



**PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO PARA LA ADAPTACIÓN DE
SISTEMAS DE MANUFACTURA RECONFIGURABLE EN LA
INDUSTRIA DE ELECTRODOMÉSTICOS**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN MANUFACTURA AVANZADA

PRESENTA

MCT. CARLOS RAFAEL WALDO REYES

ASESOR: DR. MARGARITO MARTINEZ CRUZ

SAN LUIS POTOSI, SAN LUIS POTOSI, SEPTIEMBRE 2018

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



12 de septiembre de 2018

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATFQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutoría del alumno **MCT. Carlos Rafael Waldo Reyes**, una vez revisada la Tesis o tesina titulada: "**Planteamiento metodológico para la adaptación de sistemas de manufactura reconfigurable en la industria de electrodomésticos**", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de **Doctor** durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 12 días del mes del año 2018.



Dr. Margarito Martínez Cruz

Grado y nombre completo
Asesor Académico



M. en C. Armando González Alarcón

Grado y nombre completo
Asesor en Planta

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



San Luis Potosí, San Luis Potosí, 12 de septiembre del 2018

DRA. MARÍA GUADALUPE NAVARRO ROJERO
DIRECCIÓN DE POSGRADO DE CIATEQ

Por medio de la presente, me dirijo a Ud. de la manera más atenta, ya que tuve el honor de fungir como revisor del trabajo de tesis titulado **"Planteamiento metodológico para la adaptación de sistemas de manufactura reconfigurable en la industria de electrodomésticos"** del candidato a Doctor(a) **MCT. Carlos Rafael Waldo Reyes.**

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el (la) estudiante antes mencionado(a), el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el (la) estudiante atendió todos los cambios que le fueron sugeridos, autorizo que sea impreso el escrito para iniciar los trámites correspondientes al proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente,

ATENTAMENTE

Dr. Luis Fernando Niño Luna

Nombre y Firma del revisor



San Luis Potosí, San Luis Potosí, 12 de septiembre del 2018

DRA. MARÍA GUADALUPE NAVARRO ROJERO
DIRECCIÓN DE POSGRADO DE CIATEQ

Por medio de la presente, me dirijo a Ud. de la manera más atenta, ya que tuve el honor de fungir como revisor del trabajo de tesis titulado **"Planteamiento metodológico para la adaptación de sistemas de manufactura reconfigurable en la industria de electrodomésticos"** del candidato a Maestro(a)/Doctor(a) MCT. Carlos Rafael Waldo Reyes.

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el (la) estudiante antes mencionado(a), el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el (la) estudiante atendió todos los cambios que le fueron sugeridos, autorizo que sea impreso el escrito para iniciar los trámites correspondientes al proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente,

ATENTAMENTE

Dr. Eligio Espinoza Méndez

Nombre y Firma del revisor

RESUMEN

El presente trabajo expone el planteamiento metodológico para la adaptación de un Sistema de Manufactura Reconfigurable (SMR) en la industria de los electrodomésticos. Mediante el apoyo de la empresa Mabe, se constituye un análisis basado en diversas técnicas. Estas se fundamentan a través de las características que comprenden a un sistema reconfigurable, las cuales se clasifican en modularidad, integrabilidad, convertibilidad, personalización y diagnosticabilidad. Por medio del método de análisis de agrupamiento, derivado de la tecnología de grupo, se identifican las familias de productos para determinar su coeficiente de similitud. Asimismo, para determinar el nivel modularidad se implementa un método sistemático apoyado por el desarrollo de la matriz de estructura de diseño (DSM) y la descomposición de sus valores singulares (SVD). Posteriormente, el parámetro de convertibilidad se emplea para determinar la capacidad de conversión de un sistema en sus niveles de configuración, máquina y manejo de materiales. Finalmente, a través de la teoría de decisión, el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) se propone para ayudar a encontrar una alternativa que se adapte a las necesidades de manufactura involucrando los criterios de costo, tiempo y esfuerzo. A partir de la recopilación de las técnicas presentadas en esta metodología, se concluye que, los sistemas de manufactura reconfigurables son una opción viable para responder rápidamente a las condiciones del mercado dinámico en la industria de los electrodomésticos.

Palabras clave: **Ingeniería y Tecnología, Tecnología Industrial, Especificación de Procesos, Reconfigurable, Electrodomésticos, Modularidad, Convertibilidad.**

ABSTRACT

This work presents the methodological approach for the adaptation of Reconfigurable Manufacturing System (RMS) in the appliance industry. By the agreement of Mabe Company, an analysis based on several techniques is constituted. These are supported by the key characteristics: modularity, integrability, convertibility, customization and diagnoseability. Derived from Group Technology, the cluster analysis allocated groups and part-families through similarity coefficient. Through the Design Structure Matrix (DSM) and the Singular Value Decomposition (SVD) determines the level of modularity in a system based on its internal connectivity structure. Followed by convertibility parameter, which is based on assessments of the configuration itself, and the system components such as machines and material handling devices, are proposed to determine the conversion capacity of a system. Finally, the Analytical Hierarchical Process (AHP) as the decision theory is proposed to find an alternative, which suits best the given needs of manufacturing such as cost, time and effort criteria. It is concluded that having considered the techniques presented in this methodology, reconfigurable manufacturing systems for the appliance industry are a feasible option to adjust production capacity and functionality in response to sudden changes in the market.

Keywords: **Engineering and Technology, Industrial Technology, Process Specification, Reconfigurable, Home Appliances, Modularity, Convertibility.**

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR	I
CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR	II
RESUMEN	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
GLOSARIO	XI
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivo específico	4
1.5 HIPOTESIS.....	4
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 INTRODUCCIÓN.....	5
2.2 SISTEMAS DE MANUFACTURA	5
2.2.1 Costo	7
2.2.2 Tiempo	8
2.2.3 Flexibilidad.....	8
2.2.4 Calidad	9

2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE MANUFACTURA.....	10
2.3.1 Sistemas de manufactura dedicados.....	10
2.3.2 Sistemas de manufactura flexibles	12
2.4 SISTEMAS DE MANUFACTURA RECONFIGURABLES	14
2.4.1 Características y principios de los sistemas de manufactura reconfigurables .	17
2.5 MÁQUINAS RECONFIGURABLES	20
2.5.1 Principios de diseño	22
CAPITULO 3. METODOLOGÍA	24
3.1 INTRODUCCIÓN.....	24
3.2 AGRUPACIÓN DE FAMILIA DE PRODUCTOS	25
3.2.1 Clasificación de métodos para la agrupación de familias	25
3.2.2 Coeficiente de similitud	27
3.3 MODULARIDAD.....	30
3.3.1 Métodos para la definición de módulos	31
3.3.2 Índice de modularidad de valores singulares	32
3.4 CONVERTIBILIDAD	36
3.4.1 Convertibilidad de configuración	36
3.4.2 Convertibilidad de la máquina	39
3.4.3 Convertibilidad del manejo de materiales	40
3.5 PROCESO ANALITICO JERARQUICO	41
3.5.1 Modelo para la determinación de un SMR en electrodomésticos	45
CAPITULO 4. RESULTADOS	48
4.1 INTRODUCCIÓN.....	48
4.1.1 Caso de estudio en la industria de los electrodomésticos	48
4.2 COEFICIENTE DE SIMILITUD	49
4.3 MODULARIDAD.....	55

4.4 CONVERTIBILIDAD	63
4.5 IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FAMILIAS DE PRODUCTOS	66
4.5.1 Proceso Analítico Jerárquico.....	71
4.5.2 Prioridad modificada en costo.....	73
4.5.3 Prioridad modificada en tiempo.....	74
4.5.4 Prioridad modificada en esfuerzo.....	75
4.5.5 Identificación y prioridad de familia de productos en Mabe	76
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	77
REFERENCIAS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Estructura de un sistema de manufactura.	6
Fig. 2.2 Sistema de manufactura: A) seis etapas y B) cinco etapas.	7
Fig. 2.3 Cambios en la demanda en función del tiempo para un SMD.....	12
Fig. 2.4 Estructura en paralelo de un SMF.....	13
Fig. 2.5 Diferentes tipos de sistemas de manufactura en términos de capacidad-funcionalidad.	15
Fig. 2.6 Configuraciones de la máquina 1 (c_1^1 y cm_1^2) y configuración única de la máquina 2 (cm_2^1) usando módulos básicos y auxiliares.	20
Fig. 2.7 Prototipo de una maquina reconfigurable.	23
Fig. 3.1 Clasificación de métodos para la formación de familias.	26
Fig. 3.2 Dendograma para la identificación de familia de productos.....	30
Fig. 3.3 Representación esquemática de la estructura de un producto/sistema en serie.	33

Fig. 3.4 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1	35
Fig. 3.5 Representación esquemática de un sistema con $N = 6$ etapas para diferentes configuraciones.	37
Fig. 3.6 Diagrama de apoyo en la estimación del C'_M y C'_H	40
Fig. 3.7 Modelo del Proceso Analítico Jerárquico.	42
Fig. 3.8 Clasificación de familias de productos en Mabe.	46
Fig. 3.9 Estructura jerárquica para la selección de familia de productos.	47
Fig. 4.1 Dendograma correspondiente a la similitud entre las subfamilias β, γ, δ	51
Fig. 4.2 Dendograma correspondiente a la similitud entre las subfamilias $\alpha, \beta, \gamma, \delta$	54
Fig. 4.3 Distribución esquemática del sistema de manufactura.	55
Fig. 4.4 Matriz de estructura de diseño.	56
Fig. 4.5 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 del sistema de manufactura.	57
Fig. 4.6 Distribución esquemática y DSM de fabricación.	58
Fig. 4.7 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 de fabricación.	59
Fig. 4.8 Distribución esquemática y DSM de puertas.	60
Fig. 4.9 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 de puertas.	60
Fig. 4.10 Distribución esquemática y DSM de ensamble.	61
Fig. 4.11 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 de ensamble.	62
Fig. 4.12 Distribución esquemática de la línea de producción de refrigeradores.	63
Fig. 4.13 Producción anual y costo promedio en Mabe.	66
Fig. 4.14 Clasificación de volumen de producción y gama.	67
Fig. 4.15 Clasificación de volumen de producción y gama en refrigeración.	68

Fig. 4.16 Clasificación de volumen de producción y gama en cocinado.....	69
Fig. 4.17 Clasificación de volumen de producción y gama en cuidado de la ropa.....	70
Fig. 4.18 Sensibilidad general con respecto al costo, tiempo y esfuerzo.....	71
Fig. 4.19 Gradiente de sensibilidad en función al costo.....	72
Fig. 4.20 Gradiente de sensibilidad en función al tiempo.....	72
Fig. 4.21 Gradiente de sensibilidad en función al esfuerzo.....	73
Fig. 4.22 Solución alternativa con 50% de prioridad en costo.....	73
Fig. 4.23 Solución alternativa con 70% de prioridad en costo.....	74
Fig. 4.24 Solución alternativa con 50% de prioridad en tiempo.....	74
Fig. 4.25 Solución alternativa con 70% de prioridad en tiempo.....	75
Fig. 4.26 Solución alternativa con 50% de prioridad en esfuerzo.....	75
Fig. 4.27 Solución alternativa con 70% de prioridad en esfuerzo.....	76
Fig. 4.28 Familias preferentes para cada línea de producto en Mabe.....	76

GLOSARIO

- AEP: Agrupamiento de Enlace Promedio.
- Capacidad de producción: Máximo nivel de actividad que puede alcanzarse con una estructura productiva dada en circunstancias normales de funcionamiento durante un periodo de tiempo determinando.
- Capacidad de respuesta: Suma de la prontitud y disposición que ponen los prestadores de servicio en satisfacer una demanda.
- Cinemático: Relacionado a la cinemática, la cual se ocupa del estudio de las leyes de movimiento de los cuerpos en sus condiciones de espacio y tiempo, sin tener en cuenta las causas que lo producen.
- CNC: "Control Numérico Computarizado", es un sistema que permite controlar en todo momento la posición de un elemento físico, normalmente una herramienta que está montada en una máquina.
- Coeficiente: Expresión numérica de un factor constante de un objeto específico.
- Deformación térmica: Aumento de volumen, longitud o alguna otra dimensión métrica que sufre un cuerpo físico debido al aumento de temperatura.
- Dendograma: Diagrama de datos en forma de árbol que organiza los datos en subcategorías.
- DSM: Por sus siglas en inglés, refiere a la Matriz de estructura de diseño.
- Familia de productos: Conjunto de productos similares que cubren necesidades semejantes o procesos de fabricación comunes.
- Fiabilidad: Probabilidad de una máquina, dispositivo o elemento funcionen correctamente bajo ciertas condiciones.
- Funcionalidad: Conjunto de características que hacen que algo tenga una utilidad práctica.
- Grados de libertad: Número mínimo de velocidades generalizadas independientes necesarias para definir el estado cinemático de un mecanismo o sistema mecánico.
- Grafo: Representación gráfica de diversos puntos (nodos o vértices) que se encuentran unidos a través de líneas (aristas).
- Hardware: Conjunto de componentes que conforman la parte material (física) de un sistema.

- Layout: Esquema de distribución de elementos físicos dentro de un diseño.
- Línea de producción: Conjunto de estaciones de trabajo ordenadas para que un producto pase de una estación a la siguiente y en cada ubicación se realice una parte del trabajo total.
- Manufactura: Aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material para fabricar piezas o productos.
- MATLAB: Abreviatura de MATrix LABoratory "Laboratorio de Matrices" es un sistema de programación y cálculo basado en la manipulación de matrices.
- Matriz de incidencia: Matriz que representa las relaciones binarias entre dos elementos.
- Matriz: Conjunto ordenado de una estructura de filas y columnas.
- Mecanizado: Proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión.
- Módulo: Elemento con función propia concebido para poder ser agrupado de distintas maneras con otros elementos constituyendo una unidad mayor.
- MR: Máquinas Reconfigurables.
- Normalizar (matemática): División de un objeto entre la norma de este, para alguna norma conveniente.
- PAJ: Proceso Analítico Jerárquico.
- Paradigma: Modelo o patrón sostenido en una disciplina científica o epistemológica o, a diversa escala, en otros contextos de una sociedad.
- Ramp up: Periodo inicial de arranque de producción.
- Rendimiento: Proporción que surge entre los medios empleados para obtener algo y el resultado que se consigue.
- Rigidez: Medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, que contempla la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones.
- Scrap: Refiere a todos los desechos y/o residuos derivados del proceso industrial.
- Setup: Tiempo de preparación o ajuste de una maquina o línea de producción antes de empezar una corrida de esta.
- SKU: "Stock-Keeping Unit", refiere al número de referencia o clave de un producto o servicio que es única y se diferencia por medio de atributos de otros artículos.

- SMC: Sistemas de Manufactura Celulares.
- SMD: Sistemas de Manufactura Dedicados.
- SMF: Sistemas de Manufactura Flexible.
- SMI: Por sus siglas en inglés, refiere al Índice de Modularidad de Valores Singulares.
- SMR: Sistemas de Manufactura Reconfigurables.
- Software: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas que permiten ejecutar distintas tareas en una computadora.
- SVD: Por sus siglas en inglés, refiere a la Descomposición de valores singulares.
- Termoformado: Proceso que consiste en dar forma a una lámina plástica por medio de calor utilizando un molde o matriz.
- Tiempo ciclo: Métrica que establece el tiempo que se requiere para completar un proceso ya sea manual o de una máquina.
- UDN: Unidad de negocio

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La industria de los electrodomésticos se ha caracterizado por ser una parte importante en la fabricación y distribución de productos básicos para el hogar, los cuales se vuelven cada vez más indispensables para facilitar la vida cotidiana de las personas. Esto ha generado un incremento acelerado del mercado y, por lo tanto, una significativa competitividad entre las empresas del ramo, así como la atracción de trasnacionales. Derivado de esto, la tecnología, los costos de producción, la diversidad de productos y el tiempo de lanzamiento hacia el mercado se vuelven un factor crítico. En el presente trabajo, el análisis e información recabada están proporcionados por la empresa Mabe, la cual de manera muy amable aceptó en contribuir en este estudio.

Fundada en 1946, Mabe es una empresa mexicana que data sus orígenes con la fabricación de muebles y gabinetes de cocina hasta llegar a la década de los 50s, cuando se comienza a manufacturar productos de línea blanca como refrigeradores y estufas de gas. A través de su historia, ha concretado diversas alianzas estratégicas, como es el caso de General Electric, que facilitó el acceso hacia nuevos mercados. Actualmente Mabe se ha posicionado como líder de línea blanca en América y con presencia en más de 70 países. Su gama de productos se clasifica principalmente en cocción –estufas, hornos, parrillas, campanas, microondas–, refrigeración –refrigeradores, congeladores, frigobares– y cuidado de la ropa –lavadoras, secadoras, centros de lavado–.

A través de un portafolio de más de 16 marcas y 13 millones de unidades vendidas al año, sin duda Mabe es una empresa que ha ido en constante crecimiento con un enfoque global y gran aceptación. Como muchas otras empresas, también tiene necesidad y aspiración hacia equipos de alta productividad y tecnologías de última generación que lo mantengan en los niveles de competitividad requeridos. Sin embargo, esta tecnología requiere altas inversiones con largos tiempos de entrega además de una alta sofisticación, lo que en ocasiones no es fácil ajustarse a las necesidades del mercado, provocando que el proceso de lanzamiento de nuevos productos sea extenso.

Bajo estas circunstancias y necesidades de responder rápidamente y con flexibilidad ante la manufactura de electrodomésticos, se genera una motivación en el análisis de nuevas estrategias para permanecer en el liderazgo de este mercado.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como se expresó en el apartado anterior, el principal reto que enfrenta la industria de los electrodomésticos y en particular Mabe, es tener una mayor rapidez de adaptación hacia los nuevos requerimientos del cliente -capacidad de respuesta-, precios cada vez más rentables, así como también la disminución en la dependencia de fabricantes de maquinaria, que principalmente están fuera de México, con largos tiempos de entrega y costos elevados. Por lo tanto, la predicción del éxito de cualquier producto se vuelve más complicado bajo estas condiciones aunado en que ciertas situaciones la inversión suele ser un impedimento hacia el rápido crecimiento.

Asimismo, se ha observado que cada vez que se produce algún tipo de cambio en el producto, ritmo de producción o en ventas, la manufactura sufre un incremento en su complejidad, provocando que se incurra en situaciones de sobre inventario, largos tiempos de cambio -materiales, herramental- y modificaciones en equipos y/o máquinas que restan flexibilidad debido a un mayor esfuerzo y consumo de recursos. Estos destacan principalmente en la adaptación a los procesos de manufactura, adquisición de nuevos herramientas y/o maquinaria, incremento de mano de obra para compensar la complejidad del proceso, modificación del sistema de producción, entre otros.

De manera que, para incrementar la capacidad de respuesta no solo para el ramo de los electrodomésticos sino para cualquier otro tipo de industria manufacturera, un cambio de paradigma en el modo de producción se convierte en un factor primordial para comprender un entorno de manufactura dinámico. Si bien, los sistemas de manufactura tradicionales han sido por excelencia la mejor opción para muchas empresas, estos presentan limitaciones. Por lo tanto, los sistemas de manufactura reconfigurables (SMR) han surgido como un medio prometedor que permite a los fabricantes tener una mayor capacidad de respuesta a las condiciones del mercado.

