{SUB11} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{(PT_4 \overset{Pr}{U} D_2)}_{B_{PP9}}} \overset{R}{U} D_2)}_{B_{SUB9}}} \overset{Pr}{U} S_2)}_{B_{PP10}}} \overset{S}{U} S_2)}_{B_{SUB10}} \overset{Pr}{U} F_2)}_{B_{PP11}} - F_2)$$

La figura siguiente muestra las formas geométricas de los subproductos  $PT_1$ ,  $PT_2$ ,  $PT_3$ ,  $PT_4$  y  $PT_5$ .

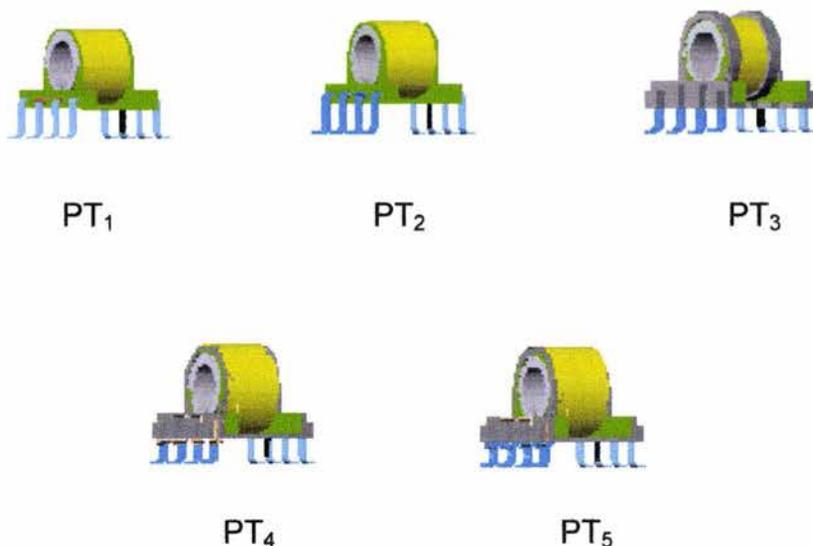


Figura 4.1. Representación grafica de los componentes PT<sub>1</sub>, PT<sub>2</sub>, PT<sub>3</sub>, PT<sub>4</sub> y PT<sub>5</sub>

### 4.3. Ecuaciones de forma dinámicas y área de trabajo

En esta sección se representan las ecuaciones de forma dinámicas relacionados con los componentes mostrados en la figura 4.1. El área de trabajo asociada en el sistema productivo motivo de estudio es fija y conocida.

Las ecuaciones de forma dinámicas son las siguientes:

$$1) \overset{\leftrightarrow}{PT_1} \approx \overset{\leftrightarrow}{B_{SUB2}} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\overset{\leftrightarrow}{PT} \overset{\leftrightarrow}{U} \overset{\leftrightarrow}{B}'_1}_{B_{pp1}} \overset{\leftrightarrow}{U} \overset{\leftrightarrow}{B}_1}_{B_{SUB1}} \overset{\leftrightarrow}{U} \overset{\leftrightarrow}{C}_1}_{B_{pp2}} \overset{\leftrightarrow}{U} \overset{\leftrightarrow}{C}_1}_{B_{SUB2}}}$$

$$2) \overset{\leftrightarrow}{PT}_2 \approx \overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB5} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{R} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{S} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{E} \leftrightarrow}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP3}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB3}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP4}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB4}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP5}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB5}}$$

$$3) \overset{\leftrightarrow}{PT}_3 \approx \overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB6} = \underbrace{\underbrace{\overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{M} \leftrightarrow}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP6}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB6}}$$

$$4) \overset{\leftrightarrow}{PT}_4 \approx \overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB8} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{M,B} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{M,P} \leftrightarrow}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP6}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB7}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP8}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB8}}$$

$$5) \overset{\leftrightarrow}{PT}_5 \approx \overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB11} = \underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{R} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{S} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{Pr} \leftrightarrow \overset{\leftrightarrow}{E} \leftrightarrow}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP9}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB9}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP10}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB10}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{PP11}}}}_{\overset{\leftrightarrow}{B}_{SUB11}}$$

Nótese que el símbolo “↔” denota elementos de los dominios de manufactura en transito o dinámicos. Por otro lado, el área de trabajo relacionada con el sistema productivo motivo de estudio en este trabajo de tesis es la mostrada en la figura 4.2.

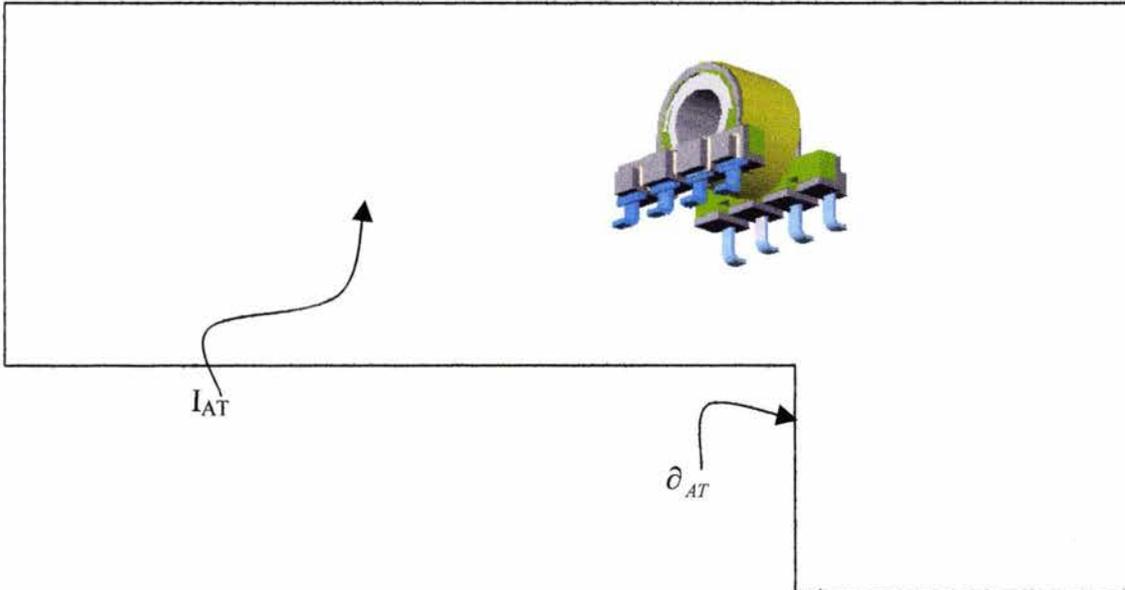


Figura 4.2. Área de trabajo analítica de la línea de producción MIDCOM INC

Como se recordará el área de trabajo  $A_T$  se dice analítica si:

$$A_T = I_{AT} \cup \partial_{AT}$$

#### 4.4. Líneas de flujo de materiales para las superoperaciones

En esta sección se definirán sobre el área de trabajo líneas de flujo de materiales relacionadas para este caso, con las superoperaciones descritas en la sección 3.2 de este trabajo. Es importante señalar que, para este caso, la maquinaria principal y de transporte relacionada con la línea MIDCOM INC son conocidas y, además, ya están distribuidas.

De acuerdo con la sección 4.1 de este capítulo, las superoperaciones relacionadas con el componente "transformador eléctrico" son las siguientes:

- 1) Embobinado 1  $(O_1^{SE} \Leftrightarrow O U^{M,B})$
- 2) Soldadura 1  $(O_2^{SS} \Leftrightarrow O U^S)$

- 3) Ensamble  $(O_3^E \Leftrightarrow U^M)$
- 4) Embobinado 2  $(O_4^{SE} \Leftrightarrow U^{M,B})$
- 5) Soldadura 2  $(O_1^{SS} \Leftrightarrow OU^S)$

Los procesos de manufactura aplicados a la pieza MIDCOM son secuenciados y el subproducto que ordena la caracterización de las líneas de flujo de materiales es PT1 o PT5. La figura 4.3 muestra los PO, PES y LFM relacionados con las superoperaciones descritas anteriormente:

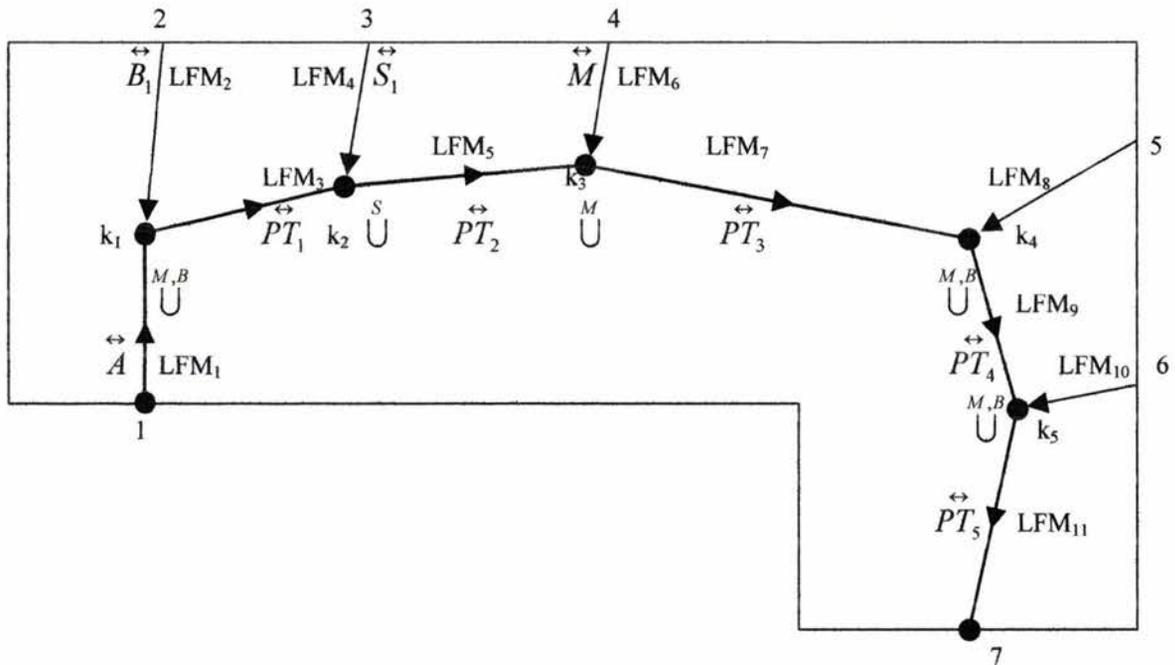


Figura 4.3. Puntos PO, PES y LFM para superoperaciones

Finalmente, las localizaciones de los puntos PO y (1), (7)  $\in$  PES son próximas a los verdaderos puntos de distribución de la línea, ya que se supone que la maquinaria es fija y conocida.

#### 4.5. Circunferencia de distribución para superoperaciones

De acuerdo con el capítulo 3 de este trabajo, por cada punto  $k_i \in$  PO se debe asociar una circunferencia de distribución (CD). La figura 4.4 muestra dichas circunferencias relacionados con las superoperaciones.

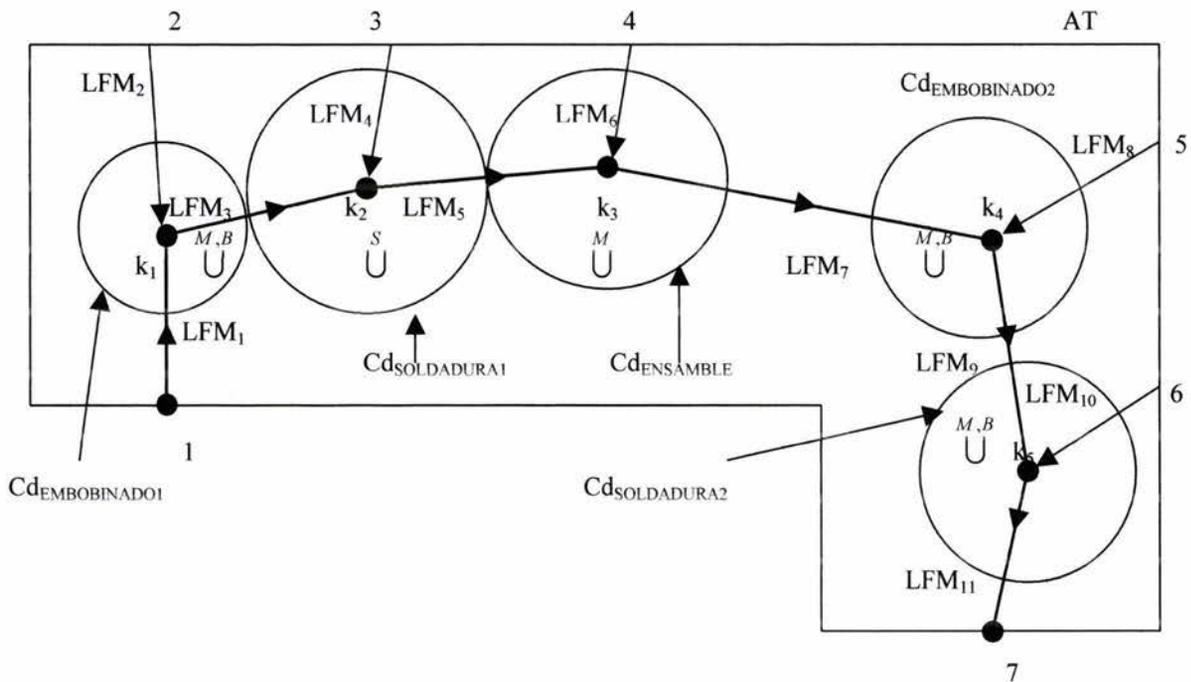


Figura 4.4. Circunferencias de distribución para superoperaciones de la línea de MIDCOM

Note en la figura anterior que existen 5 circunferencias relacionadas con 5 puntos  $K_i \in$  PO y cinco superoperaciones. Es importante recordar que el radio de las circunferencias de distribución es arbitrario, pues dichas entidades geométricas solo son útiles para caracterizar preliminarmente la maquinaria. Además, el hecho

de la  $Cd_{\text{ensamble}}$  sea disyunta con la  $Cd_{\text{embobinado2}}$  no tiene implicaciones importantes en el análisis.

#### **4.6. Circunferencias de distribución para suboperaciones y reconfiguración de líneas LFM**

En esta sección se analizará la distribución de maquinaria de la celda de producción MIDCOM considerando las suboperaciones relacionadas con las superoperaciones  $O_1^{SE}, O_2^{SS}, O_3^E, O_4^{SE}$  y  $O_5^{SS}$ . Por cada suboperación se define un punto de distribución y una circunferencia de distribución. Finalmente, las líneas LFM serán reconfiguradas bajo la nueva distribución de circunferencias.

La siguiente definición es importante en este trabajo:

“Toda suboperación tiene asociada una suboperación, es decir, su clase unitaria”.

La proposición siguiente se implica de la definición anterior:

“Si una superoperación tiene asociada una circunferencia de distribución  $Cd$  y si  $Cd_{\text{SUB}}$  es otra circunferencia relacionada con la clase unitaria de la superoperación; es decir, la suboperación, entonces:

$$Cd \Leftrightarrow Cd_{\text{SUB}}$$

Supóngase ahora que una superoperación tiene asociada “n” suboperaciones. Entonces existirán “n” circunferencias de distribución relacionadas con “n” suboperaciones, todas contenidas dentro de la circunferencia de distribución relacionada con la superoperación.

El interés ahora se centra sobre la definición de las suboperaciones. Estas fueron caracterizadas en la sección 4.1 de este capítulo. La tabla siguiente muestra dichas suboperaciones y el operador booleano asociado:

Superoperación	Operador booleano	Clase unitaria	Suboperaciones y operador booleano		
$O_1^{SE}$	$\begin{matrix} M,B \\ U \end{matrix}$	$O_1$	$O_1$	$\begin{matrix} 1^S \\ O_1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} M,B \\ U \end{matrix}$
			$O_2$	$\begin{matrix} 1^S \\ O_2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} M,B \\ U \end{matrix}$
$O_2^{SS}$	$\begin{matrix} S \\ U \end{matrix}$	$O_2$	$O_3$	$\begin{matrix} 2^S \\ O_1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} R \\ U \end{matrix}$
			$O_4$	$\begin{matrix} 2^S \\ O_2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} S \\ U \end{matrix}$
			$O_5$	$\begin{matrix} 2^S \\ O_3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} E \\ - \end{matrix}$
$O_3^E$	$\begin{matrix} M \\ U \end{matrix}$	$O_3$	$O_6$	$\begin{matrix} 3^S \\ O_1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} M \\ U \end{matrix}$
$O_4^{SE}$	$\begin{matrix} M,B \\ U \end{matrix}$	$O_4$	$O_7$	$\begin{matrix} 4^S \\ O_1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} M,P \\ U \end{matrix}$
			$O_8$	$\begin{matrix} 4^S \\ O_2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} M,P \\ U \end{matrix}$
$O_5^{SS}$	$\begin{matrix} S \\ U \end{matrix}$	$O_5$	$O_9$	$\begin{matrix} 5^S \\ O_1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} R \\ U \end{matrix}$
			$O_{10}$	$\begin{matrix} 5^S \\ O_2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} S \\ U \end{matrix}$
			$O_{11}$	$\begin{matrix} 5^S \\ O_3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} E \\ - \end{matrix}$

Tabla 4.1. Suboperaciones del componente MIDCOM

De acuerdo con la tabla anterior, existen 11 suboperaciones las cuales generan 11 circunferencias de distribución contenidas en las circunferencias asociadas con las superoperaciones; esto es:

- 1)  $CD_{\text{embobinado1}} = \{ Cd_{11}, Cd_{12} \}$
- 2)  $CD_{\text{soldadura1}} = \{ Cd_{21}, Cd_{22}, Cd_{23} \}$
- 3)  $CD_{\text{ensamble}} = \{ Cd_{31} \}$
- 4)  $CD_{\text{ensamble}} = \{ Cd_{31} \}$
- 5)  $CD_{\text{embobinado2}} = \{ Cd_{41}, Cd_{42} \}$
- 6)  $CD_{\text{soldadura2}} = \{ Cd_{51}, Cd_{52}, Cd_{53} \}$

Por otro lado, las siguientes relaciones deben ser satisfechas:

- 1)  $Cd_{11} \cap Cd_{12} \neq \phi$  y  $Cd_{11}, Cd_{12} \subseteq CD_{\text{embobinado1}}$
- 2)  $Cd_{21} \cap Cd_{22} \cap Cd_{23} \neq \phi$  y  $Cd_{21}, Cd_{22}, Cd_{23} \subseteq CD_{\text{soldadura1}}$
- 3)  $Cd_{31} \subseteq CD_{\text{ensamble}}$
- 4)  $Cd_{41} \cap Cd_{42} \neq \phi$  y  $Cd_{41}, Cd_{42} \subseteq CD_{\text{embobinado2}}$
- 5)  $Cd_{51} \cap Cd_{52} \cap Cd_{53} \neq \phi$  y  $Cd_{51}, Cd_{52}, Cd_{53} \subseteq CD_{\text{soldadura2}}$

Cabe señalar que el hecho de que  $Cd_{11} \cap Cd_{12} \neq \phi$  no implica que se pueden tocar en las fronteras. La figura siguiente muestra la distribución de circunferencia relacionadas con las suboperaciones.