Como se explicará más adelante, estos sistemas son apropiados para las industrias de medio y alto volumen, especialmente cuando se espera cambios frecuentes del producto y cuando subsisten familias de productos ya existentes.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El concepto de un sistema de manufactura reconfigurable ha surgido en los últimos años en un intento de lograr una funcionalidad variable y capacidad escalable. Este concepto propone un sistema en donde se puedan añadir, remover, modificar o intercambiar tanto maquinas como sus componentes, celdas o unidades de manejo de materiales según sea necesario para responder rápidamente a las necesidades cambiantes. Estas pueden incluir cambios en los gustos del cliente por producto, nuevas demandas de productos, cambio en la mezcla de producción y/o configuración de productos y la integración de nuevas tecnologías en el proceso.

A pesar que los sistemas reconfigurables sean objeto de importantes esfuerzos de investigación, tales como la línea física –modificación del layout, cambio y/o modificación de máquinas y dispositivos de manejo de materiales– y lógica –reconfiguración de rutas, horarios, planeación, programación y tiempos–, hasta el momento no existe una empresa que cuente con un nivel elevado de reconfiguración. No obstante, diferentes aportaciones sobre el tema indican que estos sistemas tienen el potencial de ofrecer una solución económica en un largo plazo en comparación con otros tipos de sistemas, a medida que se incrementa la vida y utilidad de un sistema de manufactura.

Esta motivación impulsa el considerar una metodología que reúna los aspectos fundamentales apoyado por diversas técnicas para poder adecuar un sistema de manufactura reconfigurable. Asimismo, implicará que las industrias manufactureras, como es el caso de los electrodomésticos, mantengan un alto nivel de rendimiento para satisfacer múltiples requerimientos funcionales o cambios en las condiciones de operación. Si bien, un sistema reconfigurable puede brindar menor complejidad si se diseña desde un principio, la necesidad de una metodología que proporcione el soporte para el despliegue de un sistema reconfigurable se hace indispensable para mantener una competitividad ante un mercado dinámico.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Establecer una metodología que proporcione los aspectos primordiales para adecuar un sistema de manufactura reconfigurable en la industria de los electrodomésticos y que sea apropiado con los cambios en el producto y del proceso.

1.4.2 Objetivo específico

Efectuar un análisis práctico con apoyo de una empresa mexicana especializada en la manufactura de electrodomésticos para identificar los criterios relevantes del sistema actual y adecuarlos a los requerimientos de un sistema reconfigurable.

1.5 HIPOTESIS

Con un sistema de manufactura reconfigurable en la industria de los electrodomésticos es capaz de ajustarse a los cambios del producto y del proceso.

El planteamiento de una metodología para la adaptación de un sistema de manufactura reconfigurable ayudará tanto a identificar los elementos claves que corresponde un sistema reconfigurable, así como a facilitar su transición.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentará como primera parte el concepto y descripción de los sistemas de manufactura. Posteriormente se indicará detalladamente las principales características de los sistemas de manufactura tradicionales, los cuales en la mayoría de las industrias manufactureras han optado por los sistemas de manufactura dedicados y flexibles para producir sus productos. Asimismo, se abordará un nuevo concepto conocido como los sistemas de manufactura reconfigurables, los cuales constituyen un paradigma intermedio combinando el alto rendimiento de un sistema dedicado con la flexibilidad de un sistema flexible. Finalmente, como un componente importante que identifica a un sistema de manufactura reconfigurable, se expondrá el concepto de las máquinas reconfigurables, así como sus principios de diseño. Éstas proporcionarán el pilar que mantiene la filosofía de un sistema reconfigurable mediante sus características distintivas, una funcionalidad personalizada y capacidad a través de una estructura cambiante.

2.2 SISTEMAS DE MANUFACTURA

Desde que la manufactura se convirtió en un fenómeno industrial, la fabricación de productos ha requerido de esfuerzos combinados y coordinados de distintos elementos. Sin embargo, debido a que el campo de la manufactura integra muchas disciplinas de ingeniería, es útil dividirla de tal manera se facilite la identificación de problemas y permita un enfoque científico a los problemas encontrados [1]. La manufactura se puede subdividir en: procesos de manufactura, los cuales alteran la forma y/o las propiedades físicas de un material; equipos de manufactura, que se utilizan para llevar a cabo los procesos de manufactura; y los sistemas de manufactura, los cuales se definen como la disposición y funcionamiento de diversos elementos de manufactura –máquinas, herramientas, materiales, personas e información– para producir un producto o servicio con valor agregado [2]. Estos elementos deben estar dispuestos de manera coordinada que permita el buen funcionamiento de todo el sistema (figura 2.1), con el fin de hacer que las metas y objetivos de una empresa se cumplan [3].

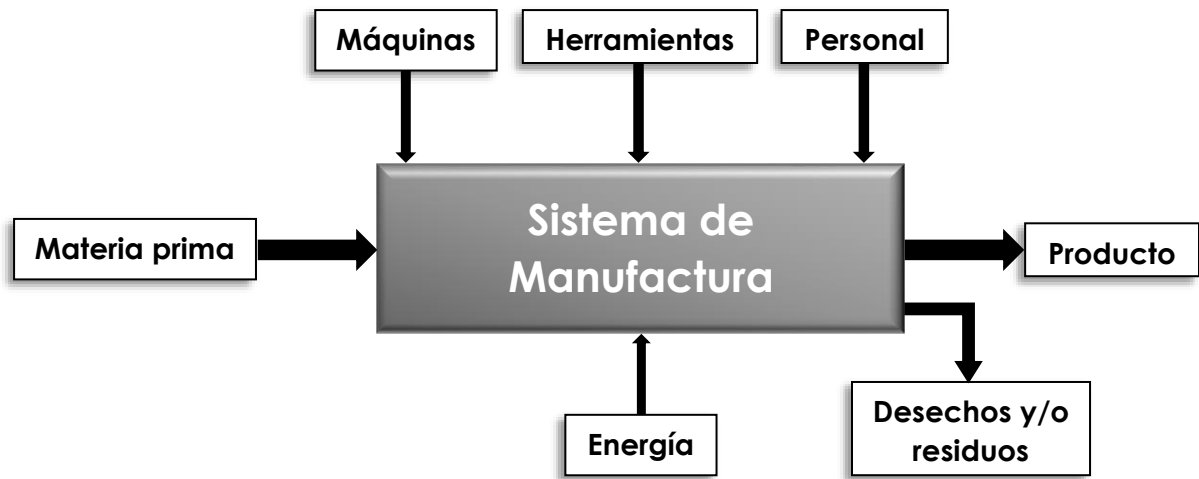


Fig. 2.1 Estructura de un sistema de manufactura.

La evolución de los sistemas de manufactura se muestra a lo largo de los años en respuesta a diversos factores incluyendo la introducción de nuevas tecnologías, materiales de fabricación, nuevos productos, énfasis en la calidad, así como la creciente competencia global y la necesidad de la capacidad de respuesta, agilidad y adaptabilidad [4]. Por lo general, los sistemas de manufactura de producción media y alta se componen de múltiples etapas en donde cada etapa le corresponde una máquina o estación de ensamble para llevar a cabo un conjunto de operaciones. Muchos sistemas de manufactura están dispuestos secuencialmente –líneas en serie– como se muestra en la figura 2.2 A. Este tipo de líneas de producción son muy comunes en muchas industrias. Sin embargo, cuando se necesitan grandes cantidades de producción o cuando un conjunto de operaciones toma demasiado tiempo en completarse, varias máquinas o estaciones de ensamble pueden ser instalados en una etapa para llevar a cabo operaciones idénticas (figura 2.2 B).

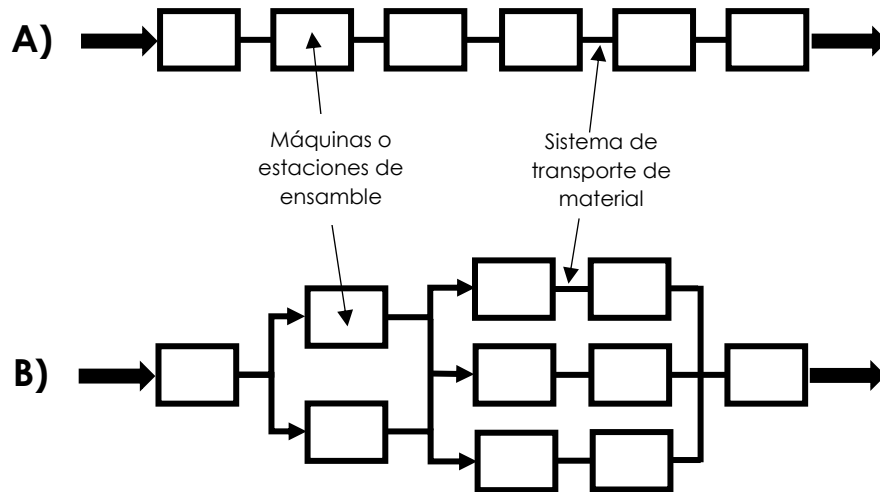


Fig. 2.2 Sistema de manufactura: A) seis etapas y B) cinco etapas.

Normalmente, el diseño de un sistema de manufactura puede ser conceptualizado como la asignación de los requisitos de rendimiento de un sistema de manufactura, expresado en valores de ciertas medidas de rendimiento, los cuales describen el diseño físico o la forma de operación de un sistema de manufactura. Una medida de rendimiento es una variable cuyo valor cuantifica un aspecto del sistema de manufactura [5]. Estas corresponden si bien en medidas de previsión (cuanto más alto mejor) o en medidas de costo (cuanto más bajo mejor) y se pueden dividir en cuatro categorías: *costo*, *tiempo*, *flexibilidad* y *calidad*. Dependiendo de las medidas de rendimiento, así como los requisitos del producto será el sistema de manufactura utilizado.

2.2.1 Costo

Los costos relacionados con la manufactura abarcan una serie de factores que pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- Costos de equipos e instalaciones. Estos incluyen los costos de los equipos necesarios para el funcionamiento de los procesos de fabricación, las instalaciones utilizadas para alojar el equipo, la infraestructura de la empresa, etc.

- Materiales. Estos incluyen el costo de las materias primas para la fabricación del producto, de las herramientas y materiales auxiliares para el sistema, incluyendo materiales consumibles.
- Mano de obra. La mano de obra directa necesaria para el funcionamiento de los equipos e instalaciones.
- Energía. La energía necesaria para el desempeño de los diferentes procesos.
- Mantenimiento y capacitación. Esto incluye la mano de obra, repuestos, etc. que son necesarios para mantener los equipos, instalaciones y sistemas, así como la capacitación necesaria para adaptar nuevos equipos y tecnología.
- Gastos generales. Estos son parte del costo que no son directamente atribuibles a las operaciones del sistema de manufactura, sino que apoya su infraestructura.

Esta clasificación proporciona un marco general de como el asunto del costo puede abordarse en el entorno de fabricación mediante el establecimiento de una forma sistemática para medir el desempeño de costos para diferentes soluciones.

2.2.2 Tiempo

En los sistemas de manufactura, los atributos del tiempo refieren a i) la rapidez de un sistema de manufactura para poder responder a los cambios de diseño, demanda de volumen, etc. y ii) la rapidez con que un producto puede ser producido por el sistema –generalmente expresada como índice de producción del sistema–. El índice de producción afecta directa o indirectamente todos los demás atributos. Entre mayor sea el índice de producción, este proporcionará reducción en el costo. Además, para lograr altos índices de producción a menudo es necesario recurrir a la automatización el cual puede tener un impacto en la flexibilidad del sistema.

2.2.3 Flexibilidad

Durante muchas décadas los índices de costo y producción fueron los criterios de rendimiento más importantes en la industria manufacturera y los fabricantes se han basado en los sistemas dedicados de producción en serie con el fin de lograr una economía a escala. Sin embargo, a medida que los niveles de vida mejoran, es cada

vez más evidente que la época de producción en masa está siendo reemplazada por la era de nuevos mercados. La clave para la creación de productos que pueden satisfacer las demandas de una base de clientes diversos, es un ciclo corto de desarrollo produciendo a bajo costo, productos de alta calidad en cantidad suficiente para satisfacer la demanda. Esto hace que la flexibilidad sea un atributo cada vez más importante para la manufactura.

Una clasificación detallada de los diferentes aspectos o tipos de flexibilidad [6] incluyen:

- Flexibilidad de la máquina. La facilidad de hacer los cambios necesarios para producir un determinado conjunto de tipos de piezas.
- Flexibilidad del proceso. La capacidad de producir un determinado conjunto de tipos de piezas, posiblemente utilizando diferentes materiales de diferentes maneras.
- Flexibilidad del producto. Capacidad de cambiar para producir nuevos productos de forma económica y rápida.
- Flexibilidad de enrutamiento. La capacidad de manejar averías y seguir produciendo un conjunto dado de tipos de piezas.
- Flexibilidad de volumen. Capacidad de operar de manera rentable a diferentes volúmenes de producción.
- Flexibilidad de expansión. La posibilidad de ampliar el sistema con facilidad y de forma modular.
- Flexibilidad de operación. Capacidad de intercambiar el orden de varias operaciones para cada tipo de pieza.
- Flexibilidad de producción. La diversidad de tipos de piezas que el sistema de manufactura puede producir.

2.2.4 Calidad

La calidad de un producto, en términos generales relacionados con la satisfacción del cliente, es a menudo difícil de definir en términos cuantitativos, puesto que la satisfacción del cliente no solo depende de las características reales de un producto, sino también de su viabilidad, facilidad de mantenimiento y una serie de otros factores que son a menudo subjetivos y por lo tanto difícil de cuantificar. Sin embargo, la satisfacción del

cliente puede atribuirse a dos factores importantes en el origen de un producto: su diseño y fabricación. En términos de manufactura, la calidad se refiere a que tan bien el proceso de producción cumple con las especificaciones de diseño en relación con las diferentes características y propiedades de un producto.

2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE MANUFACTURA

Actualmente la mayoría de las industrias manufactureras han hecho uso de dos tipos de sistemas de manufactura para producir sus productos: los sistemas de manufactura dedicados (SMD) y los sistemas de manufactura flexibles (SMF), los cuales en muchas ocasiones se han combinado para aumentar el rendimiento. Este último enfoque ha evolucionado puesto que ninguno de estos sistemas de manufactura, por sí solo, es suficiente para satisfacer los desafíos de una economía en constante expansión con demandas altamente cambiantes y una diversidad de gustos por parte de los consumidores, manteniendo asimismo precios bajos. A continuación, se explicará las principales propiedades de estos sistemas.

2.3.1 Sistemas de manufactura dedicados

Desde la Revolución Industrial, los sistemas de manufactura dedicados (SMD) se han visto favorecidos por la producción en masa en donde la mayoría de las empresas manufactureras a nivel mundial hacen uso de ella, esto permite mantener un precio bajo por unidad de producto. Sin embargo, debido a su naturaleza cualquier ligero cambio en el diseño del producto puede resultar una complicación en la producción del nuevo producto, si no imposible. La razón está en que estos sistemas están diseñados rígidamente para mejorar la producción en masa con fines lucrativos y rentables. Por lo tanto, los SMD solo pueden ser eficaces en un mercado estable [4]. Las principales características de acuerdo con A. Matta et al. [7] son:

- *Equipos rígidos*: El equipo está diseñado para satisfacer las necesidades del producto o de una familia de productos restringida a la que se dedica todo el sistema. Por lo tanto, las máquinas y dispositivos están diseñados para llevar a cabo un conjunto muy limitado de operaciones que no pueden ser normalmente

expandidos a no ser que se incurran a grandes costos. Uno de los ejemplos más típicos que le corresponde esta peculiar característica son las estaciones de línea de producción.

- *Alta producción:* El equipo está dedicado y normalmente diseñado para minimizar los tiempos de producción. Con el fin de reducir los tiempos de proceso, una o más de las operaciones se pueden realizar en paralelo. Como consecuencia las máquinas son generalmente rápidas permitiendo que el sistema alcance una alta tasa de producción.
- *Limitadas habilidades:* Las habilidades necesarias para operar el sistema son normalmente bajas puesto que los trabajos del personal se reducen a la carga y descarga de piezas, así como el mantenimiento del equipo.
- *Fácil manejo:* Dado el número limitado de productos en el proceso de un SMD y la simplicidad del flujo del sistema, la programación de los recursos es muy fácil.
- *Baja inversión:* El equipo es rígido y todo está diseñado para llevar a cabo únicamente las operaciones que son necesarias para la fabricación de los productos. Por lo tanto, el costo de inversión del sistema no es alto si se compara con otros sistemas más flexibles con máquinas de control numérico (CNC).

Es bien sabido que los SMD han sido elemento básico para la fabricación de altos volúmenes por varias generaciones y fiables al paradigma de producción en masa, pues el costo por pieza es relativamente bajo. Una vez totalmente establecidos, los SMD fabrican a un ritmo constante piezas idénticas de alta calidad en grandes volúmenes. Sin embargo, con la creciente competencia global, la demanda de partes específicas puede variar ampliamente. A menudo se suscitan situaciones en donde estos sistemas no funcionan a plena capacidad haciendo que el costo por pieza sea mucho mayor. Por otra parte, los SMD pueden fallar cuando la demanda supera la capacidad de diseño (figura 2.3). Si la popularidad del producto supera todas las expectativas del mercado o cuando nuevos usos se encuentran en los productos existentes, el sistema es incapaz de responder, lo que resulta pérdidas en ventas. Si la demanda del mercado para un producto aumenta rápidamente, la capacidad máxima del sistema no permite al fabricante tomar la oportunidad de producir y vender más productos. Esto se traduce en pérdidas sustanciales en ventas.

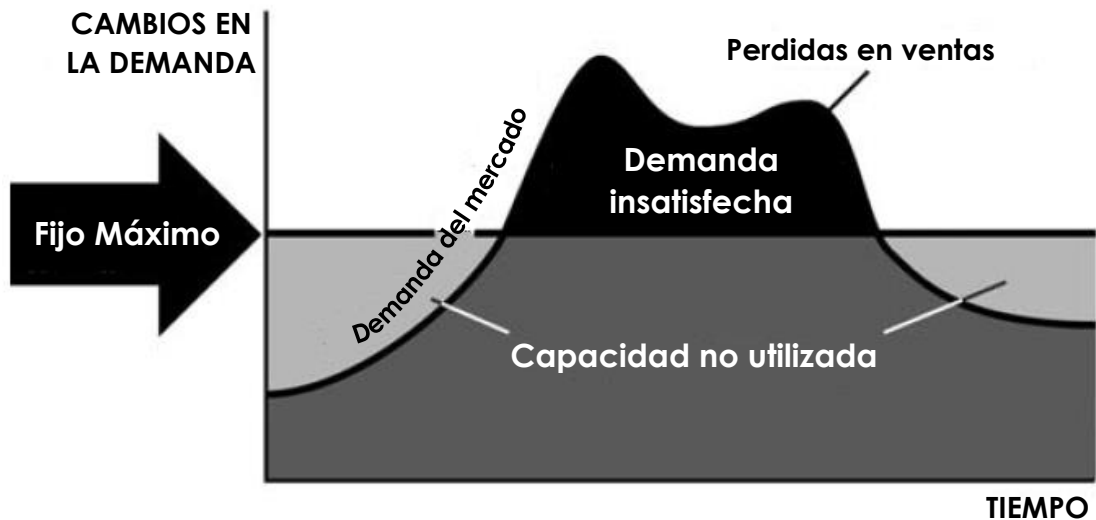


Fig. 2.3 Cambios en la demanda en función del tiempo para un SMD.

2.3.2 Sistemas de manufactura flexibles

A diferencia de los SMD, en donde la producción está restringida a un solo producto o una familia de productos, los sistemas de manufactura flexible (SMF) constan principalmente de máquinas de control numérico (CNC) capaces de producir una variedad de productos. La combinación de un elevado costo de equipo, así como una capacidad de producción reducida, implica que el costo por pieza sea relativamente alto. Sus principales características [7] se muestran a continuación:

- *Equipos flexibles:* El equipo es lo suficientemente flexible para satisfacer las necesidades de todos los productos que pertenecen a la familia. Prácticamente todas las máquinas son del tipo CNC y se pueden programar para llevar a cabo un gran número de operaciones. En la práctica, solo se necesita la capacidad de generar un programa informático fácil de codificar el ciclo de proceso de un producto en instrucciones que el control numérico de la máquina pueda leer, entender y ejecutar.
- *Baja producción:* Las máquinas tienen generalmente un husillo para ejecutar las operaciones de una manera secuencial. Como consecuencia las máquinas son más lentas en comparación con las máquinas de un SMD.

- *Extensas habilidades:* Las habilidades necesarias para ejecutar el sistema requieren cierto conocimiento de programación y manejo de las máquinas CNC.
- *Manejo complejo:* El manejo de los SMF se complica por el gran número de productos. Para cada producto es necesario programar adecuadamente las máquinas y herramientas.
- *Alta inversión:* Las máquinas son flexibles y requieren grandes inversiones. Por lo tanto, el costo de inversión correspondiente al sistema es muy grande comparado con los SMD.

El alto costo que genera un SMF es una de las principales razones por el cual se sitúa con un nivel bajo de aceptación, pues a diferencia de las estaciones de un SMD, las máquinas CNC no están diseñadas para la fabricación de una parte en específico. De hecho, las máquinas CNC se construyen antes de que el fabricante las seleccione y antes de que la planificación del proceso se lleve a cabo para adaptar dichas máquinas. Dado que la aplicación específica no es conocida por el fabricante de la máquina, los sistemas y máquinas flexibles se construyen con toda la funcionalidad posible, provocando así un exceso en el capital. También es una suposición común que los SMF deban ser capaces de producir 1) cualquier parte, 2) en cualquier combinación, y 3) en cualquier secuencia. Este enfoque aumenta aún más el costo, debido a que el sistema requiere de una estructura en paralelo (figura 2.4) con una alta potencia y una gran variedad de máquinas CNC con accesorios altamente flexibles, sin duda una solución altamente costosa.

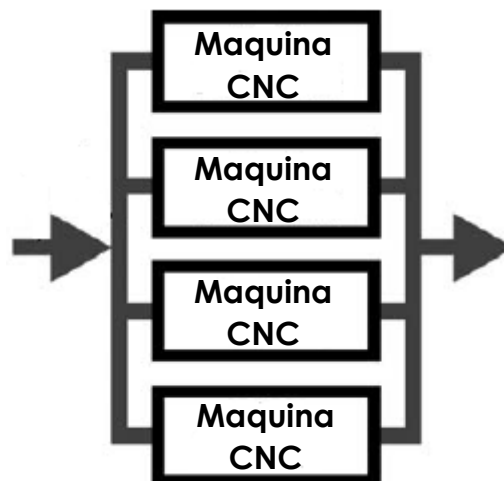


Fig. 2.4 Estructura en paralelo de un SMF.

La competencia global y los cambios del mercado impredecibles son los desafíos que enfrentan las empresas en la actualidad. La capacidad de respuesta, agilidad y alto rendimiento de los sistemas de manufactura están impulsando los recientes cambios de paradigmas y exigen nuevos enfoques para lograr la capacidad de respuesta a todos los niveles de la empresa [8]. Estos enfoques no solo deben combinar el alto rendimiento de un SMD con la flexibilidad de un SMF, sino también deben ser capaces de responder de manera rentable a los cambios mediante la adaptación del sistema de manufactura y sus elementos de forma rápida y eficiente [9]. Sin duda, los sistemas de manufactura reconfigurable constituyen un nuevo paradigma que puede satisfacer estos requisitos y evitar las deficiencias de los sistemas de manufactura tradicionales antes mencionados cuya capacidad y funcionalidad pueden cambiar exactamente cuando sea requerido.

2.4 SISTEMAS DE MANUFACTURA RECONFIGURABLES

Desarrollado en 1999 por Y. Koren *et al.* [10], los sistemas de manufactura reconfigurables (SMR) se definen como un sistema de manufactura diseñado desde un principio para soportar los cambios en su estructura y así ajustar su capacidad productiva y funcionalidad de forma rápida dentro de una familia de piezas o productos, como respuesta a los repentinos cambios del mercado. Estos sistemas no corren el riesgo de quedar obsoletos porque permiten un cambio rápido de los componentes del sistema. Asimismo, este tipo de sistema proporciona una flexibilidad personalizada para una familia de productos en particular, de manera que no tienen límites [11] porque pueden: (i) mejorar continuamente mediante la integración de nuevas tecnologías, y (ii) pueden reconfigurarse rápidamente para dar lugar a futuros productos y cambios en la demanda del producto en lugar de ser reemplazados y desechados. Si se toma en cuenta la totalidad del costo del ciclo de vida de un sistema de manufactura, los SMR no serán más caros que los sistemas tradicionales. El principal factor que los hace menos costosos es que a diferencia de los otros tipos de sistemas, los SMR se instalan con exactamente la capacidad de producción y la funcionalidad necesaria además de poder ser actualizados en el futuro exactamente cuando sea necesario [12].

Como se puede apreciar en la figura 2.5, los SMD tienen una alta capacidad, pero una funcionalidad limitada lo que los hace rentables, siempre y cuando la demanda supere la oferta. Sin embargo, puede haber situaciones en que los SMD no operen a plena

capacidad. Por otro lado, los SMF están contruidos con toda la flexibilidad y funcionalidad disponible, que en la mayoría de los casos no son necesarios al momento de la instalación. La lógica detrás de esto radica en "comprar en caso de que algún día se necesite", provocando que una parte importante de la inversión se desperdicie debido a la inactividad del mismo. Estos dos tipos de residuos se eliminan con la tecnología de los SMR, en donde se permite añadir la capacidad y funcionalidad extra exactamente cuando sea necesario. Incluso cuando se reduce la demanda de productos, la capacidad de los SMR puede reducirse, permitiendo que los componentes modulares adicionales sean reutilizados en otras líneas donde la demanda de productos se ha incrementado.

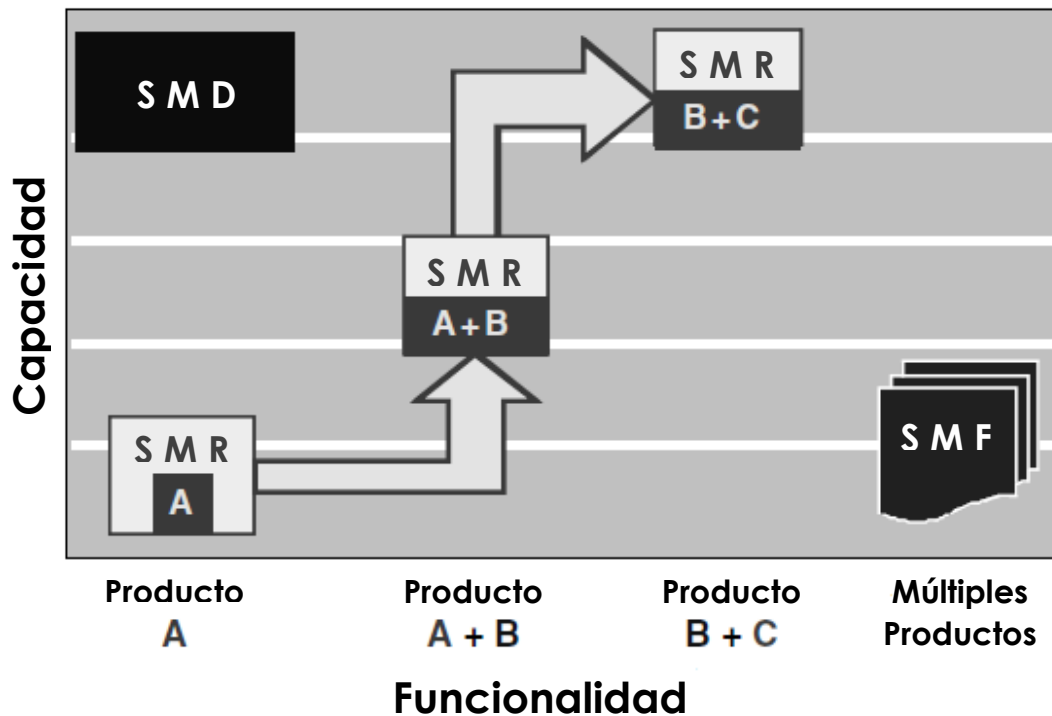


Fig. 2.5 Diferentes tipos de sistemas de manufactura en términos de capacidad- funcionalidad.

El denominador común para los SMD y SMF es el uso de hardware y software fijo. Por ejemplo, solo los programas correspondientes a las piezas de una maquina CNC se pueden cambiar, pero no la arquitectura del software o los algoritmos de control. En los

Últimos años, sin embargo, dos tecnologías que son necesarias para la reconfiguración han surgido: a nivel de software, una arquitectura modular y abierta que tiene como objetivo permitir la reconfiguración del controlador [13]; y a nivel del hardware, máquinas y herramientas modulares que tienen como objetivo ofrecer al cliente una diversidad de opciones en la máquina [14]. Estas tecnologías emergentes muestran una tendencia hacia el diseño de sistemas con hardware y software reconfigurable, tal como se aprecia en la tabla 2.1.

	Hardware de Maquina Fija	Hardware Reconfigurable
Sin Software	Maquinas manuales, Sistemas de Manufactura Dedicados (SMD)	—
Software de Control Fijo	Maquinas CNC, robots, Sistemas de Manufactura Flexibles (SMF)	Maquinas modulares CNC
Software Reconfigurable	Modular Controlador de arquitectura abierta	SMR

Tabla 2.1 Hardware y software reconfigurable.

El hardware y software reconfigurable son condiciones necesarias, pero no suficientes para un verdadero SMR. La esencia del paradigma del SMR es una aproximación a la reconfiguración basado en el diseño del sistema combinado con el diseño simultáneo de una arquitectura abierta con máquinas reconfigurables que puedan diseñarse mediante la síntesis de movimiento en los módulos [15]. El diseño de un SMR no solo combina hardware con software reconfigurable, sino también la perspectiva del sistema y un modelo económico. El objetivo final del SMR es el de utilizar un enfoque del sistema en el diseño del proceso de manufactura que permita la reconfiguración simultanea de 1) todo el sistema, 2) el hardware de la máquina, y 3) el software de control.

Con tal diseño, la capacidad y funcionalidad del sistema no son fijos, sino que cambian con el tiempo en respuesta a la demanda del mercado. El paradigma SMR también influye en toda nueva generación de máquinas reconfigurables que permiten la reconfiguración para lograr una escalabilidad y/o funcionalidad de manera rentable. Similar a los sistemas flexibles, los SMR están equipados con sistemas de manipulación de partes completamente automáticos. La estructura del sistema de manipulación de partes –piezas de trabajo– influye significativamente en la productividad y fiabilidad de los SMR. Cuando se añade el plan de producción de un nuevo producto, la funcionalidad del sistema se ajusta para llevarlo a cabo. Este atributo se puede resumir como *“exactamente la funcionalidad y capacidad necesarios, exactamente cuando sea necesario”*.

2.4.1 Características y principios de los sistemas de manufactura reconfigurables

Para permitir un alto grado de respuesta del sistema a las necesidades del mercado, los sistemas reconfigurables deben ser diseñados desde el principio con el uso de módulos de hardware y software que se puedan integrar de forma rápida y fiable. De lo contrario, el proceso de reconfiguración será largo y poco práctico. El logro de este objetivo requiere el diseño de un SMR que incluya varias características clave [10,12,16]: modularidad, integrabilidad, personalización, convertibilidad y diagnosticabilidad. Estas características pueden aplicarse al diseño de sistemas de producción, así como las máquinas y software de control. De igual manera pueden aplicarse a los recursos del personal operario, y en última instancia a la empresa en su conjunto.

1. *Modularidad*: Todos los componentes del sistema, tanto de software como de hardware, deben ser modulares. Cuando sea necesario, los componentes modulares pueden ser cambiados o actualizados a un conjunto de nuevas aplicaciones. Dentro de los beneficios se identifica una reducción en el costo del ciclo de vida debido a que los módulos son más fáciles de mantener [17]. Además, incluyen una mayor posibilidad del cambio del producto, aumento en la variedad de productos, reducción de tiempos de espera, así como la facilidad de diagnóstico en el producto y mantenimiento [18].
2. *Integrabilidad*: Los módulos deben tener la capacidad de integrarse de forma rápida y precisa por un conjunto de interfaces las cuales deben ser analizadas y

desarrolladas en tres niveles diferentes: sistema, modulo y componentes [16]. La interfaz del sistema comprende las conexiones entre diferentes sistemas mecánicos. La interfaz del módulo incluye interfaces entre los diferentes módulos y sub-módulos que define como estos interactúan entre sí. La interfaz del componente tiene que ver con el nivel más bajo de conectividad en el que cada componente está vinculado al otro y como el cambio o eliminación de cada componente influyen en el funcionamiento del sistema. La estructura jerárquica de las interfaces permite la integración rápida y precisa, lo que influye en gran medida en el rendimiento del sistema.

3. *Personalización*: La capacidad del sistema –hardware y control– debe adaptarse a una flexibilidad personalizada para dar respuesta a los nuevos requerimientos dentro de una familia de productos similares. La flexibilidad personalizada significa que la configuración del SMR debe adaptarse a la gama completa de características dominantes de toda la familia de piezas [19]. Permite una mayor uniformidad de aplicación de múltiples herramientas, lo que aumenta la productividad a un costo reducido sin comprometer la flexibilidad. Cuando se diseñan adecuadamente, los SMR proporcionan el equilibrio adecuado entre la productividad y la flexibilidad general.
4. *Convertibilidad*: Los sistemas existentes deben poder transformarse y adaptarse fácilmente para futuros productos. A nivel de la máquina, la convertibilidad es necesaria cuando se cambia la producción entre dos miembros de la familia de piezas y que requiera cambio de herramientas o el ajuste manual de grados de libertad [20]. La necesidad de configuración debe llevarse a cabo de forma rápida para ser eficaz, por lo cual, el SMR debe contener mecanismos avanzados que le permitan una fácil reconfiguración, así como métodos de control y de detección que permitan la facilidad de calibración en las máquinas después de la reconfiguración [21]. Un nivel más alto de convertibilidad puede incluir la adición de funciones en las máquinas, o incluso la adición de máquinas para ampliar la gama de funcionalidad del sistema para producir nuevas piezas.
5. *Diagnosticabilidad*: Se debe ser capaz de leer automáticamente el estado actual de un sistema con el fin de detectar y diagnosticar la causa raíz de defectos y corregirlos rápidamente. A medida que los sistemas de manufactura se hacen más reconfigurables y sus diseños se modifican con frecuencia, se hace

indispensable afinar el sistema de manera que produzca piezas de calidad. Por lo tanto, los sistemas reconfigurables deben ser diseñados con sistemas de medición de calidad como una parte integral. Estos sistemas de medición están destinados a identificar rápidamente las fuentes de los problemas de calidad del producto en el sistema de producción y corregirlos mediante tecnologías de información, estadísticas y técnicas de procesamiento de señales [22].

Para reducir el tiempo y esfuerzo de reconfiguración, la modularidad, integrabilidad y diagnosticabilidad son los factores clave. Por el contrario, la personalización y convertibilidad, las cuales son características críticas de la reconfiguración [23], abren la oportunidad de reducir los costos de operación en estos sistemas. Por lo tanto, estas características determinan la facilidad y costo de reconfiguración de los sistemas de manufactura. Un sistema tendrá un alto nivel de reconfiguración si posee todas estas características. De igual manera, los SMR deben ser diseñados de acuerdo con un conjunto de 3 principios básicos [19], los cuales están destinados a mejorar su velocidad de reconfiguración y por consiguiente su velocidad de respuesta.

El primer principio se refiere a que el sistema debe contener los recursos de producción ajustables para responder a las necesidades del mercado. Por lo tanto, la capacidad debe ser rápidamente escalable en incrementos óptimos y pequeños. Además, la funcionalidad debe ser rápidamente adaptable a la producción de nuevos productos. El segundo principio requiere que el sistema este diseñado en torno a una familia de piezas o productos con la suficiente flexibilidad necesaria para producir todos los miembros de esa familia. Por último, para mejorar la capacidad de respuesta en el sistema, el tercer principio implica incorporar las características básicas de los SMR en todo el conjunto del sistema, así como en sus componentes mecánicos, de control e información. La implementación de estos principios básicos y las características anteriormente mencionadas, permitirán crear una "fabrica viva" capaz de ajustar rápidamente su capacidad de producción manteniendo altos niveles de calidad.

2.5 MÁQUINAS RECONFIGURABLES

Las Máquinas Reconfigurables (MR) desempeñan un papel clave debido a que se consideran el componente esencial de cualquier sistema reconfigurable proporcionando las características distintivas de funcionalidad y capacidad a través de una estructura reconfigurable [24]. La idea principal fue establecida inicialmente por Y. Koren et al. [10], y posteriormente algunas contribuciones útiles [25,26] se han desarrollado. Las MR pueden configurarse en distintas combinaciones con ayuda de los módulos básicos y auxiliares (figura 2.6). Los módulos básicos son generalmente de naturaleza estructural –bases, columnas, guías de deslizamiento–, mientras que los módulos auxiliares son aquellos en su mayoría cinemáticos o de movimiento que incluyen cabezales, cambiadores de herramienta, unidades de giro, etc. Generalmente los módulos auxiliares son más pequeños, ligeros, y económicos, por lo que pueden modificarse de forma rápida empleando un mínimo esfuerzo.