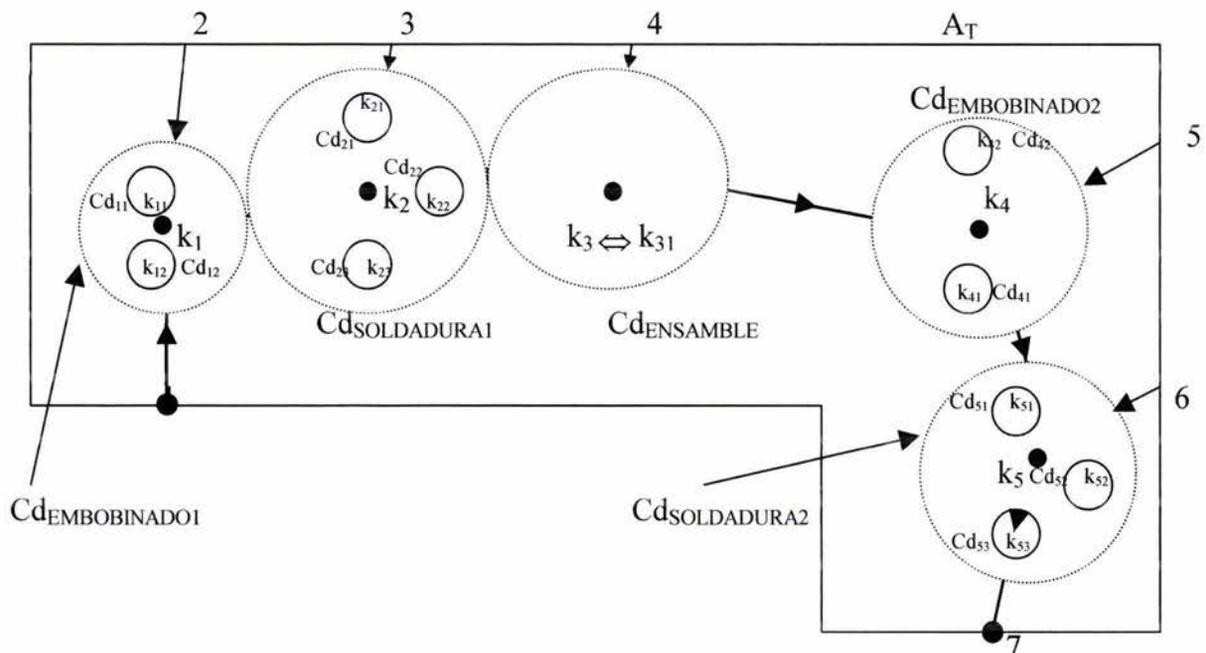


Figura 4.5. Distribución de circunferencias relacionadas con las suboperaciones

Note en la figura 4.5 que las líneas de flujo de materiales han sido eliminadas dentro de las circunferencias relacionadas con las superoperaciones. Para redistribuir las líneas de flujo de materiales se deben seguir los pasos siguientes:

- 1) Determinar si la línea de producción es secuencial.
- 2) Si la distribución de la maquinaria es conocida, entonces se conoce la crónica de operaciones y, por consecuencia, la secuencia de operaciones.
- 3) Asociar una Cd por cada suboperación siguiendo la secuencia de operaciones.
- 4) Conectar líneas de distribución entre circunferencias siguiendo la secuencia de operaciones en orden directo o inverso.

Nótese que:

- 1) La línea MIDCOM es secuencial.
- 2) La distribución de maquinaria es conocida y la secuencia de operaciones es:  $O_{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}$ . En la tabla 4.1 se muestran las características de la secuencia de operaciones.

3) La asociación de circunferencias Cd con las suboperaciones se muestra en la tabla siguiente:

Suboperación		Cd	Descripción de la operación
O <sub>i</sub>	Operador Boleano	---	
O <sub>1</sub>	<sup>M,B</sup> U	Cd <sub>11</sub>	Unión por montaje de bobina 1
O <sub>2</sub>	<sup>M,P</sup> U	Cd <sub>12</sub>	Unión por montaje de empapelado 1
O <sub>3</sub>	<sup>R</sup> U	Cd <sub>23</sub>	Unión por recubrimiento 1
O <sub>4</sub>	<sup>S</sup> U	Cd <sub>21</sub>	Unión por soldadura 1
O <sub>5</sub>	<sup>E</sup> —	Cd <sub>22</sub>	Diferencia de excedente 1
O <sub>6</sub>	<sup>M</sup> U	Cd <sub>31</sub>	Unión por montaje
O <sub>7</sub>	<sup>M,B</sup> U	Cd <sub>42</sub>	Unión por montaje de bobina 2
O <sub>8</sub>	<sup>M,P</sup> U	Cd <sub>41</sub>	Unión por montaje de empapelado 2
O <sub>9</sub>	<sup>R</sup> U	Cd <sub>51</sub>	Unión por recubrimiento 2
O <sub>10</sub>	<sup>S</sup> U	Cd <sub>53</sub>	Unión por soldadura 2
O <sub>11</sub>	<sup>E</sup> —	Cd <sub>52</sub>	Diferencia de excedente 2

Tabla 4.2. Asociación de Cd's con suboperaciones

Cabe señalar que la asociación de Cd's con las suboperaciones ha sido realizado usando la secuencia de operaciones, la cual fue proporcionada por la empresa MIDCOM INC.

- 4) La figura siguiente muestra una conexión entre Cd's siguiendo la secuencia de operaciones:

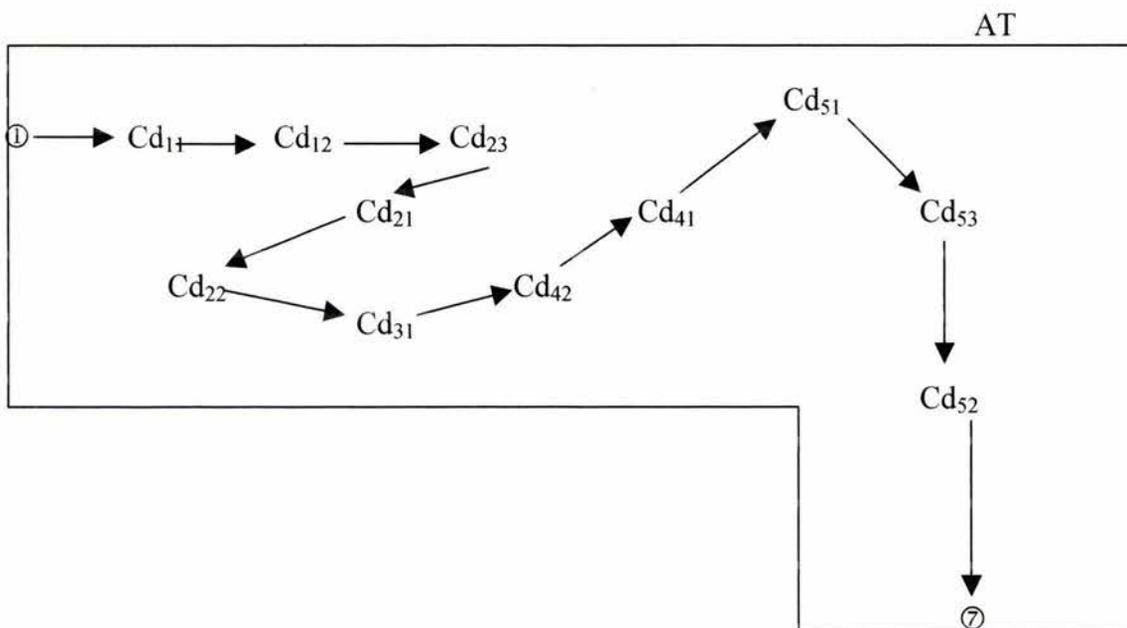


Figura 4.6. Conexión de Cd's siguiendo la secuencia de operaciones

Por otro lado, la figura siguiente muestra la reconfiguración total de las líneas LFM basada en la secuencia de operaciones:

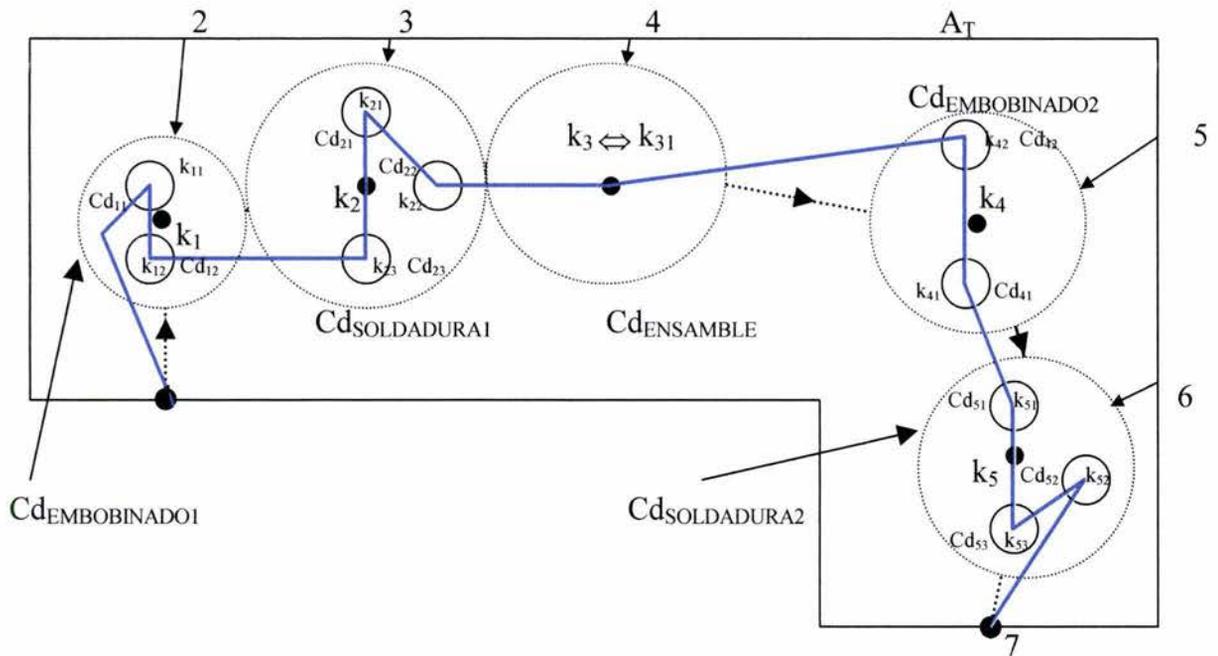


Figura 4.7. Reconfiguración de líneas LFM en la línea MIDCOM INC

Nótese en la figura anterior que existen 17 LFM en la línea de producción MIDCOM definidas sobre el área de trabajo.

#### 4.7. Maquinaria de trabajo y distribución sobre la línea de producción

En esta sección se caracteriza la maquinaria de trabajo y de transporte sobre la línea de producción MIDCOM INC. Se usarán para este propósito, la metodología siguiente:

- Paso 1) Eliminar líneas LFM que caracterizan flujos de materiales no intermitentes.
- Paso 2) Por cada punto de intersección entre CD's y entre CD's y LFM asociar una pareja de máquinas; una en el interior de las CD's y otra en el exterior, ambas próximas al punto de intersección.
- Paso 3) Por cada punto  $k \in PO$  asociar una máquina de operación principal. Si el proceso esta caracterizado por suboperaciones, entonces por cada  $k_i \in PO$  relacionar una máquina principal.

- Paso 4) Si la línea de producción ya está establecida, caracterizar la maquinaria de operación principal y transporte.
- Paso 5) Realizar una crónica de operaciones incluyendo la maquinaria, para el recorrido de ida de un producto sobre la línea de producción.
- Paso 6) Eliminar y/o anexar maquinaria de operación principal y/o de transporte distribuida según los pasos 2) y 3), de acuerdo con la crónica del paso 5).
- Paso 7) Redistribuir la maquinaria sobre la línea de producción.

#### **4.7.1. Eliminación de líneas de flujo de materiales y primera distribución preliminar de maquinaria**

En esta sección se aplicarán los pasos 1), 2) y 3) de la metodología descrita en la sección anterior para eliminar LFM redundantes y distribuir, preliminarmente, maquinaria de operación principal y transporte.

Paso 1) Las líneas LFM eliminadas, son: LFM'<sub>2</sub>, LFM'<sub>6</sub>, LFM'<sub>9</sub>, LFM'<sub>12</sub>, LFM'<sub>16</sub>

Dicha eliminación se justifica por las razones siguientes:

- a) Los insumos requeridos para el embobinado y empapelado se cargan en las máquinas y, hasta que se terminen de acuerdo con el número de piezas procesadas, se vuelve a recargar. Por tanto, las líneas LFM'<sub>2</sub> y LFM'<sub>12</sub> son intermitentes y se eliminan de la distribución de LFM mostradas en la figura 4.7.
- b) El material requerido para el ensamble es moldeado en una máquina (CD<sub>ensamble</sub>). El plástico usado se carga una vez y posteriormente hasta que se termina. Por tanto, la línea LFM'<sub>9</sub> es intermitente y se elimina.

- c) La soldadura y recubrimiento de flux son insumos intermitentes requeridos en las CD's de soldadura 1 y 2. Por tanto, las líneas  $LFM'_6$  y  $LFM'_{16}$  son intermitentes y también son eliminadas.

Es importante señalar que los datos de insumos intermitentes, fueron proporcionados por la empresa MIDCOM Inc. y, en este trabajo de tesis, dichos datos son utilizados para discriminar o, mas dicho, eliminar LFM.

Pasos 2), 3) La figura siguiente muestra la distribución de máquinas de operación principal y de transporte.

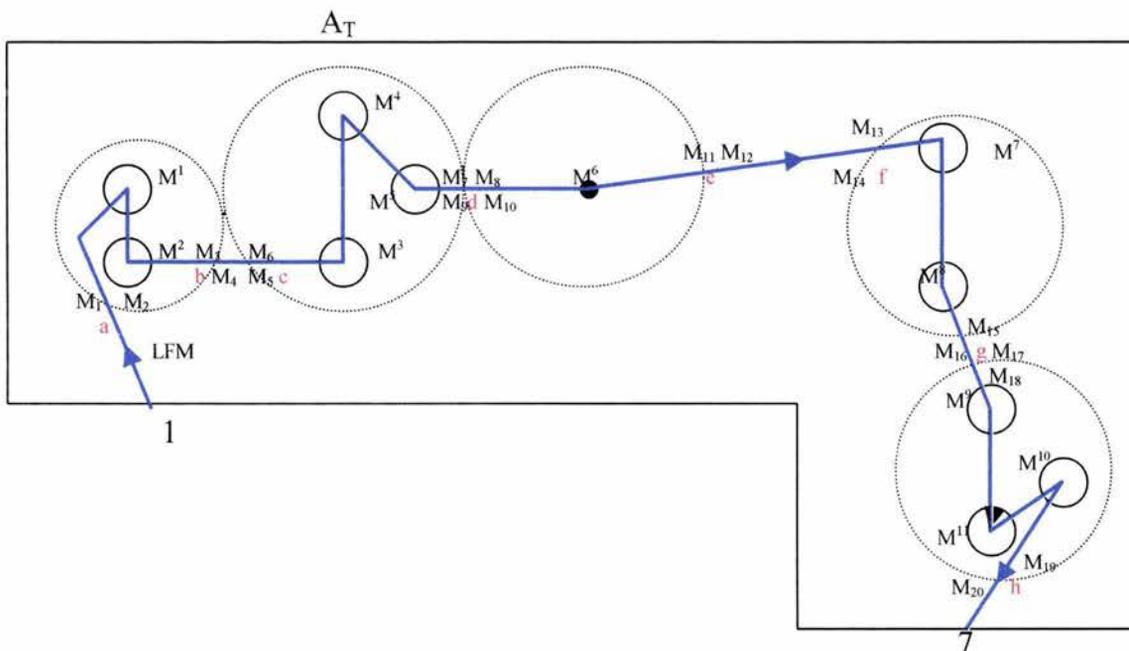


Figura 4.7. Distribución de máquinas de operación principal y de transporte de la línea idealizada MIDCOM INC

La tabla siguiente muestra los tipos de maquinaria distribuida preliminarmente los puntos de intersección y los puntos  $k_{ij} \in PO$ .