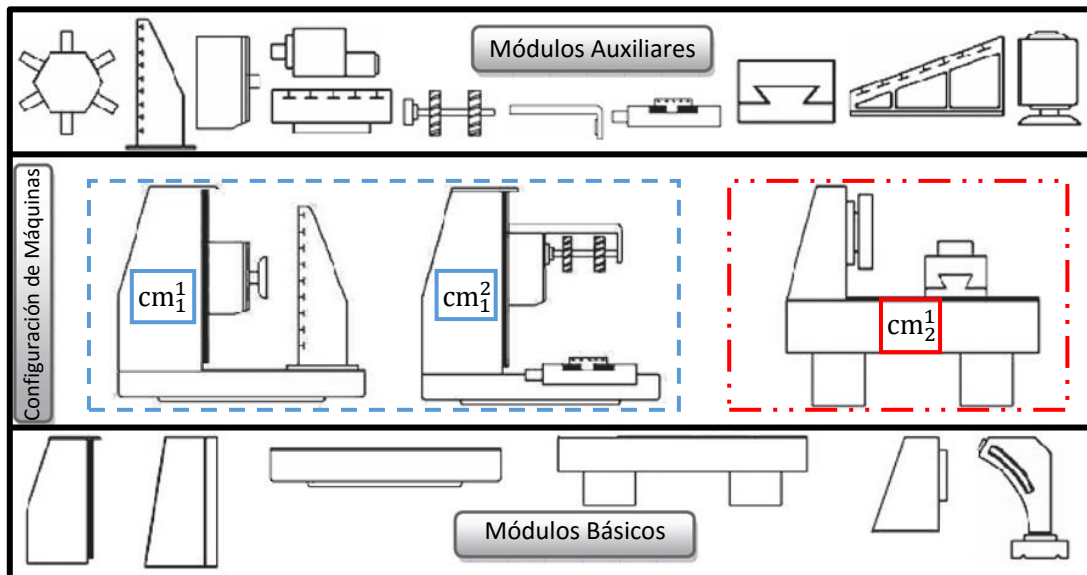


Fig. 2.6 Configuraciones de la máquina 1 (cm_1^1 y cm_2^1) y configuración única de la máquina 2 (cm_2^1) usando módulos básicos y auxiliares.

De acuerdo con K. K. Goyal et al. [27] las distintas configuraciones de las MR pueden ofrecer una capacidad y funcionalidad flexible manteniendo sus módulos base y añadiendo/removiendo los módulos auxiliares. En general, las MR son capaces de

realizar una variedad de operaciones, las cuales deben tenerse en cuenta al seleccionar las configuraciones adecuadas. Por lo tanto, las MR deben ser diseñadas en torno a las características comunes de una familia de productos o piezas para llevar a cabo las operaciones de mecanizado comunes a todos los miembros de la familia con la reconfiguración de la propia máquina [20]. Esto significa que se puede producir toda una familia de productos de manera rentable, incluso aquellos productos que no han sido programados, aunque con la misma precisión y fiabilidad [28].

Como puede apreciarse en la tabla 2.2, las MR constituyen una nueva clase de máquinas de producción e inspección que llenan la brecha entre las máquinas dedicadas y las máquinas flexibles. Para designar una MR, primero se debe comprender oportunamente la familia de productos o piezas antes de que el equipo se diseñe [29], con el fin de que su funcionamiento sea repetitivo y veloz como las máquinas dedicadas, pero con la característica de permitir una flexibilidad suficiente para producir cualquiera de las partes de una familia en gran cantidad. El paradigma de las MR es impulsado principalmente por consideraciones económicas [21], puesto que, en vez de construir una máquina dedicada de múltiples ejes, se podría adquirir una MR de un solo eje y posteriormente ir añadiendo más de acuerdo a los cambios. De igual manera, en vez de invertir en una máquina CNC de gran complejidad, es más económico tener una máquina simple con la funcionalidad suficiente para producir una parte de una familia de piezas sin tener que recurrir a una variedad de funcionalidades extra sin usar.

Tipo de Máquina	Dedicada	Reconfigurable	Flexible
Geometría de la pieza	Fija	Ajustable a una familia de piezas	Cualquier geometría
Velocidad de operación	Muy Rápido	Rápido	Lento
Flexibilidad	Nula	Personalizada a una familia de piezas	Total

Tabla 2.2 Distinciones entre distintos tipos de máquinas.

2.5.1 Principios de diseño

Algunos prototipos de máquinas reconfigurables [30] se han diseñado y construido con éxito (figura 2.7) bajo la dirección de la Universidad de Michigan, E.U. Sin embargo, a pesar de una gran variedad de estudios realizados sobre el tema, incluyendo el desarrollo conceptual de una máquina modular para un SMR [31], hasta el momento no se han podido implementar ampliamente. Un SMR será más fácil de diseñar y construir en el momento en que los módulos de una MR estén disponibles dentro del mercado. No obstante, un buen diseño implica que la MR sea competente a los cambios, por lo que los principios de diseño siguen la filosofía de los SMR [10,29]. De acuerdo a la referencia [32], una máquina se clasifica como una MR si su diseño sigue los siguientes principios:

- I. Una MR está diseñada en torno a una familia de partes en específico.
- II. Una MR está diseñada para una flexibilidad personalizada.
- III. Una MR está diseñada para una fácil y rápida convertibilidad.
- IV. Una MR está diseñada para ser escalable: permitiendo la adición o eliminación de elementos que aumenten la productividad o la eficiencia de operación.
- V. Una MR está diseñada para permitir la reconfiguración de la máquina para operar en varios sitios de la línea de producción realizando diferentes tareas con la misma estructura básica.
- VI. Una MR debe ser diseñada aplicando los conceptos de modularidad.

Después de tener en cuenta los principios antes mencionados para el diseño de una MR, se deben tomar en cuenta algunos aspectos de igual importancia, como son los requisitos de las operaciones de mecanizado –conjunto de funciones de la máquina y el tiempo ciclo requerido para cada operación– pasando posteriormente con el diseño del hardware y software [33]. Dentro de las características de hardware se deben cumplir una variedad de requisitos para satisfacer las demandas de productividad y calidad. Estas se destacan como las capacidades cinemáticas, las cuales deben ser analizadas para determinar si la máquina es capaz de producir los movimientos requeridos. Asimismo, se deben analizar las distintas fallas correspondientes a la rigidez estructural mecánica –falla geométrica del componente, falla de montaje, deformación térmica– para determinar si cumple con las especificaciones de tolerancia. Por otra parte, dentro de las características de software es indispensable considerar un control de arquitectura

abierta, en la que todos sus componentes deben ser modulares permitiendo que se puedan añadir o remover. La modularidad del controlador para una MR permite que éste sea personalizado para los requisitos de operación de mecanizado y, por lo tanto, sean robustos y fiables manteniendo al mismo tiempo la capacidad de ser configurado cuando los requisitos de operación de mecanizado cambien o una nueva tecnología esté disponible.



Fig. 2.7 Prototipo de una maquina reconfigurable.

Es sin duda que los sistemas de manufactura reconfigurables, así como todos los elementos que lo caracterizan, se conviertan en una opción alternativa con grandes beneficios para las empresas. En el siguiente capítulo se expondrá con detalle la metodología propuesta para definir los elementos claves para dar el paso hacia los SMR en la industria de los electrodomésticos. Con base en la literatura presentada, concordamos que la identificación y agrupación de las familias de productos es el primer elemento que debe ser considerado en un sistema reconfigurable. No obstante, cabe mencionar que además de ser uno de los principios fundamentales, también se deben especificar algunas características distintivas que definen a un SMR, las cuales dentro de la industria de los electrodomésticos se propone que tanto la modularidad como convertibilidad tienen un gran efecto dentro de los procesos de manufactura.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se presentó una breve reseña sobre los sistemas de manufactura, abarcando principalmente los sistemas de manufactura dedicados y flexibles, siendo estos los más implementados. Posteriormente se describió el concepto de un sistema de manufactura reconfigurable, el cual indica ser un paradigma intermedio entre los dos sistemas tradicionales, proporcionando una solución viable para los diversos cambios que existen en un producto y por lo tanto en un sistema. Finalmente, como un factor clave para los sistemas reconfigurables, se expuso el concepto de maquina reconfigurable, así como sus principios básicos de diseño basados en las características distintivas de los sistemas reconfigurables.

En el presente capítulo se expondrá la metodología que incluirá los elementos fundamentales para considerar un sistema de manufactura reconfigurable en la industria de los electrodomésticos. Como primer punto, la formación e identificación de familias de productos ofrece una serie de ventajas en términos de manufactura, ya que todas las partes de una familia pueden requerir un trato similar, manejo y características de diseño, lo que permite reducir tiempos de preparación –setup– y mejorar tanto la programación como el control de proceso. Por lo tanto, se convierte en un requisito indispensable para la fabricación de elementos en familias. Posteriormente, siendo la modularidad y convertibilidad características distintivas de los SMR, es evidente obtener una manera sistemática para cuantificarlas. Con una descripción matemática se podrá determinar de manera concreta si el sistema actual mantiene las condiciones suficientes para someterse a un estado reconfigurable sin recurrir a determinaciones empíricas. Finalmente, por medio del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), el cual proporciona una solución de un problema complejo con respecto a la importancia relativa de múltiples criterios, se podrá determinar la mejor opción de familias de productos con base en los criterios de costo, tiempo y esfuerzo.

3.2 AGRUPACIÓN DE FAMILIA DE PRODUCTOS

La demanda de nuevos productos a bajo costo, alta calidad y con un gran nivel de personalización es imprescindible. Es por eso que los sistemas de manufactura reconfigurables cuentan con los requisitos necesarios para hacer frente a situaciones en las que la productividad y la capacidad del sistema cambien su configuración para la producción de diferentes productos de gran importancia [10]. De acuerdo con Z. Xiaboo et al. [34, 35], un SMR se considera como un sistema que produce una familia de productos que comparten ciertas similitudes. Estas familias se componen de productos que poseen similitudes en su funcionalidad y pueden compartir componentes, procesos de producción y arquitecturas [36].

Por otra parte, el estudio realizado por M. R. Abdi y A. W. Labib [37], sugiere que la agrupación de familias de productos tiene un efecto positivo sobre la introducción de nuevos productos, lo cual permite que el sistema aborde simultáneamente una amplia gama de clientes e incremente el uso de los recursos de manufactura comunes. Por lo tanto, la agrupación de productos puede ser considerado como un requisito significativo para el diseño de un SMR con el fin de facilitar la producción y manejo de una variante de productos, así como la compra de materiales. El atributo clave de una familia de productos es que todos los componentes dentro de una familia pueden requerir sistemas de producción similares. Por lo tanto, cualquier sistema de manufactura que produce un componente dentro de una familia puede producir esencialmente los componentes de esa familia [38].

3.2.1 Clasificación de métodos para la agrupación de familias

La proliferación de métodos para agrupar productos surgió con la filosofía de la Tecnología de Grupo (TG), un concepto que se remonta con Mitrofanov [39] para buscar e identificar piezas similares con el fin de aprovechar sus similitudes en la fabricación y diseño. El principio de este concepto es dividir a la manufactura en pequeños grupos o celdas para designarlos a una familia específica o un conjunto de piezas. Por lo tanto, la agrupación de productos en familias y la formación de celdas han estado estrechamente vinculados. Como se muestra en la figura 3.1, existe una gran variedad de métodos que se han desarrollado para la formación de familias [40].

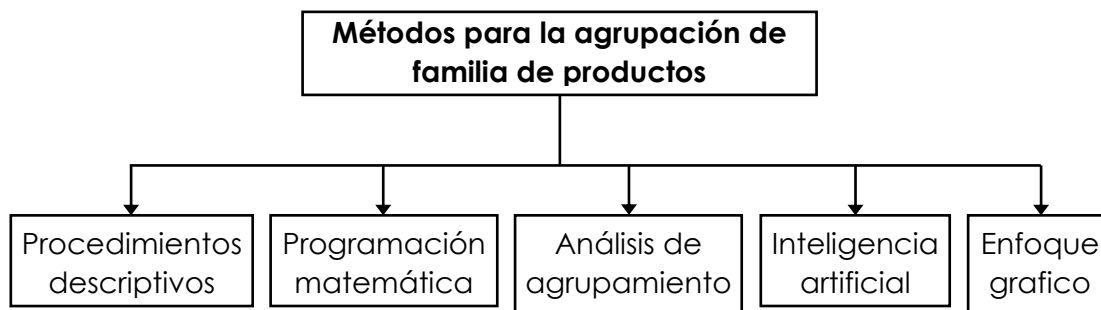


Fig. 3.1 Clasificación de métodos para la formación de familias.

La mayoría de los procedimientos descriptivos no son muy precisos, aunque son fáciles de elaborar [41], estos pueden ser apropiados en pequeños problemas, pero no proporcionan buenas soluciones en general. Para el caso de los enfoques de programación matemática se formulan de forma incompleta y, por lo tanto, su utilidad es limitada en entornos industriales [40]. En cuanto a los métodos de inteligencia artificial, los algoritmos de búsqueda al azar, tales como el recocido simulado, algoritmos genéticos y redes neuronales, proporcionan soluciones que no dependen de la solución inicial. Sin embargo, su aplicación puede descartarse por los largos tiempos de cálculo requerido para la obtención de las soluciones. Para los métodos basados en el enfoque gráfico, la identificación de celdas a partir de grafos disjuntos es un tema complejo que abarca una serie de limitaciones.

Los métodos por medio de análisis de agrupamiento tienen como objetivo principal, agrupar tanto objetos como entidades con base en sus similitudes atributo, tales que los elementos individuales dentro de un grupo tengan un alto grado de "asociación natural" entre sí [40]. Estos métodos pueden ser clasificados como 1) técnicas basadas en matrices, 2) técnicas de agrupamiento jerárquico y 3) técnicas de agrupamiento no jerárquico. Las técnicas basadas en matrices logran resultados aceptables a un bajo costo computacional, aunque con la desventaja de ser dependientes de la configuración de incidencia inicial de la matriz [41, 42, 43]. Por otro lado, las técnicas de agrupamiento no jerárquico como ISNC [44], ZODIAC [45] y GRAFICS [46], exigen con anticipación la información sobre el número de grupos que se forme, por lo que no es deseable en un SMR [47]. Además, la arbitrariedad de la partición inicial del conjunto de datos puede dar lugar a resultados insatisfactorios.

Finalmente, las técnicas de agrupamiento jerárquico juntan elementos similares con base en sus similitudes atributos. Estos pueden ser del tipo aglomerativos, los cuales comienzan con cada objeto como un grupo separado para después medirlos por medio de un coeficiente de similitud; y por otro lado están los del tipo divisivo, los cuales comienzan con todo el conjunto como un grupo para después dividirlos en grupos cada vez más pequeños. En el contexto de agrupación de familia de productos o partes, los procedimientos del tipo aglomerativo se han aplicado ampliamente [40, 47, 48, 49].

3.2.2 Coeficiente de similitud

El coeficiente de similitud es el más comúnmente usado para asignar partes a celdas de máquinas mediante la formación de una matriz para evaluar el grado de similitud entre un par de objetos –piezas o productos– con la base común entre atributos –maquinas o procesos–. La ventaja radica en la flexibilidad de incorporar los datos de manufactura en las celdas de máquinas o en la formación de la familia de partes [50]. Tradicionalmente, la jerarquía de agrupación se representa por medio de una estructura de árbol llamado dendograma, el cual es un diagrama bidimensional que ilustra las fusiones o divisiones que se han hecho en cada etapa sucesiva del análisis. Diversos autores han contribuido en las diferentes medidas de similitud [50], pero la más importante es el coeficiente de Jaccard, el cual fue el primero en ser utilizado por McAuley [51] para la formación de celdas de manufactura. El coeficiente de Jaccard (S_{mn}) entre dos elementos (m, n) se calcula por medio de la expresión

$$S_{mn} = \frac{a}{a + b + c} \quad 0 \leq S_{mn} \leq 1, \quad (3.1)$$

donde a indica el número de operaciones comunes que forman parte del proceso para ambos productos m y n , b representa el número de operaciones que forman únicamente el producto m ; y c corresponde al número de operaciones que forman el producto n , pero no el producto m . Por lo tanto, si $S_{mn} = 1$ quiere decir que existe una similitud máxima entre ambos productos con respecto a las máquinas que se requieren para procesarlos. Por el contrario, si $S_{mn} = 0$ significa que existe una disimilitud entre los productos procesados, por lo que cada producto requiere de máquinas diferentes.

Dentro de las técnicas de agrupación jerárquico aglomerativo, el algoritmo de simple enlace como el que usó McAuley [51] ha sido el más utilizado debido a su flexibilidad y determinación del nivel de similitud para la formación del número requerido de celdas [50]. Sin embargo, tiene la desventaja de producir un efecto en cadena, lo que provoca que solo unos pocos grupos grandes se formen [52]. Por tal razón, el algoritmo de enlace promedio [53] se ha propuesto para suprimir este problema, el cual ha ofrecido resultados considerables [54, 55] dejándolo como el algoritmo más apropiado para la formación de familias en un sistema reconfigurable [48, 56]. El algoritmo comienza agrupando los productos con un coeficiente de similitud alto y posteriormente se crea una sub-matriz teniendo en cuenta los productos agrupados como una familia. Las similitudes entre los elementos se recalculan con los valores promedio mediante la expresión

$$S_{ij} = \frac{\sum_{m \in i} \sum_{n \in j} S_{mn}}{N_i \cdot N_j}, \quad (3.2)$$

donde N_i y N_j son el número de productos correspondientes a las familias i y j respectivamente. Este procedimiento se repite hasta que todos los productos se agrupan en una familia. Para tener una mejor comprensión sobre este concepto, se presenta como manera de ejemplo una serie de productos con sus respectivos procesos. Por medio de las expresiones 3.1 y 3.2 se podrá determinar los grupos de familias, así como su correspondiente dendograma. El primer paso consiste en identificar los productos y sus respectivos procesos para después disponerlos en una matriz binaria como se muestra continuación.

		PROCESOS				
		1	2	3	4	5
PRODUCTOS	A	1	1	0	1	1
	B	1	0	1	0	1
	C	1	1	0	1	0
	D	1	1	1	0	0

Una vez obtenida la matriz de incidencia, se elabora una segunda matriz, en donde se lleva a cabo la implementación de la expresión 3.1 –Coeficiente de Jaccard–. Cada coeficiente se calcula hasta completar la matriz. Por ejemplo, en el caso de A-B se tiene que $a = 2$, $b = 2$ y $c = 1$, por lo tanto $S_{AB} = 0.4$.

	A	B	C	D
A	0	0.4	0.75	0.4
B		0	0.2	0.5
C			0	0.5
D				0

A partir de los resultados previos, se obtiene el primer grupo con el valor más alto de similitud. Con esto se da el siguiente paso, en donde la matriz se modifica para determinar los grupos restantes por medio de la expresión 3.2. Esto es por ejemplo, para el caso de AC-B se tiene que $S_{AC(B)} = (S_{AB} + S_{CB}) / (2 \cdot 1)$, por lo tanto $S_{AC(B)} = 0.3$.

	AC	B	D
AC	0	0.3	0.45
B		0	0.5
D			0

De esta forma se obtiene el siguiente grupo conformado por B-D con un valor máximo de 0.5. Para concluir con el procedimiento, se realiza la última comparación entre los dos grupos AC-BD. De manera que $S_{AC(BD)} = (S_{AB} + S_{AD} + S_{CB} + S_{CD}) / (2 \cdot 2)$.

	AC	BD
AC	0	0.375
BD		0

En el último paso del procedimiento, se elabora el dendograma (figura 3.2) correspondiente para la representación gráfica de la agrupación de productos en familias. Como se puede apreciar en el dendograma, se obtuvieron dos grupos de familias A-C y B-D, las cuales entre éstos su similitud es del 37%.

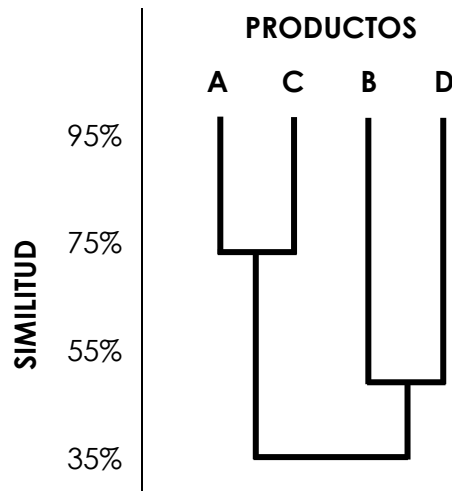


Fig. 3.2 Dendrograma para la identificación de familia de productos.

3.3 MODULARIDAD

La utilidad de un sistema reconfigurable se incrementa en gran medida si todos sus componentes –máquinas, herramientas, controles, estaciones– se diseñan para la producción de productos modulares. En uno de los primeros trabajos para discutir la teoría de diseño modular, Ulrich y Tung [57] definieron la modularidad en función de dos características de diseño de producto: 1) La similitud entre la arquitectura física y funcional del diseño y 2) Reducción al mínimo de las interacciones incidentales entre componentes físicos. Por lo que el termino modularidad es usado para describir el uso común de unidades para crear variantes en el producto [58].

Cuando la definición de modularidad se extiende a nivel de la manufactura, es preciso entender los diversos procesos sometidos de cada atributo por cada componente. Asimismo, requiere mantener la independencia entre componentes y procesos en diferentes módulos, fomentar la similitud de todos los elementos en módulos, así como la intercambiabilidad entre ellos. Estos módulos disminuyen los costos de fabricación, tiempo de entrega y fortalece las familias de productos [59].

Para la fabricación de máquinas, el concepto modular se ha utilizado para producir variedad de maquinaria mediante distintas configuraciones de montaje de módulos. Esto da como resultado la producción de herramienta personalizado mediante la configuración de subsistemas o módulos de máquinas existentes [60]. Sin embargo, hay limitaciones en la fabricación de maquinaria modular, ya que hasta el momento no

existe un método estándar para producir tales componentes [61]. Algunas aportaciones proponen superar esto mediante el Sistema de Producción Modular (SPM) [62], el cual constituye sistemas de producción flexible a partir de subsistemas modulares estandarizados.

El concepto de manufactura modular, el cual desarrolla módulos de productos con dependencias mínimas de otros componentes del producto con respecto a los procesos de manufactura, no solo se limita a componentes físicos, sino también es indispensable para clarificar la estructura lógica. Las piezas, los productos y los equipos de manufactura, así como el diseño y las actividades de operación se describen en unidades. Estas unidades o módulos se combinan para formar el sistema de manufactura [61], los cuales, además, poseen similitudes máximas con respecto a sus procesos de manufactura [59].

3.3.1 Métodos para la definición de módulos

Al usar un mismo módulo en varios sistemas o productos, permite una gran variedad de los mismos mientras se utilizan tipos de componentes más comunes. Esto trae ventajas de escala y alcance, como la reducción de inversión en la compra y fabricación de piezas [63, 64, 65], así como apoyo a la personalización en masa mediante el uso de componentes comunes a través de un producto o una familia de productos [66, 67]. Además, puede llegar a reducir el tiempo ciclo, lo que a su vez produce, mayores ingresos debido a una mayor introducción en el mercado y por lo tanto una mayor capacidad de respuesta a los requerimientos del cliente.

Debido a las múltiples ventajas de la modularidad, se han propuesto diferentes métodos para definir los módulos [63, 68, 69, 70]. Holtta y Salonen [71] demostraron que estos métodos dan sugerencias diferentes para una arquitectura modular, incluso al comenzar con las mismas condiciones iniciales. Sin embargo, estos métodos no están de acuerdo con el grado apropiado de modularidad (o integralidad) de la arquitectura. Tal es el caso del método de implementación de la función modular [63], en el que tiende implementar arquitecturas más integrales debido a su límite en el número de módulos permitidos.

Por otra parte, el trabajo de Aarnio [72] incluye un paso hacia la gestión del equilibrio entre la modularidad e integralidad. Este método considera las cuestiones funcionales y económicas, así como la variedad de productos. Sin embargo, las limitaciones técnicas, como el rendimiento, no se incluyen en los criterios del método. Esto es cierto en todos los métodos ya que el rendimiento, el peso, entre otros, son limitaciones y no parámetros de diseño y, por lo tanto, son difíciles de tener en cuenta al tomar decisiones de la arquitectura sobre la modularidad. De igual manera Sosa et al. [73] introducen un método para identificar si un sistema es modular o integral sobre la base de las interacciones de componentes en la matriz de estructura de diseño (DSM) [74].

De acuerdo a lo anterior, hay una gran variedad de aportaciones sobre los beneficios de la modularidad e integralidad incluyendo la evaluación de que es mejor y cuando es a menudo subjetivo, cualitativo o especulativo. Sin embargo, hasta ahora no parece haber un método universalmente aceptado para definir el grado de modularidad en un caso específico. No obstante, el siguiente apartado se propone un método con un enfoque más cuantitativo sobre la modularidad de un producto o sistema.

3.3.2 Índice de modularidad de valores singulares

Introducido originalmente por Holtta et al. [75] y desarrollado en un estudio subsecuente [76], la métrica propuesta es una forma de cuantificar el grado de modularidad de un producto o sistema basado en su estructura de conectividad interna. Por lo tanto, la modularidad se puede evaluar teniendo en cuenta el grado fundamental de acoplamiento independiente de donde se establecen los límites del módulo. De acuerdo con Holtta et al. [75], para determinar el índice de modularidad en primera instancia debe estar apoyado en el desarrollo de una matriz de estructura de diseño (DSM), la cual es una herramienta de representación y análisis para el modelado de sistemas especialmente en efectos de descomposición e integración [74]. Básicamente una DSM muestra las relaciones entre los componentes de un sistema en un formato compacto, visual y analíticamente ventajoso por medio de una matriz cuadrada.

La DSM sugiere ser representada en forma binaria donde los elementos en diagonal son ceros y los elementos fuera de la diagonal se ajustan a la unidad si dos componentes están directamente conectados. La conexión entre dos componentes se puede basar

en el contacto físico, flujo de material, flujo de energía o flujo de información [74]. Al emplear una DSM no binario permite la diferenciación entre las conexiones de los diferentes puntos fuertes. Sin embargo, al utilizar un DSM binario se mejora la simplicidad. Con base en la DSM, la realización de la descomposición de valores singulares (SVD) revela sus valores singulares, los cuales representan en el álgebra lineal numérica las raíces cuadradas de los autovalores de $DSM^T DSM$.

Los valores singulares son esenciales para calcular de forma fiable cantidades tan importantes como el rango de una matriz o la distancia de una matriz no singular al conjunto de las matrices singulares [77]. Debido a esto, la forma de evaluar la modularidad adquiere el nombre de índice de modularidad de valores singulares (SMI). Para una mayor comprensión del concepto, en la figura 3.3 se muestra un ejemplo representativo de la estructura de un producto/sistema con $N = 5$ componentes que se conectan a primeros vecinos, el cual se procederá a determinar su índice de modularidad.

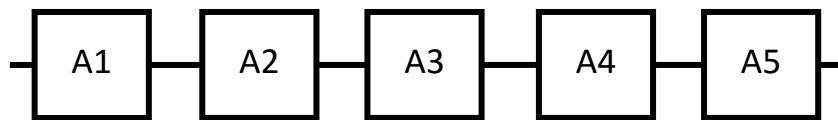


Fig. 3.3 Representación esquemática de la estructura de un producto/sistema en serie.

Una vez identificado el producto/sistema con todas sus conexiones, se elabora la matriz de estructura de diseño (DSM) como se muestra a continuación

$$DSM = \begin{matrix} & \begin{matrix} A1 & A2 & A3 & A4 & A5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} . \quad (3.3)$$

Posteriormente se obtiene la descomposición de valores singulares (SVD) de la matriz $[DSM]_{m \times n}$ de la forma

$$DSM = U \cdot \sum DSM \cdot V^T , \quad (3.4)$$

donde U y V son las matrices ortogonales del orden m y n respectivamente y $\sum DSM$ es la matriz diagonal de números reales no negativos σ_i (valores singulares), tal que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_N \geq 0$. De este modo y por medio del comando $s = svd(A)$ del software MATLAB, los valores singulares correspondientes a la matriz de estructura de diseño (DSM) toman la siguiente forma

$$\sum DSM = \begin{bmatrix} 1.7321 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.7321 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Mediante la postulación del índice de modularidad (SMI) [76] se puede determinar el grado en que la información importante describe la conectividad del sistema y en el que se concentra en unos pocos componentes que están altamente conectados. Dicho estudio confirma que los sistemas integrales muestran una disminución más rápida en la magnitud de los valores singulares, con relación a los sistemas modulares en los que dicha información se distribuye más ampliamente en todo el sistema. Por lo tanto, el SMI mide la tasa de disminución de los valores singulares normalizados del sistema (figura 3.4), esto es

$$SMI = \frac{1}{N} \arg \min \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_1} - e^{-[i-1]/\alpha} \right|. \quad (3.6)$$

En la ecuación 3.6 se asume que los valores singulares en todos los sistemas disminuyen exponencialmente [76] de acuerdo con $exp(-(i-1)/\alpha)$ –línea punteada de la figura 3.4–. Por lo tanto, el SMI es igual a la cantidad de α/N que minimiza el error entre la disminución exponencial y la estructura de decaimiento real a través de todos los valores singulares.

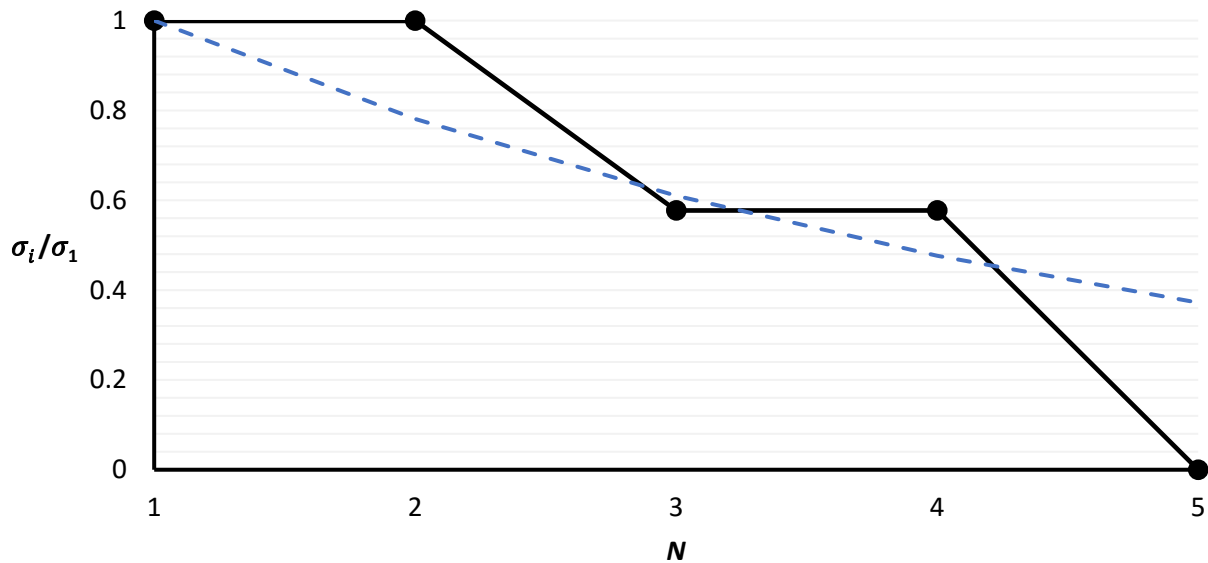


Fig. 3.4 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 .

Para determinar α es necesario recurrir a la regresión por método de mínimos cuadrados, lo cual para este caso $\alpha = 4.04$. Por lo tanto, el índice de modularidad de valores singulares es $SMI = 0.801$. Con esta descripción para la evaluación de la modularidad se limita teóricamente entre los valores de "0" y "1". Esto implica que si el SMI está más cerca de "1" indica un mayor grado de modularidad y, por el contrario, si está más cerca de "0" indica un sistema más integral.

Cabe mencionar que una de las virtudes del SMI es que es independiente de los límites del módulo o del ordenamiento de las filas y columnas correspondiente al DSM binario. Asimismo, no está determinado por una escala, lo que significa que se puede calcular para diferentes tamaños de sistema que tengan la misma arquitectura fundamental de manera que devolverá el mismo o casi el mismo valor.

3.4 CONVERTIBILIDAD

En los sistemas de manufactura, la producción se realiza en etapas, donde el producto se procesa parcialmente en una etapa y luego se transfiere a la siguiente. Estos sistemas pueden tener diferentes configuraciones que se definen por la forma en que las máquinas están dispuestas en etapas y la forma en que están conectadas. Se ha demostrado que la configuración de un sistema puede tener efectos significativos en el rendimiento [78, 79], los cuales pueden ser evaluados en muchas áreas como la calidad, productividad y capacidad de respuesta. La capacidad de respuesta incluye tanto la escalabilidad de la capacidad, así como la convertibilidad, la cual se define como la capacidad de un sistema para ajustar rápidamente la funcionalidad de la producción o los cambios de un producto a otro [23].

Durante las primeras fases de diseño de un sistema de manufactura, el parámetro de la convertibilidad puede ser definido usando las características intrínsecas de los componentes y configuración que hacen que un sistema sea más convertible que otro. Este enfoque es útil cuando la información detallada sobre los productos y planes de proceso todavía no están disponibles. Por lo tanto, de acuerdo con Maier y Koren [23] propusieron el parámetro de convertibilidad C_S , el cual incorpora las contribuciones de configuración C_C , máquina C_M y manejo de materiales C_H . Estos factores se asignan juntos para una evaluación global de la convertibilidad intrínseca del sistema en una ecuación de la siguiente manera:

$$C_S = w_1 C_C + w_2 C_M + w_3 C_H , \quad (3.7)$$

donde los valores de preferencia w_1 , w_2 y w_3 correspondientes a cada parámetro y son ajustables de tal manera que $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$.

3.4.1 Convertibilidad de configuración

La configuración refiere a la disposición y las conexiones de las máquinas en un sistema de manufactura. Principalmente, depende del incremento mínimo de la conversión I , las conexiones de enrutamiento R en cada configuración y el número mínimo de máquinas replicadas X en una etapa particular en el plan de trabajo.

$$C'_c = \frac{RX}{I} . \quad (3.8)$$

Al igual que los conceptos anteriores, se presentará un ejemplo representativo para comprender la metodología. En la figura 3.5 (A) se muestra la estructura de un sistema, el cual se determinará el valor de cada contribución. Siendo como primer elemento la convertibilidad de configuración, se tomará como apoyo las configuraciones en serie (B) y paralelo (C) con el mismo número de elementos del sistema original (A). De esta manera ayudará a tener una mejor percepción de las comparaciones entre las configuraciones. Asimismo, tendrán una importancia fundamental para determinar el valor normalizado, el cual se explicará más adelante.

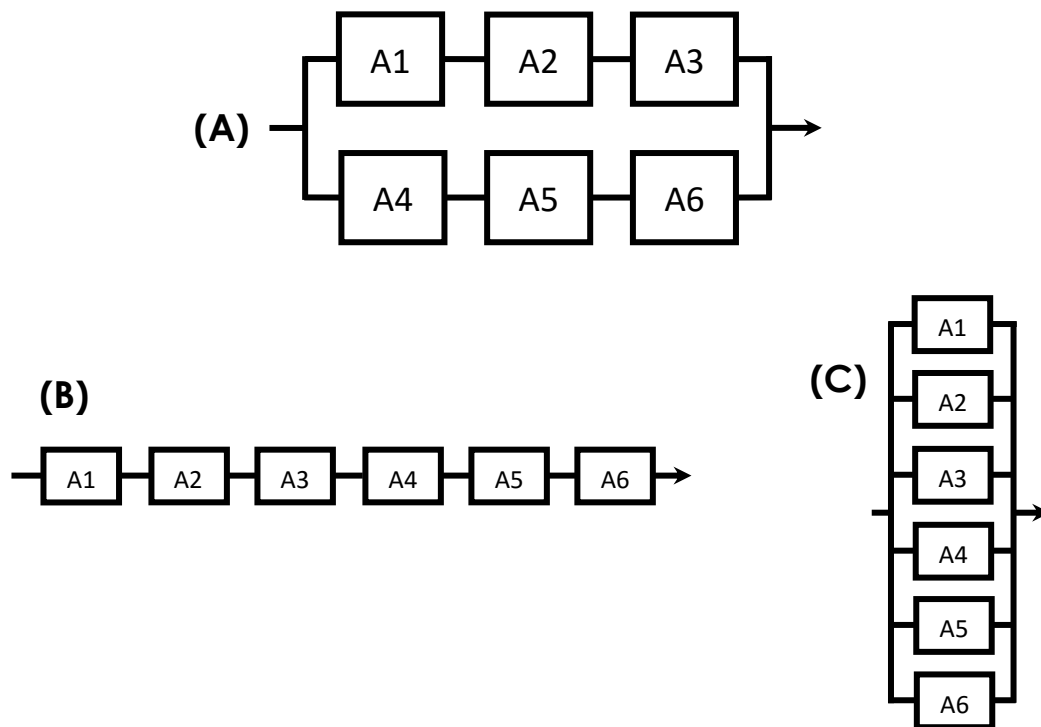


Fig. 3.5 Representación esquemática de un sistema con $N = 6$ etapas para diferentes configuraciones.

El incremento mínimo de la conversión I es un indicador de gran importancia cuando una empresa quiere introducir nuevos productos tan pronto como sea posible. Si se tuviera el caso de un sistema totalmente en serie su incremento mínimo de conversión sería de 1 o 100%, es decir, con el fin de introducir un nuevo producto en la línea, ésta se tendría que parar, cambiar y reiniciar en su totalidad. Por otro lado, en un sistema

totalmente paralelo su incremento mínimo de conversión sería de 1/6 (0.16), debido a que solamente tendría que parar una etapa del sistema. Con base en lo anterior se puede determinar que para el caso (A) se tiene un incremento mínimo de 1/2 debido a que solo el 50% del sistema se tendría que parar y reconfigurar.

Para un sistema de manufactura, un mayor número de conexiones de enrutamiento R indica un mayor grado de convertibilidad. El número de conexiones de enrutamiento en cada configuración se contabiliza a través de todas las conexiones –entrada y salida– de las máquinas o elementos. Para los casos totalmente en serie y paralelo les corresponden 7 y 12 conexiones respectivamente, mientras que para el caso (A), el número de conexiones de enrutamiento corresponde a 8.