Puntos De Intersección	Puntos $k_{ij}$	Máquinas Principales	Máquinas de Transporte	CD	LFM de Transporte
a	-	-	$M_1, M_2$	Embobinado 1	$LFM_1^1$
b	-	-	$M_3, M_4$	Embobinado 1	$LFM_4^1$
c	-	-	$M_5, M_6$	Soldadura 1	$LFM_4^1$
d	-	-	$M_7, M_8, M_9, M_{10}$	Soldadura 1, ensamble	$LFM_8^1, LFM_8^1$
e	-	-	$M_{11}, M_{12}$	Ensamble	$LFM_{10}^1$
f	-	-	$M_{13}, M_{14}$	Embobinado 2	$LFM_{10}^1$
g	-	-	$M_{15}, M_{16}, M_{17}, M_{18}$	Embobinado 2 Soldadura 2	$LFM_{13}^1, LFM_{13}^1$
h	-	-	$M_{19}, M_{20}$	Soldadura 2	$LFM_{17}$
-	$k_{11}$	$M^2$	-	Embobinado 1	-
-	$k_{12}$	$M^1$	-	Embobinado 1	-
-	$k_{21}$	$M^3$	-	Soldadura 1	-
-	$k_{22}$	$M^5$	-	Soldadura 1	-
-	$k_{23}$	$M^4$	-	Soldadura 1	-
-	$k_{31}$	$M^6$	-	Ensamble	-
-	$k_{41}$	$M^8$	-	Embobinado 2	-
-	$k_{42}$	$M^7$	-	Embobinado 2	-
-	$k_{51}$	$M^9$	-	Soldadura 2	-
-	$k_{52}$	$M^{10}$	-	Soldadura 2	-
-	$k_{53}$	$M^{11}$	-	Soldadura 2	-

Tabla 4.3. Descripción de puntos de intersección y puntos  $k_{ij}$ , con maquinaria asociada

De acuerdo con la tabla anterior, existen:

- 1) 11 máquinas de operación principal.
- 2) 20 máquinas de transporte

Cabe señalar que la existencia de dichas máquinas se debe a la aplicación de la metodología desarrollada por (Jiménez, L, 2002).

#### 4.7.2. Caracterización de la línea real MIDCOM INC

En esta sección se utilizarán los pasos 4) y 5) de la metodología descrita anteriormente. Es importante precisar que la información que será mencionada en este trabajo, fue proporcionada por la empresa MIDCOM INC.

La tabla siguiente describe la maquinaria real usada en la línea MIDCOM INC:

Máquina	Descripción	Circunferencia de localización
$T_{R1}$	Transportador de riel vibratorio	$Cd_{embobinado1}$
$A_{C1}$	Dispositivo mecánico de 3 GDL (transportador)	$Cd_{embobinado1}$
$M_{EN11}$	Máquina empapeladora	$Cd_{embobinado1}$
$M_{12}$	Máquina embobinadora	$Cd_{embobinado1}$
$M_{T1}$	Dispositivo transportador giratorio	$Cd_{embobinado1}$
$R_{A1}$	Recipiente alimentador de 8 piezas	$Cd_{embobinado1}$

$T_{B1}$	Transportador de banda 2 GDL	$Cd_{embobinado1}$ $Cd_{soldadura1}$
$A_{C2}$	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)	$Cd_{embobinado1}$
$M_{A1}$	Manipulador cartesiano de 3GDL	$Cd_{soldadura1}$
$E_{F1}$	Estación de pasta para soldadura 1	$Cd_{soldadura1}$
$E_{S1}$	Estación de soldadura 1	$Cd_{soldadura}$ $Cd_{ensamble}$
$T_{R2}$	Transportador de riel vibratorio	$Cd_{ensamble}$
$A_{C3}$	Dispositivo mecánico de 1GDL (transportador)	$Cd_{ensamble}$
$M_{MD1}$	Estación de moldeo (ensamble)	$Cd_{ensamble}$
$R_{A2}$	Recipiente alimentador de 4 productos	$Cd_{ensamble}$
$M_{T2}$	Dispositivo transportador giratorio	$Cd_{ensamble}$
$A_{C4}$	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)	$Cd_{ensamble}$
$T_{R3}$	Transportador de riel vibratorio	$Cd_{ensamble}$ $Cd_{embobinado2}$
$A_{C5}$	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)	$Cd_{ensamble}$
$M_{EN21}$	Máquina empapeladora 2	$Cd_{embobinado2}$

$M_{EN22}$	Máquina de embobinado 2	$Cd_{embobinado2}$
$M_{T3}$	Dispositivo transportador giratorio	$Cd_{embobinado2}$
$R_{A3}$	Recipiente alimentador de 8 piezas	$Cd_{embobinado2}$
$T_{B2}$	Transportador de banda 2GDL	$Cd_{embobinado}$ $Cd_{soldadura2}$
$A_{C6}$	Dispositivo mecánico de 3GDL (transportador)	$Cd_{soldadura2}$
$M_{A2}$	Manipulador cartesiano de 3GDL	$Cd_{soldadura2}$
$E_{F2}$	Estación de pasta para soldadura 1	$Cd_{soldadura2}$
$E_{S2}$	Estación de soldadura 1	$Cd_{soldadura2}$
$T_{R4}$	Transportador de riel vibratorio	$Cd_{soldadura2}$

Tabla 4.4. Descripción de la maquinaria real de MIDCOM INC

La distribución de la maquinaria de la línea MIDCOM INC se muestra en la figura siguiente:

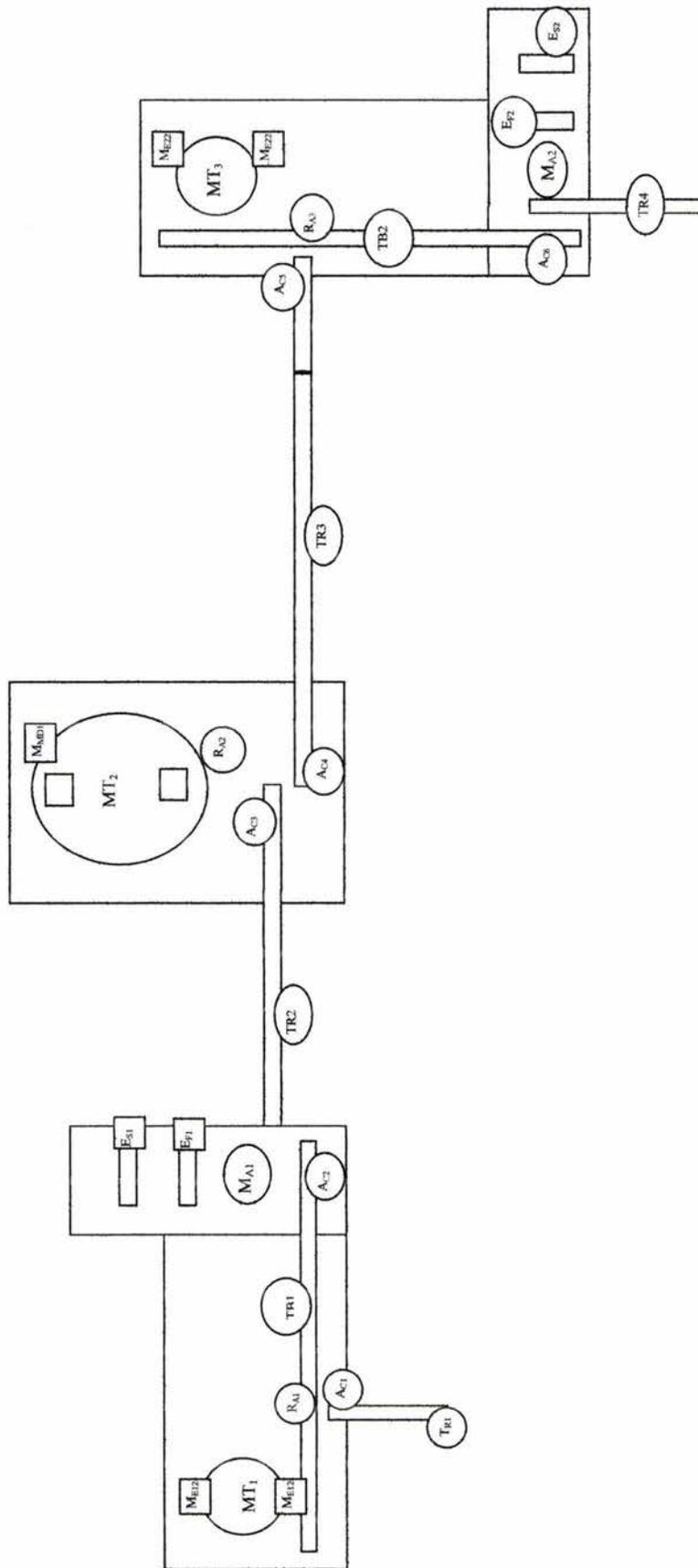


Figura 4.8. Distribución de maquinaria de la línea real de MIDCOM INC

Paso 5) La crónica de operaciones y procesos proporcionada por la empresa MIDCOM INC es la siguiente:

### **Crónica de operaciones de área de análisis**

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  $LG_4$ .

$TB_1$  transporta las piezas (nótese que a partir de este momento se llamará pieza al conjunto de 4 subpartes bobina) de  $LG_4$  a  $LG_5$ , donde una pieza (4 subpartes a la vez) es cargada en  $MT_1$ . La otra pieza espera en  $LG_5$  hasta el giro de  $MT_1$ .  $MT_1$  gira de  $LG_5$  a  $LG_6$ , 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  $LG_5$  a  $MT_1$  en la 2da estación de trabajo de  $MT_1$ .  $TB_1$ , posteriormente se traslada a  $LG_4$  con el objeto de recoger una carga mas de dos piezas en  $RA_1$ . Una vez la carga es recolectada,  $TB_1$  regresa a  $LG_5$  para esperar por las piezas provenientes de  $MT_1$ , 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 esperarán 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 *\_inmersión en soldadura líquida\_*). 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>).