Ciertas configuraciones permiten una fácil programación de la producción de más de un producto a la vez. El número mínimo de máquinas replicadas X en una etapa particular en el plan de proceso determina el número de tipos de piezas que se pueden producir sin necesidad de cambios. Por ejemplo, en una línea totalmente en serie solo cuenta con un único flujo por el cual las piezas avanzan a través del sistema. Por lo tanto, solo 1 es el número mínimo de máquinas replicadas. Por otra parte, el caso totalmente paralelo el mínimo de máquinas replicadas es de 6 ya que cada máquina le corresponde un flujo independiente. Siendo de esta manera, el caso (A) obtiene un mínimo de 2 máquinas replicadas.

Al determinar el valor de las variables correspondiente a la expresión 3.8 se obtiene que la convertibilidad de configuración para los casos (A), (B) y (C) de la figura 3.5 son 32, 7 y 432 respectivamente. Sin embargo, se puede notar que estos resultados no están proporcionados en una escala estándar. Por tal motivo, es necesario normalizar el valor de C'_c para indicarlos en un rango de 1 a 10. Con una transformación logarítmica, se requiere el valor de configuración para el mismo sistema en las configuraciones de serie y paralelo, por tal motivo es necesario analizar esas configuraciones de igual manera para cualquier sistema dado.

$$C_c = 1 + \frac{\log\left(\frac{C'_c}{C'_{c,serie}}\right)}{\log\left(\frac{C'_{c,paralelo}}{C'_{c,serie}}\right) \times \frac{1}{9}} \quad (3.9)$$

De acuerdo con la expresión presentada previamente, un sistema totalmente en paralelo se define con un $C_c = 10$ y para uno en serie de $C_c = 1$. De manera que para el ejemplo representativo de la figura 3.5 (A) la convertibilidad de configuración es

$$C_c = 1 + \frac{\log\left(\frac{32}{7}\right)}{\log\left(\frac{432}{7}\right) \times \frac{1}{9}} = 4.32 . \quad (3.10)$$

3.4.2 Convertibilidad de la máquina

La convertibilidad del sistema depende no solo de la configuración que se ha seleccionado, sino también de la convertibilidad de la máquina C_M , la cual se calcula de la siguiente manera:

$$C_M = \frac{\sum_{i=1}^N C'_M}{N} . \quad (3.11)$$

Para este tipo de convertibilidad, para cada una de las máquinas individuales N en el sistema se basa en la premisa de que algunas máquinas tienen rasgos y características que los hacen más convertibles. Por lo tanto, para determinar C'_M se realiza una evaluación con base en lo siguiente:

- Q1. ¿Cuenta con cambiadores de herramienta automática?
- Q2. ¿Es fácilmente reprogramable con software flexible?
- Q3. ¿Es modular con componentes de hardware flexibles?
- Q4. ¿Cuenta con capacidad flexible?
- Q5. ¿Cuenta con una gran capacidad herramientas?

En la figura 3.6 se muestra un diagrama de apoyo en el cual junto con las respuestas generadas por las evaluaciones (sí o no) previamente mencionadas, ayudarán a determinar una estimación aproximada de la convertibilidad de la máquina C'_M en una escala del 1 al 10. De tal manera que "1" se relaciona con una máquina totalmente dedicada y "10" sugiere una máquina CNC con accesorios altamente flexibles.

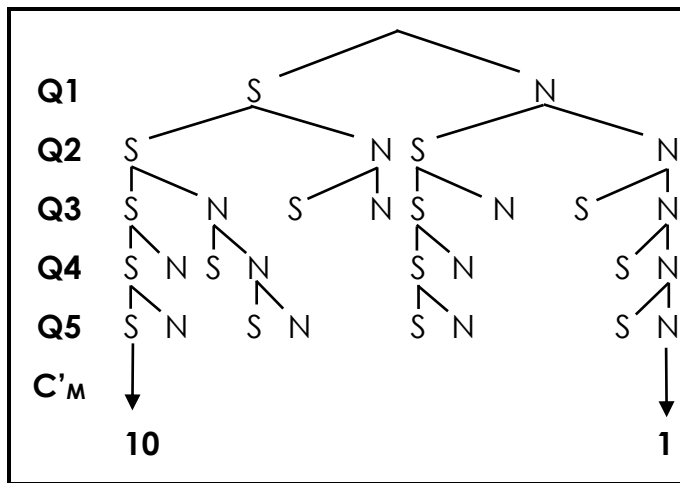


Fig. 3.6 Diagrama de apoyo en la estimación del C'_M y C'_H .

3.4.3 Convertibilidad del manejo de materiales

Un factor significativo en el rendimiento del sistema que aún no se ha incluido en los parámetros de la flexibilidad o convertibilidad, es la naturaleza de los dispositivos de manejo de materiales que se utilizan. Este parámetro se desarrolla de manera análoga a la convertibilidad de la máquina, esto es

$$C_H = \frac{\sum_{i=1}^M C'_H}{M} . \quad (3.12)$$

El parámetro C'_H para cada dispositivo de manejo de materiales que conecta las maquinas se obtiene con ayuda del diagrama de apoyo mostrado en la figura 3.6. Al igual que la convertibilidad de la máquina, las evaluaciones correspondientes a C'_H se basan en lo siguiente:

- Q1. ¿Sigue una ruta libre?
- Q2. ¿Es multidireccional?
- Q3. ¿Es reprogramable?
- Q4. ¿Tiene movimiento asíncrono?
- Q5. ¿Es automático?

Por lo tanto, volviendo al ejemplo representativo de la figura 3.5 (A) se aplica las ecuaciones 3.11 y 3.12 correspondientes a la convertibilidad de la máquina y del manejo de materiales. Suponiendo que $C_M = 6$, $C_H = 8$ y una preferencia equitativa entre las

contribuciones, esto es $w = \frac{1}{3} \forall C_C, C_M, C_H$, se obtiene la convertibilidad global del sistema con un valor de $C_s = 6.10$, lo cual indica que la convertibilidad del sistema se sitúa con un poco más del 50% para que pueda ser capaz de ajustarse ante un nuevo cambio.

3.5 PROCESO ANALITICO JERARQUICO

Desarrollado por Saaty [80], el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) es uno de los sistemas de análisis de decisión multicriterio para la toma de decisiones. Principalmente este método descompone un problema complejo en un orden jerárquico con el fin de ayudar a encontrar una decisión alternativa, que será la opción más factible con mejor calificación a través de la síntesis de todos los elementos de preferencias. Numerosas aplicaciones de esta metodología se han reportado en diversos campos incluyendo la manufactura, tal es el caso de Abdi y Labib [81] en donde compararon las características de un SMR contra los sistemas de manufactura tradicionales con el fin de lograr una estrategia para seleccionar el sistema de manufactura apropiado sobre el horizonte de planificación. Además, como una extensión de éste estudio, analizaron el vínculo de reconfiguración entre los mercados y la manufactura para agrupar productos en familias y asignarlos a los sistemas de manufactura [37]. De igual manera, Maier-Speredelozzi y Hu [82] adaptaron el PAJ para la selección de la configuración más apropiada de un sistema de manufactura con la consideración de múltiples criterios de rendimiento.

Con base en lo anterior, el Proceso Analítico Jerárquico se ha utilizado para tratar distintos problemas en la manufactura reconfigurable. No obstante, para aplicar esta metodología de manera sistemática es fundamental explicar el proceso paso a paso como se muestra a continuación:

1. Siendo el punto de mayor trascendencia, se debe definir el problema u objetivo, el cual para este estudio en específico está determinado por la selección de familia de productos existentes de la industria de los electrodomésticos para proponerlos al concepto de un sistema de manufactura reconfigurable. Más adelante se dará la descripción detallada del modelo.
2. Partiendo del objetivo en la parte superior, se debe estructurar la jerarquía como se muestra en la figura 3.7. Los niveles que conforman la jerarquía se dividen en el

objetivo, seguido por los elementos que afectan a la decisión en forma de criterios y subcriterios y finalmente en el último nivel las alternativas o las opciones de decisión.

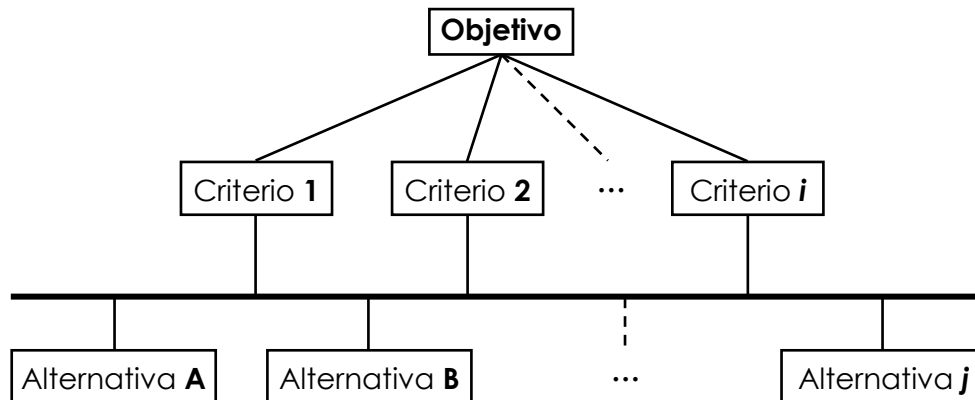


Fig. 3.7 Modelo del Proceso Analítico Jerárquico.

3. Una vez obtenida la estructura jerárquica del problema se da paso a la etapa de valoración de los elementos por medio de comparaciones binarias (por parejas) basándose tanto en factores cuantitativos –aspectos tangibles– como cualitativos –aspectos no tangibles– en una escala del 1 al 9 propuesta por Saaty [80, 83] y mostrada en la tabla 3.1. La escala verbal utilizada en el PAJ permite incorporar subjetividad, experiencia y conocimiento en un camino intuitivo y natural. Esta escala está justificada teóricamente y su efectividad ha sido validada empíricamente aplicándola a diferentes situaciones reales con aspectos tangibles para los que se ha comportado adecuadamente.

Planteamiento verbal de la preferencia	Escala numérica
Igual importancia	1
Importancia moderada de un elemento sobre el otro	3
Importancia fuerte o esencial de un elemento	5
Importancia muy fuerte de un elemento sobre el otro	7
Importancia absoluta o extrema de un elemento frente al otro	9
Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	2, 4, 6, 8

Tabla 3.1 Escala de preferencias.

El resultado de estas comparaciones da lugar a una matriz cuadrada de comparaciones pareadas $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ estructurada de la siguiente manera

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

donde a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j . Cuando $i = j$ el valor de $a_{ij} = 1$, pues se está comparando la alternativa consigo misma. De acuerdo con la teoría de Saaty, se mantiene una condición de reciprocidad $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad \forall i, j$, por lo que la matriz \mathbf{A} se expresa como

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

4. Una vez formada la matriz de comparación, el proceso deriva hacia la etapa de priorización y síntesis, la cual se calcula el vector prioridad de cada uno de los elementos que se comparan. Existen distintos procedimientos matemáticos para obtener el vector de pesos relativos asociado a un nivel, pero el más popular es el propuesto por el mismo Saaty.

Este método puede definirse como un método de promedios aritméticos normalizados en donde la matriz \mathbf{A} se transforma en $\mathbf{B} = [b_{ij}]$. Los elementos de la matriz \mathbf{B} se calculan de acuerdo a lo siguiente

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}. \quad (3.15)$$

Con base en la matriz \mathbf{B} se calcula el vector prioridad o autovector w_i de cada criterio, el cual es el promedio de la suma de las filas de los valores normalizados dividido por el número de criterios en evaluación, esto es

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (3.16)$$

Independientemente del método de cálculo, los componentes del vector prioridad w se entienden como una expresión de la preferencia entre los elementos a estudiar, los cuales al sumarlos corresponden a la unidad, esto es $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

A partir del algebra lineal se sabe que la formulación del tipo $Aw = nw$ implica que n y w sean el autovalor y autovector de A respectivamente. Además, sabiendo que el otro autovalor de A es cero con una multiplicidad de $(n - 1)$, entonces se sabe que n es el autovalor más grande de A . Por lo tanto, si las entradas de A son relaciones entre los pesos, entonces el vector de pesos es el autovector de A asociado al autovalor de n . Saaty propuso extender este resultado a todas las matrices de comparaciones pareadas reemplazando n con el autovalor máximo genérico de A , esto es

$$Aw = \lambda_{max}w . \quad (3.17)$$

Por lo tanto y considerando la matriz normalizada, el autovalor máximo se obtiene a partir de la siguiente expresión

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} . \quad (3.18)$$

5. De acuerdo con el resultado dado en la comparación de la matriz A , su autovalor máximo λ_{max} es igual a n si y solo si la matriz es consistente. Sin embargo, se debe tener presente que la consistencia perfecta es muy difícil de lograr, por lo que es de esperar cierta inconsistencia en casi cualquier conjunto de comparaciones pareadas. Por lo tanto, el siguiente paso consiste en determinar el índice de consistencia CI , el cual se describe como

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} . \quad (3.19)$$

No obstante, estudios numéricos han mostrado que el valor esperado CI de una matriz aleatoria de tamaño $n + 1$ es, en promedio, mayor que el valor esperado de CI de una matriz aleatoria de orden n . En consecuencia, el índice de consistencia CI no es suficiente para la comparación de matrices de diferentes órdenes, por lo que necesita ser reescalado por medio de la razón de consistencia IR

$$IR = \frac{CI}{RI} , \quad (3.20)$$

donde *RI* refiere al índice aleatorio, el cual es una estimación del *CI* promedio obtenido de un conjunto lo suficientemente grande de matrices aleatorias de tamaño *n*. Los valores estimados de *RI* se muestran en la tabla 3.2.

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>RI</i>	0	0	0.5247	0.8816	1.1086	1.2479	1.3417	1.4057	1.4499	1.4854

Tabla 3.2 Valores de RI [84].

De acuerdo con Saaty [80] en la práctica se debe seleccionar las matrices con valores $IR \leq 0.1$ y rechazar aquellas con valores mayores de 0.1. De manera que si los valores exceden el 10% son señal de juicios inconsistentes y es probable que en estos casos se deba reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas.

3.5.1 Modelo para la determinación de un SMR en electrodomésticos

Partiendo del hecho que las características distintivas de un sistema reconfigurable determinan la facilidad y costo de reconfiguración, es evidente que los criterios fundamentales de costo, tiempo y esfuerzo sean considerados como factores inherentes en la transición de un sistema de manufactura reconfigurable. El siguiente modelo está basado en un análisis de estudio para la industria de los electrodomésticos, en donde la empresa Mabe cuenta con una clasificación de familias para sus diferentes líneas de productos (figura 3.8), éstas se dividen principalmente en volumen y gama –cantidad de características o funciones–.

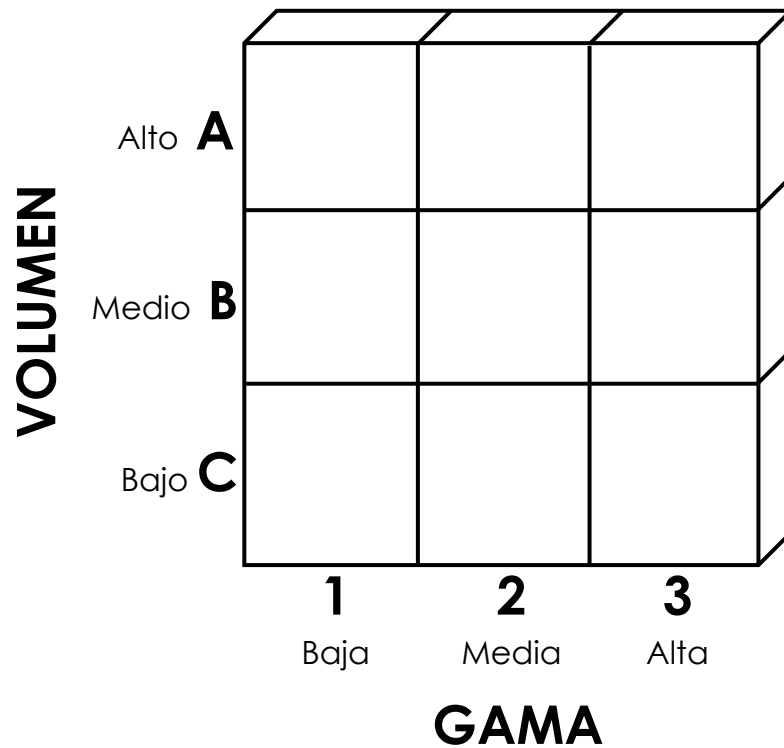


Fig. 3.8 Clasificación de familias de productos en Mabe.

Por medio de la metodología PAJ se determinará a nivel del proceso de manufactura cuáles familias de productos son la opción más indicadas para proponerse al concepto de un sistema de manufactura reconfigurable. Partiendo de la estructura jerárquica del modelo (figura 3.9), el objetivo de este estudio estará en función de los criterios de costo, tiempo y esfuerzo anteriormente mencionados. Asimismo, las alternativas propuestas serán aquellas obtenidas por la clasificación de familia de productos de la empresa como se muestra en la figura 3.8.

Cabe mencionar que, al someter cada alternativa con los criterios correspondientes, siempre se buscará tener el menor costo, tiempo y esfuerzo ya que un sistema reconfigurable es capaz de soportar cambios en su estructura de forma rápida, factible y con el menor costo. Asimismo, estas evaluaciones solamente estarán enfocadas en el proceso de manufactura, por lo que los factores externos como son todo lo concerniente al mercado y margen de utilidad quedan excluidos dentro de este estudio.

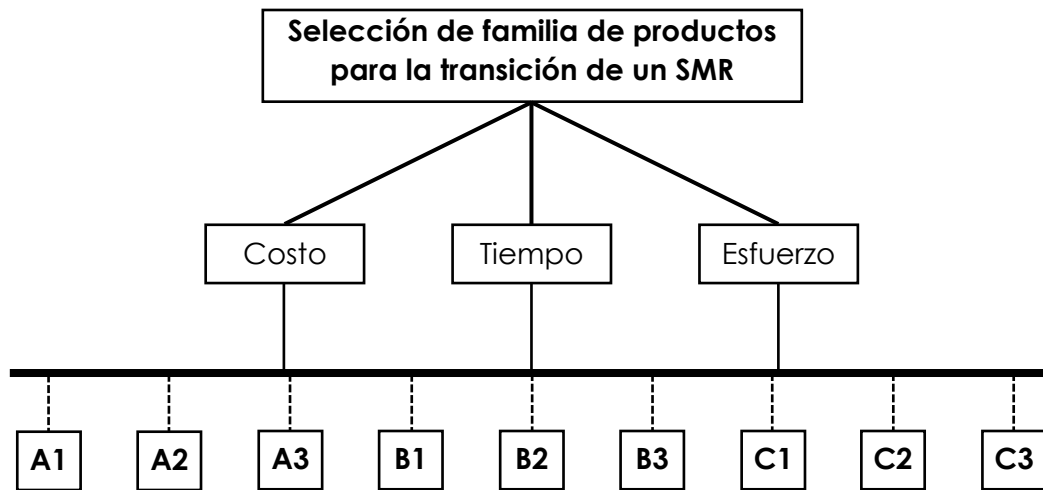


Fig. 3.9 Estructura jerárquica para la selección de familia de productos.

Con el planteamiento de la metodología en el que se abarcó desde la agrupación y selección de familias de productos hasta la evaluación de algunas características clave de los sistemas reconfigurables, se podrá llevar a cabo el análisis correspondiente para la adaptación de un sistema reconfigurable en la industria de los electrodomésticos. A través de este estudio apoyado por la empresa Mabe y sus tres plantas de producción en México, se analizará en el siguiente capítulo los diferentes puntos de la metodología y sus respectivos resultados.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se presentó la metodología que abarca los aspectos significativos para considerar un sistema de manufactura reconfigurable en la industria de los electrodomésticos. Esta comprende en primer plano el agrupamiento de piezas/productos por medio de la similitud entre sus componentes. Seguido por las métricas de modularidad y convertibilidad, las cuales son características fundamentales que determinan un sistema de manufactura reconfigurable. Finalmente, la metodología concluye con la selección de la familia de productos mediante la metodología PAJ. El resultado del modelo es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para una de las alternativas de decisión.

En el presente capítulo se presenta un análisis aplicado en la industria de los electrodomésticos con la metodología propuesta. Siendo como el primer punto el análisis de similitud que existe entre los productos fabricados en una línea de producción. Posteriormente, se determinará para ese mismo sistema el índice de modularidad y convertibilidad. Finalmente se identificará y clasificará las familias de productos en Mabe para dar paso a la metodología PAJ y así obtener la decisión sobre aquellas familias más adecuadas ante la propuesta de un sistema reconfigurable.

4.1.1 Caso de estudio en la industria de los electrodomésticos

Las principales plantas ensambladoras de Mabe en México corresponden a tres tipos de línea de productos, las cuales se clasifican en refrigeración –refrigeradores–, cocción –estufas, parrillas, hornos– y cuidado de la ropa –lavadoras, secadoras, centros de lavado–. Sin embargo, dentro del estudio presentado, se tomará como caso principal una línea de producción para refrigeradores, debió a que últimamente se han propuesto diversos cambios para incrementar el volumen de producción, así como la introducción de nuevos productos. No obstante, el último apartado referente al análisis de selección de familia de productos, se tomará en cuenta todas las familias de modelos existentes correspondientes por cada línea de producto.

β	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
γ	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

β	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
δ	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

γ	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
δ	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

$\beta\gamma$			$\beta\delta$			$\gamma\delta$		
a	b	c	a	b	c	a	b	c
34	1	1	28	7	3	28	7	3

A partir de la fórmula de coeficiente de similitud se elabora la siguiente matriz.

	β	γ	δ
β	0	0.9444	0.7368
γ		0	0.7368
δ			0

Se puede apreciar que la comparación entre $\beta\gamma$ muestran el valor más alto de similitud, lo cual constituye el primer grupo formado. Posteriormente se realiza la reestructuración de la matriz para calcular el siguiente grupo por medio de la expresión 3.2.

	$\beta\gamma$	δ
$\beta\gamma$	0	0.7368
δ		0

Con este último paso, se obtuvieron los grupos formados, así como su correspondiente coeficiente similitud, los cuales se representan por medio del dendograma mostrado en la siguiente figura.

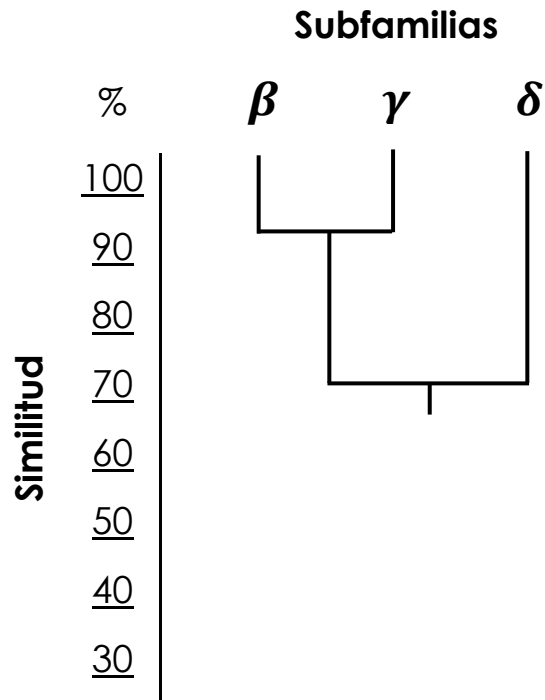


Fig. 4.1 Dendrograma correspondiente a la similitud entre las subfamilias β, γ, δ .

Con base en este resultado se puede apreciar que las subfamilias $\beta\gamma$ obtienen un coeficiente de similitud muy cercano al 100%. Sin embargo, este se reduce hasta un 74% cuando se considera la subfamilia δ , lo que comprueba que las máquinas y/o equipos que se emplearon para la manufactura de esta subfamilia fueron muy especializados con respecto a las demás subfamilias.

Hasta ahora, el análisis de similitud se empleó antes de que la familia A fuera reubicada y sufriera algunos cambios significativos, tales como la expansión a dos líneas de producción con equipos adicionales y la inclusión de una nueva subfamilia α . Para continuar con este estudio, se analizó el mismo caso con los cambios correspondientes. En el siguiente apartado se muestra la matriz de incidencia de todas las máquinas y/o equipos que se emplean actualmente para cada subfamilia.

De acuerdo a la matriz generada se puede apreciar una gran variedad de los procesos empleados por cada producto en comparación con el estudio previo. Continuando con el procedimiento, de igual manera se cuantificaron los valores de a, b y c como se muestra a continuación.

$\alpha\beta$			$\alpha\gamma$			$\alpha\delta$			$\beta\gamma$			$\beta\delta$			$\gamma\delta$		
A	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
26	3	20	27	2	22	23	6	21	45	1	4	39	7	5	41	8	3

A partir de estos valores y la aplicación de la fórmula de coeficiente de similitud, se obtiene la matriz con los valores finales.

	α	β	γ	δ
α	0	0.5306	0.5294	0.46
β		0	0.9	0.7647
γ			0	0.7884
δ				0

Al igual que el análisis anterior, el primer grupo formado con el coeficiente más alto es para el caso $\beta\gamma$. Posteriormente, se reestructuró la matriz previamente utilizada y se recalculó el valor de similitud.

	$\beta\gamma$	α	δ
$\beta\gamma$	0	0.53	0.7765
α		0	0.46
δ			0

En este punto del procedimiento, se identificó de igual manera el siguiente grupo formado el cual corresponde a $\beta\gamma\delta$. Siendo el último paso, se recalculó la matriz para definir la similitud con respecto al elemento faltante.

	$\beta\gamma\delta$	α
$\beta\gamma\delta$	0	0.5066
α		0

Una vez obtenidos los valores correspondientes se elaboró el dendograma mostrado en la figura 4.2 en donde se puede apreciar la nueva conformación de subfamilias con sus respectivos valores de similitud. Para el caso de las subfamilias $\beta\gamma\delta$ muestran una estructura muy cercana al del análisis original. Sin embargo, con la nueva introducción de la subfamilia α , el valor de similitud disminuye considerablemente con respecto a los demás elementos.

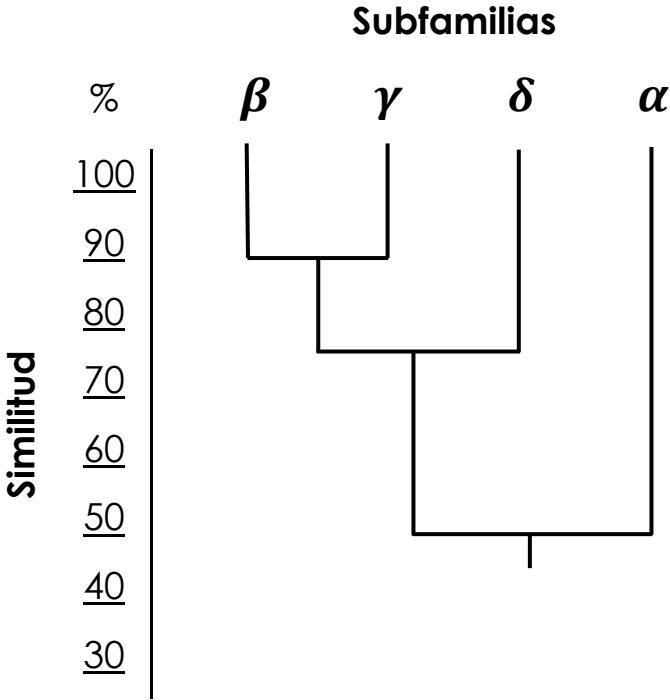


Fig. 4.2 Dendograma correspondiente a la similitud entre las subfamilias $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

Sin duda, el presente análisis demuestra que es indispensable considerar un estudio previo para asignar un nuevo producto a un sistema. A través de la práctica, se ha observado que cualquier cambio que supere el 30% tanto a nivel del sistema o de la máquina su impacto trascenderá en los altos costos generados. Por lo tanto, se puede concluir a partir de este estudio sistemático que la subfamilia α , que a pesar de mantener un volumen de producción considerablemente bajo, la similitud global del sistema se ve comprometida por la influencia de este producto en particular, el cual requiere de procesos y equipos más especializados en el sistema de manufactura.

4.3 MODULARIDAD

A través de una arquitectura modular se pueden obtener una diversidad de beneficios, principalmente en ahorro de costos debido a la similitud de diseño independiente de módulos, los cuales trabajan en conjunto a pesar de ser estructuralmente independientes uno del otro. Con el análisis correspondiente a la obtención del índice de modularidad se podrá determinar de manera cuantitativa el grado de acoplamiento correspondiente a los procesos de manufactura para una familia de refrigeradores. Esta familia cuenta con dos líneas de producción y la asignación de 4 subfamilias de productos. Al igual que el estudio para la determinación del coeficiente de similitud, la clasificación de las máquinas y/o equipos están determinadas por las UDN's de fabricación, puertas y ensamble.

Cabe mencionar que el análisis de modularidad para este caso particular, solo está en función del proceso de manufactura, por lo que la arquitectura modular a nivel del producto –piezas y accesorios– quedó excluido de este estudio. No obstante, se propone realizar este análisis para un trabajo subsecuente. En la figura 4.3 se muestra la representación esquemática del sistema donde cada recuadro corresponde al módulo de un proceso distinto incluyendo elementos con la misma función. Asimismo, el tipo de conexión entre los módulos está en función del proceso consecutivo para la fabricación/ensamble del producto. Por lo tanto, la ubicación de ciertos elementos (conexión física) que se muestran en el esquema no necesariamente corresponden con la distribución real del sistema.

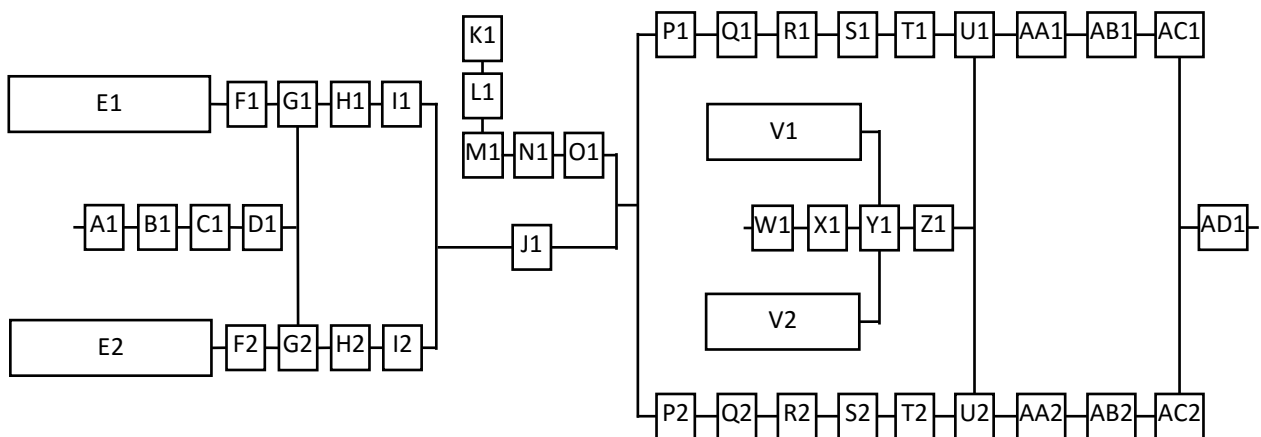


Fig. 4.3 Distribución esquemática del sistema de manufactura.

Después de la identificación de cada etapa del proceso, desde la recepción de la materia prima hasta el producto terminado, se elaboró la matriz de estructura de diseño DSM (figura 4.4), la cual indica de manera binaria las conexiones de los elementos para todo el sistema. Posteriormente, en función de la matriz de estructura de diseño se determinó la descomposición de los valores singulares (SVD), estos se muestran de manera normalizada en la siguiente figura, así como su tendencia exponencial –línea punteada–.

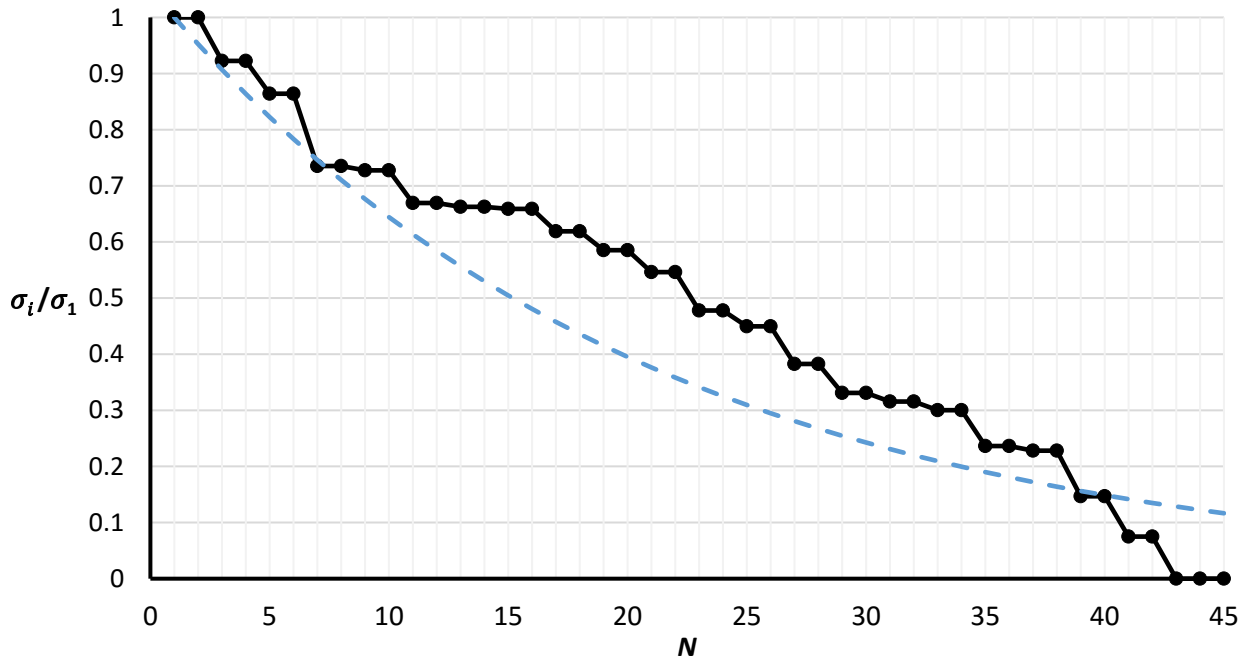


Fig. 4.5 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 del sistema de manufactura.

A partir de la distribución de los valores singulares normalizados se puede notar una disminución monótona decreciente, lo cual indica una arquitectura modular de acuerdo al estudio de Holtta [76]. Mediante la dependencia exponencial definido por $\alpha = 20.46$ se determinó el índice de modularidad de valores singulares, esto es $SMI = 0.4548$. No obstante, esto representa de manera general las condiciones en las que se encuentra el sistema. Por tal motivo, en los siguientes apartados se propone obtener el índice de modularidad correspondiente a las UDNs de fabricación, puertas y ensamble. Con esta nueva evaluación se podrá identificar de manera específica el grado de modularidad que representa cada área con sus elementos correspondientes.

En la figura 4.6 se muestran tanto la distribución esquemática como la matriz de estructura de diseño para la UDN de fabricación. Ésta se conforma por la fabricación de gabinetes, termoformado, troquelado y espumado. Se puede observar por ejemplo que, las primeras etapas del proceso (A, B, C, D) se disponen de manera paralela debido a los diferentes modelos que involucra el sistema.

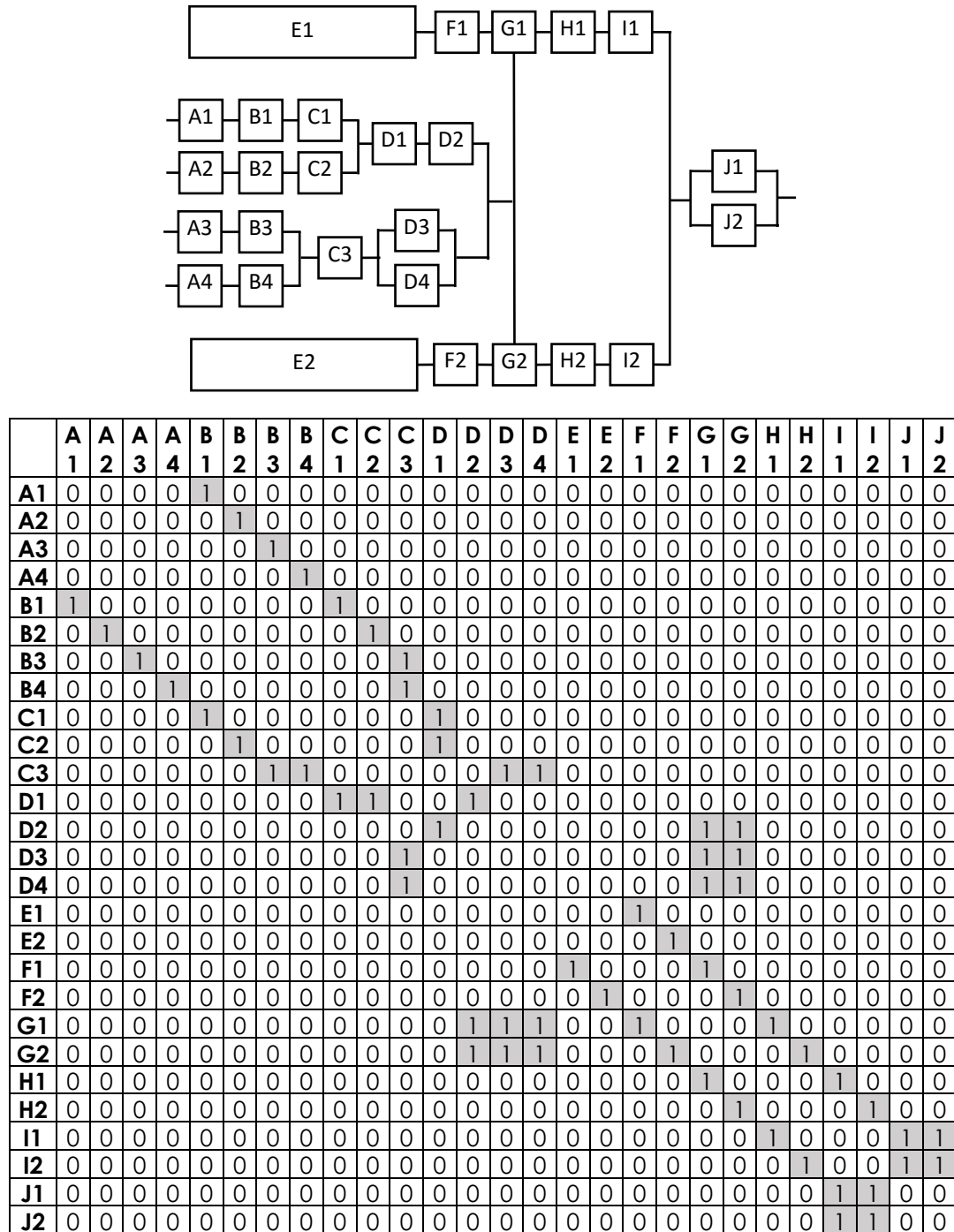


Fig. 4.6 Distribución esquemática y DSM de fabricación.