TR<sub>2</sub> mueve las piezas secuencialmente (una a una) por medio de vibración de LG<sub>11</sub> a LG<sub>12</sub>, donde un dispositivo mecánico AC<sub>3</sub> de 1 GDL coloca las subpartes bobinas en el recipiente alimentador RA<sub>2</sub> también de forma secuencial hasta completar una pieza (4 subpartes), cambiándolas de posición de LG<sub>12</sub> a LG<sub>13</sub>. En LG<sub>13</sub>, otro dispositivo mecánico AC<sub>4</sub> de 3 GDL toma la pieza y la transporta a LG<sub>14</sub> liberándola en la mesa de trabajo MT<sub>2</sub>.

MT<sub>2</sub> gira de LG<sub>14</sub> a LG<sub>15</sub>, lugar donde se desarrolla la operación E (moldeo). Durante este movimiento, otra pieza es cargada secuencialmente en RA<sub>2</sub> por AC<sub>3</sub> y tomadas de LG<sub>13</sub> por AC<sub>4</sub>. Se debe mencionar que AC<sub>4</sub> permanece en LG<sub>13</sub>

hasta que el ciclo de la operación E es terminado y el giro de la mesa lleva la subparte a LG<sub>14</sub>'.

Una vez concluida la operación E, -como se menciona en el párrafo anterior- MT<sub>2</sub> gira de nuevo llevando la pieza de LG<sub>15</sub> a LG<sub>14</sub>', donde se realiza una operación de carga / descarga en MT<sub>2</sub> por AC<sub>4</sub>.

El dispositivo mecánico AC<sub>4</sub>, al concretar la carga / descarga se traslada de LG<sub>14</sub>' a LG<sub>16</sub> para desarrollar otra operación de carga / descarga, descargando la pieza procesada en TR<sub>3</sub>, y tomando una pieza por procesar de LG<sub>13</sub>. Se debe mencionar que AC<sub>4</sub> permanecerá en LG<sub>13</sub> hasta que MT<sub>2</sub> este en posición de descarga de nuevo.

TR<sub>3</sub> mueve las piezas secuencialmente por medio de vibración de LG<sub>16</sub> a LG<sub>17</sub>, donde un actuador mecánico AC<sub>5</sub> de 3 GDL toma las subpartes de una en una (nótese que se vuelve a utilizar el termino subparte, por corresponder a ¼ parte de pieza la que se maneja) y las coloca en el recipiente alimentador RA<sub>3</sub> hasta completar 8 bobinas en el alimentador, cambiando la posición de LG<sub>17</sub> a LG<sub>18</sub>. Una vez completada la carga de RA<sub>3</sub> en LG<sub>18</sub>, el transportador de banda TB<sub>2</sub> en cantidades de 2 piezas, completando el movimiento de LG<sub>19</sub> al lugar geométrico LG<sub>20</sub>.

Una vez que TB<sub>2</sub> esta situada en LG<sub>20</sub> una pieza (4 subpartes a la vez) es cargada en MT<sub>3</sub>. La otra pieza espera en LG<sub>20</sub> hasta el giro de MT<sub>3</sub>. MT<sub>3</sub> gira de LG<sub>20</sub> a LG<sub>21</sub>, donde se desarrolla la operación F, que corresponde al segundo devanado del transformador –embobinado-. Al tiempo que la operación F (segundo embobinado) es desarrollada, la pieza no. 2 es cargada en LG<sub>20</sub> a MT<sub>3</sub> en la 2da estación de trabajo. En este momento, TB<sub>2</sub> se traslada a LG<sub>19</sub> por otra carga de dos piezas y se regresa a LG<sub>20</sub>.

Una vez completada la operación F en LG<sub>21</sub>, MT<sub>3</sub> gira y las piezas son transportadas a LG<sub>22</sub>, donde posteriormente se desarrolla la operación G (segundo encintado). Durante el tiempo de la operación G (segundo encintado) en LG<sub>22</sub>, en LG<sub>21</sub> se desarrolla la operación F sobre la segunda pieza. Concluida la operación G, TB<sub>2</sub> toma las piezas de LG<sub>22</sub> a LG<sub>20'</sub>, donde esperaran por la segunda pieza, realizándose una operación de carga / descarga (descarga de pieza procesadas y carga de pieza por procesar) . Al concluir la operación F en la segunda pieza, MT<sub>3</sub> gira de LG<sub>21</sub> a LG<sub>22</sub> para desarrollar la operación G (segundo encintado) en la segunda pieza. Al terminar la operación G en la segunda pieza. TB<sub>3</sub> toma la segunda pieza de LG<sub>22</sub> a LG<sub>20'</sub>, repitiéndose la operación de carga / descarga de piezas.

Una vez que las dos piezas están situadas en LG<sub>20'</sub>, TB<sub>2</sub> transporta las piezas a LG<sub>23</sub>. Un dispositivo mecánico AC<sub>6</sub> de 3 GDL toma las piezas y las transporta de LG<sub>23</sub> a LG<sub>24</sub>, donde la operación H (segunda inmersión en fundente) se lleva a cabo. Una vez completada la operación H, AC<sub>6</sub> traslada las piezas de LG<sub>24</sub> a LG<sub>25</sub>, lugar donde se desarrolla la operación I (segunda soldadura). Concluída la operación I, AC<sub>6</sub> transporta las piezas de LG<sub>25</sub> a LG<sub>26</sub>, donde son liberadas en un transportador vibratorio de riel TR<sub>4</sub>.

Una vez liberadas las piezas en LG<sub>26</sub>, al transportador vibratorio de riel TR<sub>4</sub>, daremos por concluída nuestra crónica por representar la última operación del proceso a analizar.

De acuerdo con la crónica descrita, la figura siguiente muestra la localización de los lugares geométricos en la línea real de MIDCOM INC.

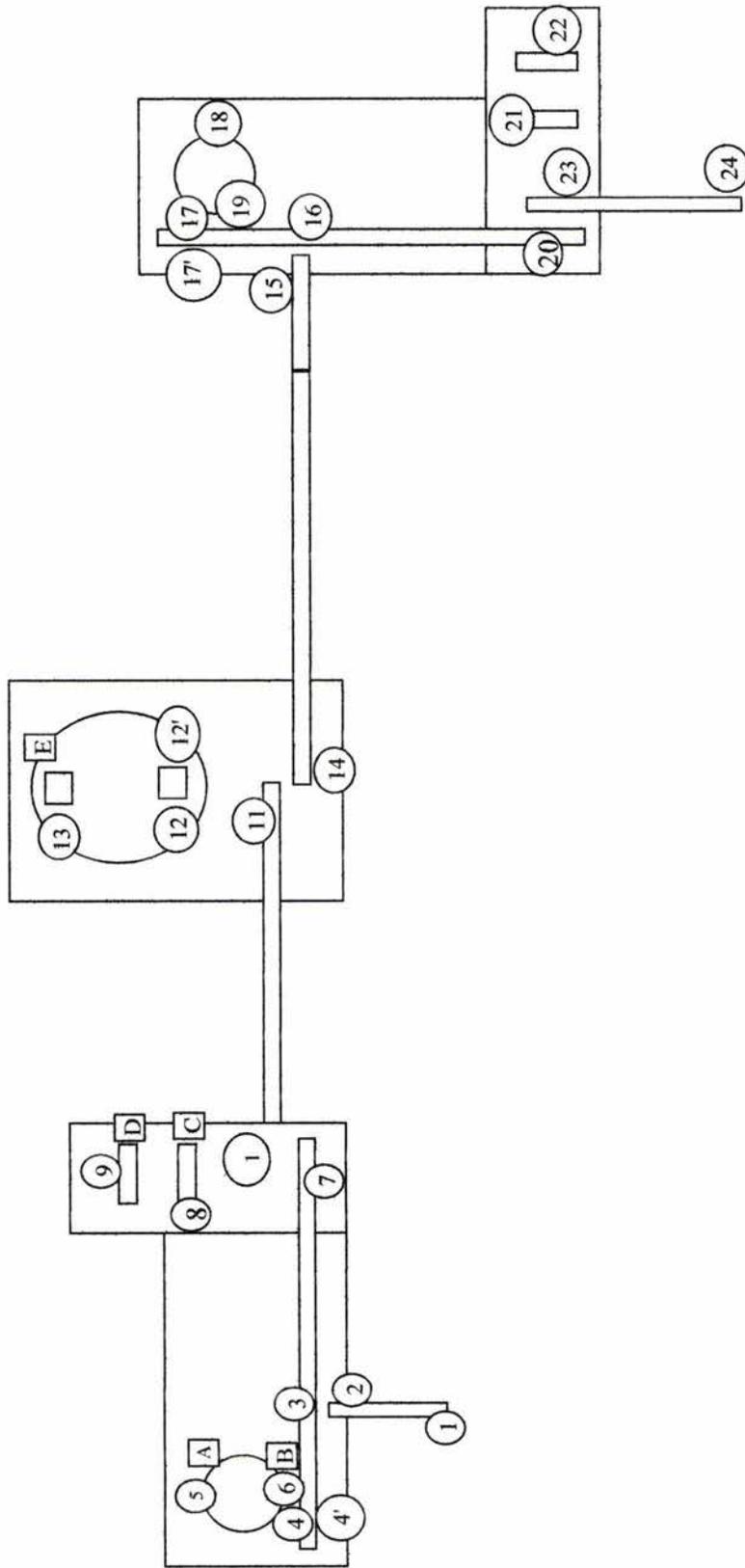


Figura 4.9 Localización de lugares geométricos en la línea real de MIDCOM INC

### 4.7.3. Evaluación de la maquinaria MIDCOM INC con la maquinaria distribuida por circunferencias de distribución

En esta sección se usarán los pasos 6) y 7) de la metodología descrita en la sección 4.1 de este trabajo de tesis para comparar las máquinas distribuidas usando circunferencias CD y con las máquinas de la línea MIDCOM INC. Se eliminará maquinaria de transporte o, en su caso, se agregarán nuevas máquinas justificando y caracterizando su uso de acuerdo con la crónica.

Para poder evaluar la maquinaria MIDCOM INC usando Cd, es necesario definir, los Cd teóricos sobre la distribución MIDCOM INC. Dicha distribución se muestra en la figura siguiente:

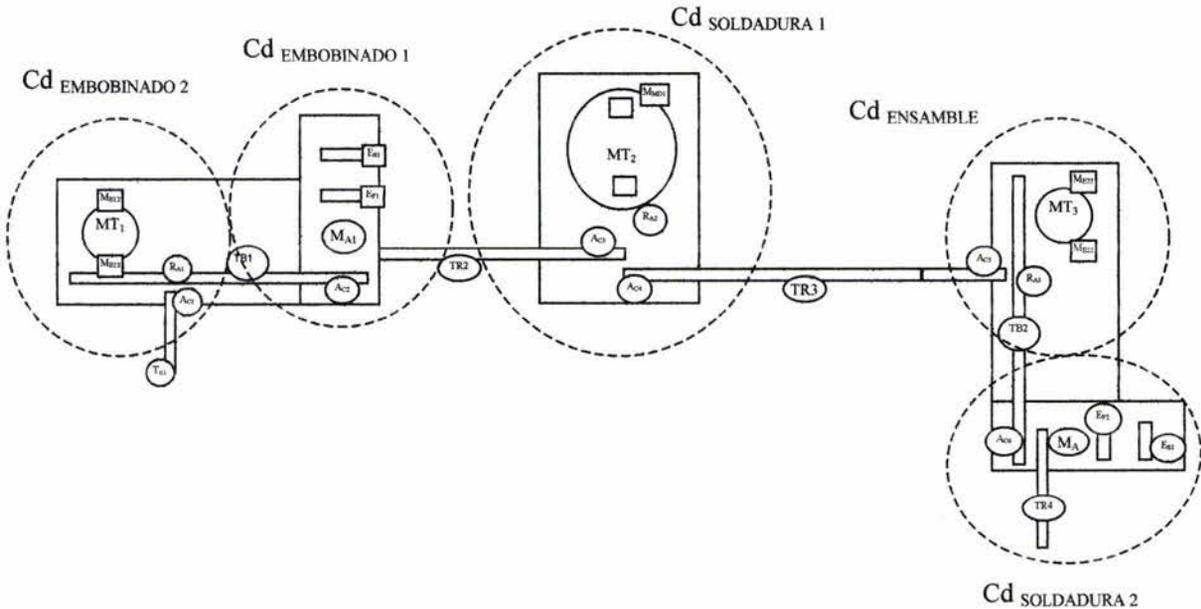


Figura 4.10 Circunferencia de distribución definidas en la línea MIDCOM INC

De acuerdo con las figuras 4.7, 4.8 y 4.10; la homologación de maquinaria MIDCOM y teórica se muestra en la tabla siguiente:

Maquinas teóricas		Maquinaria MIDCOM		CD
Operación Principal	Transporte	Operación principal	Transporte	
-	M <sub>1</sub>	-	T <sub>R1</sub>	Embobinado 1
-	M <sub>2</sub>	-	A <sub>C1</sub>	Embobinado 1
M <sup>1</sup>	-	M <sub>EN12</sub>	-	Embobinado 1
M <sup>2</sup>	-	M <sub>EN11</sub>	-	Embobinado 1
-	M <sub>01</sub>	-	M <sub>T1</sub>	Embobinado 1
-	M <sub>02</sub>	-	R <sub>A1</sub>	Embobinado 1
-	M <sub>3</sub> =M <sub>4</sub>	-	T <sub>B1</sub>	Embobinado 1 soldadura 1
-	M <sub>5</sub> =M <sub>6</sub>	-	A <sub>C2</sub>	Soldadura 1
M <sup>3</sup> =M <sup>4</sup> =M <sup>5</sup>	-	M <sub>A1</sub>	-	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 4.5. Caracterización de maquinaria teórica con maquinaria MIDCOM INC

Los resultados derivados de la caracterización y asociación de maquinaria teórica con maquinaria real de la línea MIDCOM INC se resumen en los pasos siguientes:

Paso 6) De acuerdo con los datos de la tabla 4.5, la eliminación y anexión de maquinaria es:

- 1) Se eliminarán 8 máquinas teóricas de transporte.
- 2) Se eliminarán 4 máquinas teóricas de operación principal.
- 3) Se caracterizaron (anexaron al contexto teórico) 6 máquinas de transporte real.

Paso 7) La redistribución de maquinaria teórica y real se muestra en la figura 4.10

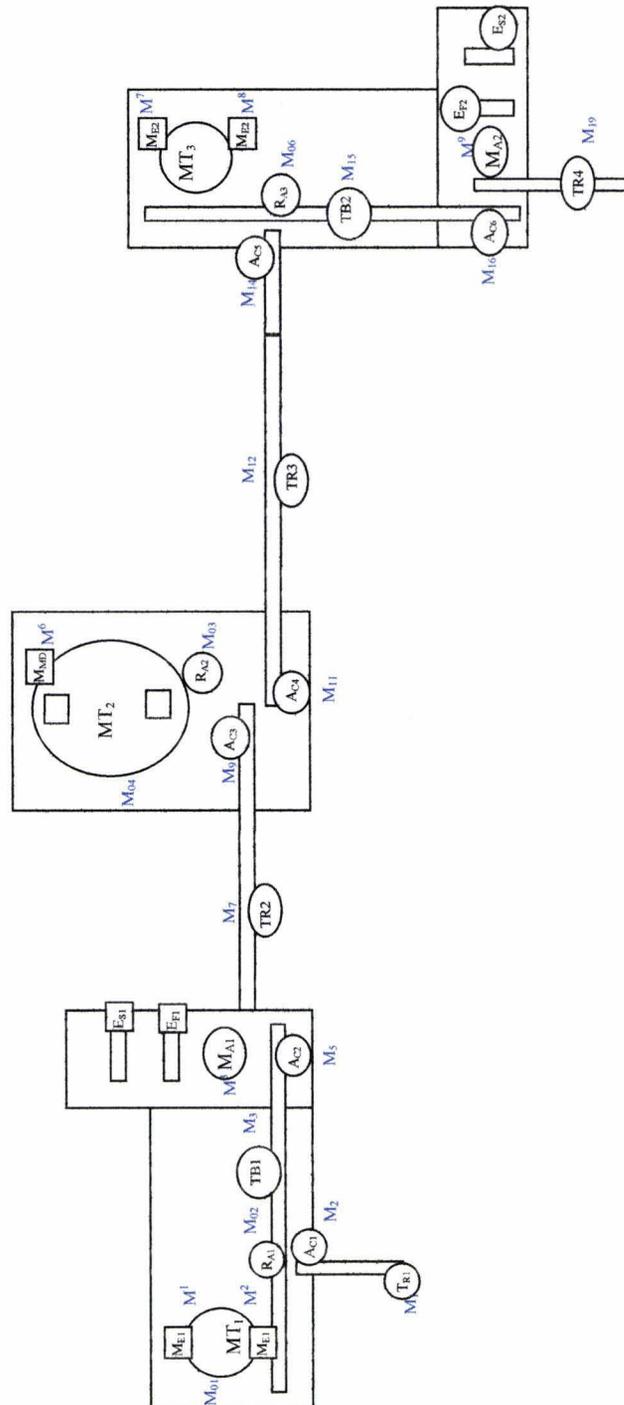


Figura 4.10. Redistribución de maquinaria teórica

#### 4.7.4 Algunas consideraciones sobre la eliminación y anexión de maquinaria

En esta sección se discutirá en términos breves los procesos de eliminación y/o anexión de maquinas teóricas y máquinas reales asociadas con la línea de producción MIDCOM INC.

La eliminación de maquinas teóricas principales se debió a que una sola máquina ( $M_{A1}$ ) realiza una superoperación de soldadura y tres suboperaciones; estas son:

$O_2^S$  y  $O_1^S, O_{1S}^2, O_{2S}^2, O_{3S}^2$ . En esta operación se eliminan las máquinas  $M_4$  y  $M_5$  quedando solamente  $M_3$  lo cual será equivalente a  $A_{C1}$  esto es:

$$M_3 \Leftrightarrow M_{A1}$$

También, la superoperación  $O_1^S$  y las suboperaciones  $O_{1S}^5, O_{2S}^5, O_{3S}^5$  son realizadas por la máquina  $M_{A2}$  y, por tanto, se eliminan las máquinas,  $M_{10}$  y  $M_{11}$ . Luego la siguiente equivalencia se satisface:

$$M_9 \Leftrightarrow M_{A2}$$

La siguiente proposición esta relacionada con la eliminación de máquinas de operación principal:

“El número de operaciones asociado con una secuencia final de operaciones de manufactura determina el número máximo teórico de máquinas principales. Por tanto, no existe un número de máquinas reales que supere al máximo teórico. Lo que si es posible, es reducir el número de máquinas teóricas hasta el mínimo posible, es decir 1, siempre que una máquina pueda realizar más de una superoperación o mas de una suboperación”.

Por otro lado, la eliminación de máquinas de transporte teóricas se da en el contexto de redundancia. Así, por ejemplo, las máquinas  $M_3$  y  $M_4$  realizan teóricamente la misma tarea que la máquina real  $T_{B1}$ . Esto también se repite para el caso de las maquinas teóricas  $M_5$  y  $M_6$  las cuales ejecutan la misma actividad que  $A_{C2}$ . Por tanto,

- 1)  $M_3 \Leftrightarrow T_{B1}$ ; eliminada  $M_4$
- 2)  $M_5 \Leftrightarrow A_{C2}$ ; eliminada  $M_6$

De acuerdo con la tabla 4.5, las siguientes equivalencias se satisfacen:

- 3)  $M_7 \Leftrightarrow T_{R2}$ ; eliminada  $M_8$
- 4)  $M_9 \Leftrightarrow T_{R3}$ ; eliminada  $M_{10}$
- 5)  $M_{12} \Leftrightarrow A_{C2}$ ; eliminada  $M_{13}$
- 6)  $M_{15} \Leftrightarrow T_{B2}$ ; eliminada  $M_{17}$
- 7)  $M_{16} \Leftrightarrow A_{C6}$ ; eliminada  $M_{18}$
- 8)  $M_{19} \Leftrightarrow T_{R4}$ ; eliminada  $M_{20}$

Es importante señalar que el hecho de que una máquina real pueda eliminar una máquina teórica no implica que dicha máquina, ejecute dos tareas de transporte, simplemente se dirá que la maquina teórica eliminada es redundante o esta demás.

La siguiente proposición se relaciona con la eliminación de máquinas de transporte teóricas:

“El número de máquinas de transporte generado por el número de intersecciones entre CD’s y CD’s y LFM no es un número máximo o mínimo teórico. No es máximo porque dicho número depende de las necesidades de transporte a lo largo de las líneas LFM que puede ser:

- 1) Primario de 1 hasta 6 GDL.
- 2) Primario de precisión 1 a 2 GDL.
- 3) Secundario de grandes distancias 1 GDL.
- 4) Secundario de pequeñas distancias 1GDL.

Por otro lado, el número de máquinas de transporte no es mínimo por el mismo hecho de las necesidades de transporte.

Nótese que si " $\pi$ " es el número de intersecciones entre CD's y LFM y CD's, entonces:

$$B_1 \leq \pi \leq B_2 \quad \text{y/o} \quad \pi \geq B_2$$

Aquí,  $B_1, B_2 \in \mathbb{N}$  son los números mínimo y máximo de máquinas de transporte:

Para el caso de la línea MIDCOM, los números  $\pi, B_1$  y  $B_2$  son:

- 1)  $\pi = 10$
- 2)  $B_1 = 2\pi - N_{\text{maqe}} = 12$
- 3)  $B_2 = B_1 + N_{\text{maqa}} = 12 + 6 = 18$

Aquí,  $N_{\text{maqe}}$  es el número de máquinas eliminadas y  $N_{\text{maqa}}$  es el número de máquinas agregadas.

Para finalizar este capítulo, se dirá que, en general, las máquinas de transporte agregadas son dispositivos de transporte de precisión o dispositivos de acumulación de materiales, es decir, "pallets".

## Conclusiones

En este trabajo de tesis fueron cumplidos los objetivos siguientes:

- Se utilizó una ecuación de forma admisible geoméricamente para caracterizar la maquinaria de la línea de producción MIDCOM INC.
- Fueron utilizadas circunferencias de distribución para caracterizar teórica y preliminarmente la maquinaria de trabajo de operación principal y de transporte.
- Se comparó la distribución teórica con la real.

En este trabajo de tesis se aplicó un modelo geométrico de información evaluada llamado “ecuación de forma” y un método geométrico denominado “circunferencia de distribución” para analizar, caracterizar y evaluar la maquinaria de una línea de producción real de MIDCOM INC. usada para la fabricar transformadores eléctricos.

Los resultados derivados de esta tesis se resumen en los puntos siguientes:

- Los elementos que componen la ecuación de forma (componentes, operaciones y secuencia de operaciones) son usados para generar los elementos primitivos de la distribución de maquinaria (LFM, PO y PES).
- No se usó la variable tiempo para caracterizar la distribución de maquinaria, puesto que la ecuación de forma es atemporal.
- Se caracterizaron teóricamente once máquinas principales, una por cada suboperación de manufactura o, equivalentemente, una por cada circunferencia de distribución simple.
- Se caracterizaron veinte máquinas de transporte generadas por diez intersecciones entre LFM y CD's y entre CD's.

- Se generaron once líneas LFM teóricas.
- Fueron caracterizadas cinco CD's relacionados con cinco superoperaciones y once CD's simples asociadas con las suboperaciones.
- Los resultados de la comparación entre máquinas teóricas y máquinas reales fueron los siguientes:
  - 1) Se eliminaron cuatro máquinas de operación principal teóricas.
  - 2) Fueron eliminadas ocho máquinas de transporte teóricas.
  - 3) Se anexaron seis máquinas de transporte reales.

Es importante señalar que el método de circunferencias de distribución puede utilizarse para:

- A) Diseñar un sistema productivo.
- B) Caracterizar un sistema productivo ya establecido.
- C) Modularizar líneas de producción.

Por otro lado, el hecho de no considerar los tiempos y los métodos de optimización hace que la distribución de planta caracterizada en esta investigación sea "preliminar".

Futuros trabajos por desarrollar relacionados con este trabajo de tesis son:

- Análisis de distribución de maquinaria incluyendo tiempos de proceso.
- Uso de primitivas de manufactura para la selección y distribución de maquinaria.
- Sincronización local y global de la línea MIDCOM INC.
- Simplificar el simbolismo usado, ya que complica la comprensión del modelo.
- Por ser preliminar, se requiere incorporar otros métodos para hacerla real y óptima.

## Referencias

- [1] L. Rojas. *Algunas consideraciones sobre la planeación táctica y operacional*. México. 2000 (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
  
- [2] E. Jiménez, L. Reyes, S. Portillo, J. Gonzáles, L. Tinajero, C. Valdez. *Caracterización y distribución de maquinaria usando ecuaciones de forma y circunferencias de distribución*. SOMIM. Monterrey N.L. México. (presentado en congreso de SOMIM 2002).
  
- [3] E. Jiménez, L. Reyes, I. Murillo, M. Mercado, F. Encinas, I. Gonzáles, S. Portillo. *Representación formal de las transformaciones geométricas y de manufactura de un transformador eléctrico usado en la industria de telecomunicación*. SOMIM. Veracruz, Veracruz México (presentado en congreso de SOMIM 2003)
  
- [4] E. Jiménez. *Simulación de un proceso de manufactura con obstáculo en la línea de producción*. México. 1998. (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
  
- [5] Gory, Y. & Ben L; *Applied operations research a survey*. John Wiley & Sons, 1ªed. USA 1976.
  
- [6] Wayne, L. *Operations research, applications and algorithms*. Duxbury, 3ª ed. USA1 1994.

- [7] Thaha, A. *Investigación de operaciones*, Alfamoega, 5ª ed. México 1994.
- [8] Wern-Kueir, J. Petri net models applied to analyze automatic sequential pressing systems; *Journal of materials processing technology*. Vol 120, pp 115-125, 2002
- [9] Sheng-Uei G. & Sot-Seng L. Modeling with enhanced prioritized Petri Nets: EP Nets. *Computer communications*, vol 25, pp 812-824, 2002.
- [10] Chuzhou, M., Venkatesk K. Fan Y. *Modeling simulation and control of flexible manufacturing systems –A petri net aproach*, World Cientific, Singapure 1999.
- [11] Yi-Feng W. Jer-Yu W. Chuei-Tin Ch., *Automatic hazard análisis of batch operations with Petri nets*, Reliability Engineering & System safety, vol 76, pp 91-104, 2002
- [12] Jiménez, E., Reyes., L. Marín, L., Villar, G Lucero, B. Luna, L. “*Caracterización de operaciones de manufactura usando el álgebra de Boole en el conjunto binario*”. Informe interno de investigación DEPFI - SME - MME-DMEC- MAV- 01- 2002. I UNAM –ITESCA ISBN 968-36-9839-5
- [13] Flores, A. *Control de Robots Manipuladores*. Tesis de grado de Maestría en Ingeniería Mecánica. DEPFI-UNAM. (1998).