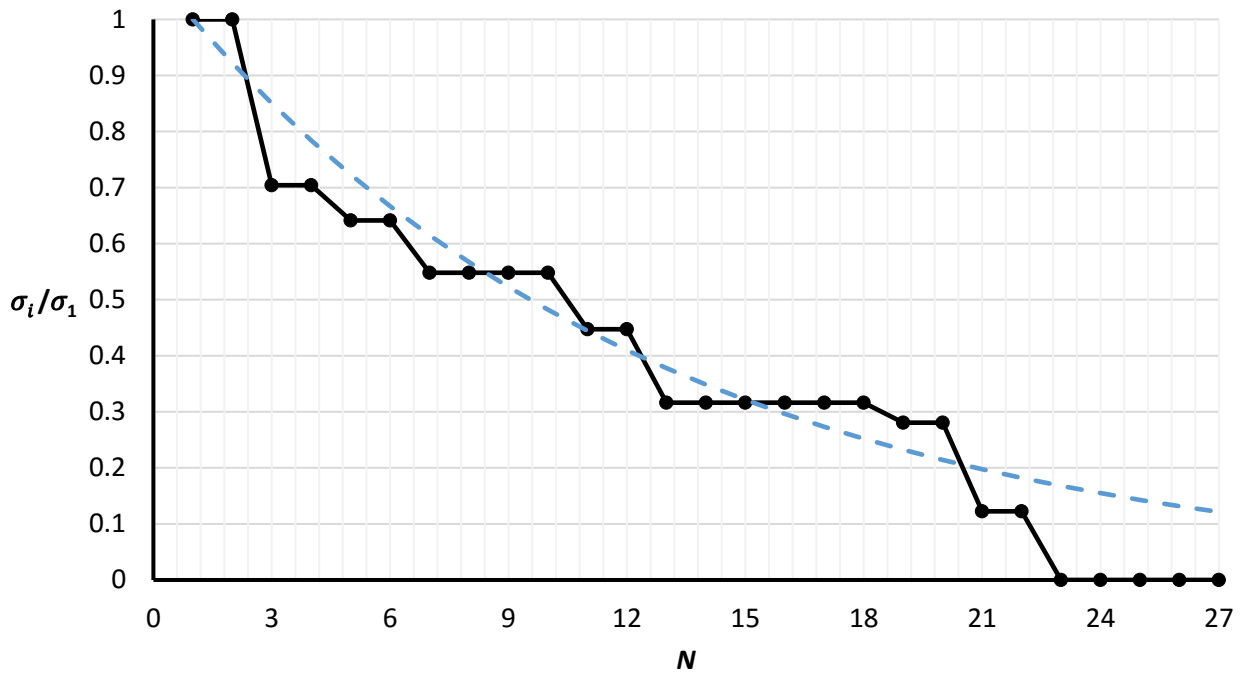


Fig. 4.7 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 de fabricación.

Al igual que el análisis generado para el sistema total (figura 4.5), los valores singulares mantienen una distribución monótona decreciente. Esto se puede reafirmar mediante la dependencia exponencial ($\alpha = 12.33$) representado por la línea punteada de la figura 4.7. Finalmente, el índice de modularidad obtenido es de $SMI=0.4567$, el cual se puede apreciar una notable aproximación numérica al del estudio total obtenido previamente.

Continuando con la siguiente UDN, los procesos correspondientes al área de puertas representan una gran similitud con respecto al área de gabinetes. Sin embargo, como puede notarse en la distribución esquemática, la diferencia radica en la escala y equipos involucrados del proceso. Asimismo, se puede notar una distribución drástica de los valores singulares mostrados en la figura 4.9, lo cual indica ser una característica de la arquitectura tipo bus [76].

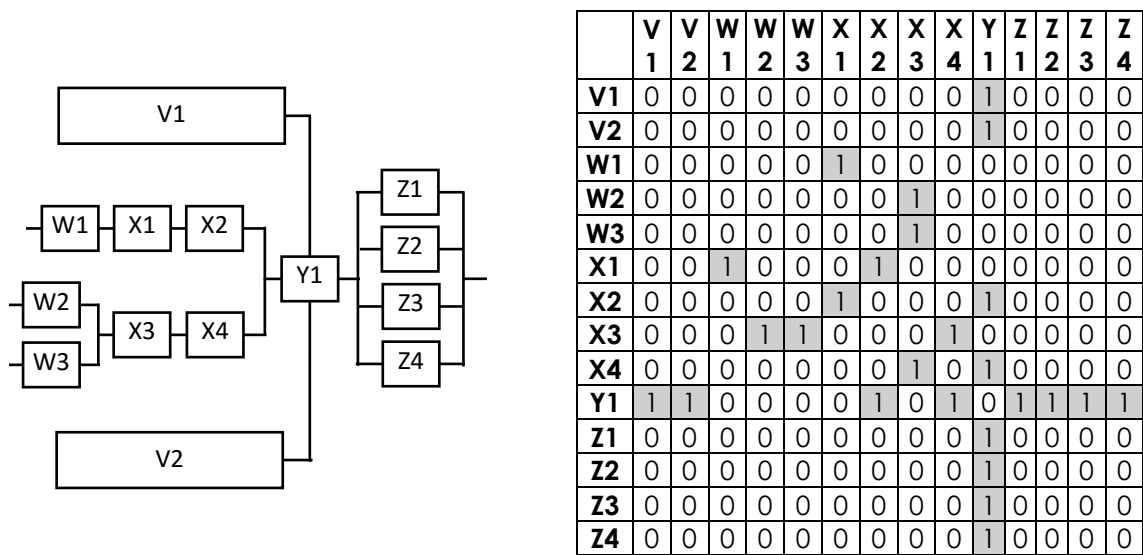


Fig. 4.8 Distribución esquemática y DSM de puertas.

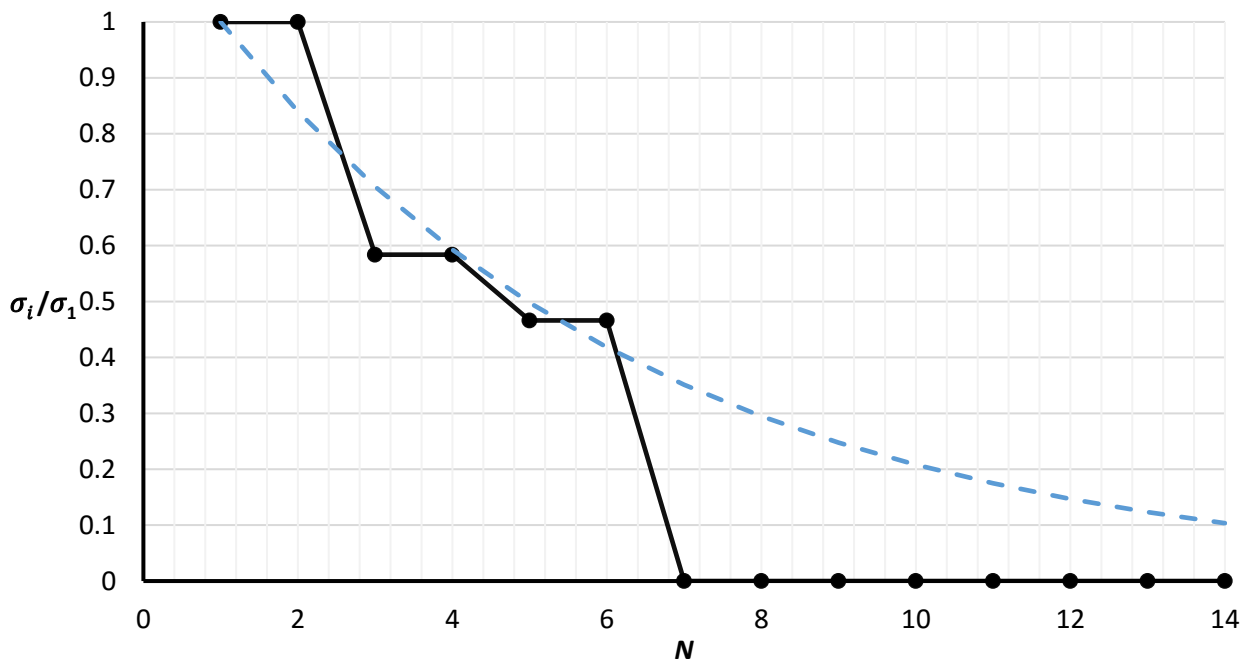
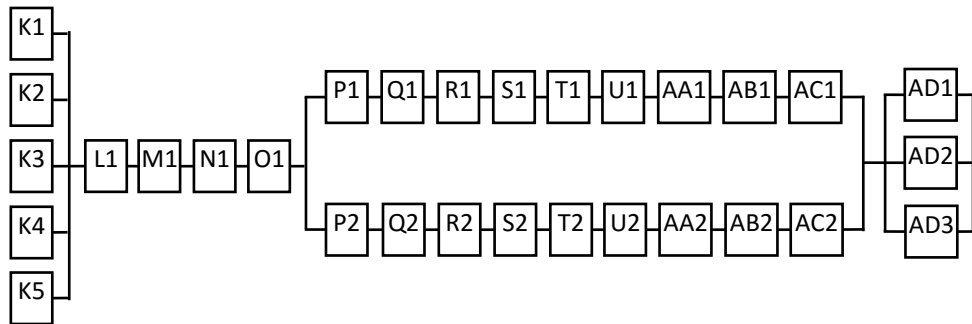


Fig. 4.9 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 de puertas.

A partir de la dependencia exponencial ($\alpha = 5.73$) de los valores singulares, el índice de modularidad resulta con un valor de 0.4093, lo cual sin duda confirma la estrecha relación del decaimiento numérico de los valores singulares.

Finalmente, la UDN de ensamble compuesto por las estaciones de evaporadores, refrigerante, accesorios, pruebas de tensión/fugas, así como empaque final se muestran en la siguiente figura.



	K1	K2	K3	K4	K5	L1	M1	N1	O1	P1	P2	Q1	Q2	R1	R2	S1	S2	T1	T2	U1	U2	AA1	AA2	AB1	AB2	AC1	AC2	AD1	AD2	AD3	
K1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
AA1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
AA2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
AB1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
AB2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
AC1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
AC2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0
AD1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
AD2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
AD3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

Fig. 4.10 Distribución esquemática y DSM de ensamble.

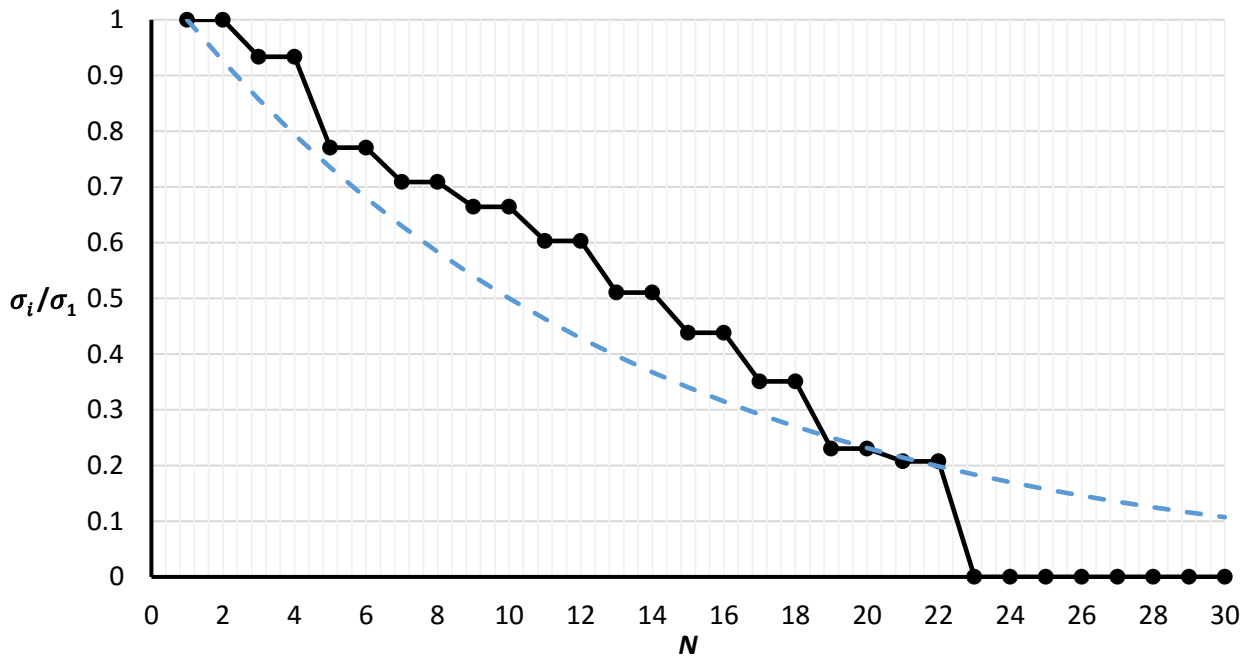


Fig. 4.11 Valores singulares normalizados σ_i/σ_1 de ensamble.

Con base en la estructura de diseño y sus valores singulares, la UDN de ensamble le corresponde un índice de modularidad de 0.4327. Considerando los resultados previos, este dato indica un intermedio numérico entre las UDNs de fabricación y puertas. Así mismo, se confirma un decaimiento exponencial ($\alpha = 12.98$) por medio de los valores singulares mostrados en la figura 4.11. Por lo tanto, se puede concluir a partir de éste análisis que el grado de modularidad se sitúa con un poco menos del 50% considerando los estudios mostrados anteriormente. Teniendo en cuenta esto, la división de los procesos por cada UDN ofrece una mejor perspectiva del comportamiento del sistema. Si bien, los procesos no muestran un nivel alto de modularidad no significa que sea un factor influyente para la eficiencia operativa, ya que de acuerdo al estudio de Holtta et al., los sistemas totalmente modulares probablemente puedan ser más grandes –en términos de espacio– y lentos.

4.4 CONVERTIBILIDAD

Para tener un mayor detalle sobre la línea de refrigeradores que se consideró en el apartado de modularidad, así como también dar continuidad en el mismo caso, se obtendrá en este apartado el nivel de convertibilidad para este mismo sistema. Con el presente análisis se podrá validar de manera sistemática los tres niveles de convertibilidad para determinar cuantitativamente la capacidad que tiene el sistema para cambios posteriores. En la figura 4.12 se muestran todos los elementos que conforman el sistema incluyendo estaciones de ensamble y máquinas.

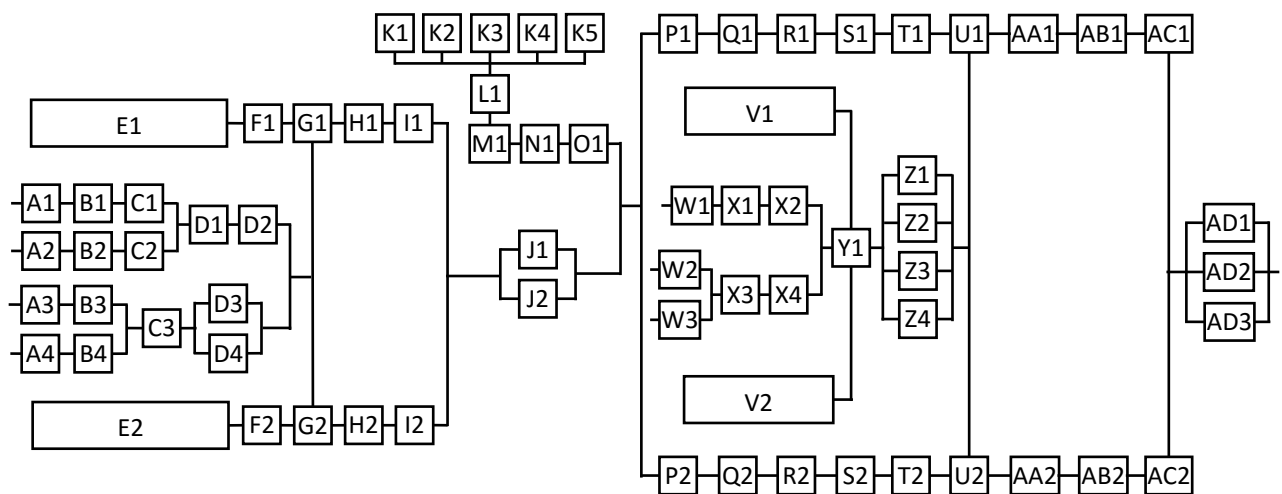


Fig. 4.12 Distribución esquemática de la línea de producción de refrigeradores.

Con base en la distribución general de los elementos, se obtuvo el incremento mínimo de conversión $I = 0.4225$, el número de conexiones de enrutamiento $R = 102$ y el número mínimo de máquinas replicadas $X = 2.3666$. Por lo tanto, la convertibilidad de configuración obtuvo un valor $C'_c = 571$. Sin embargo, para indicar el valor en una escala de 1-10, se empleó la ecuación 3.9 que normaliza C'_c . De este modo la convertibilidad de configuración resulta como

$$C_c = 1 + \frac{\log\left(\frac{571}{72}\right)}{\log\left(\frac{715822}{72}\right) \times \frac{1}{9}} = 3.0252 .$$

Posteriormente y para determinar la convertibilidad tanto de la máquina C_M como del manejo de materiales C_H se evaluó cada elemento en función de los 5 aspectos presentados en la metodología. Esto se realizó con ayuda del diagrama de apoyo de la figura 3.6, el cual genera de forma estimada los valores de C'_M y C'_H y cuyos datos se muestran a continuación. Cabe mencionar que el dato final se obtiene de acuerdo a la posición final de las respuestas consecutivas de cada evaluación.

C'_M						
MÁQUINA	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	TOTAL
A1	N	N	S	N	N	2.1612
A2	N	N	S	N	N	2.1612
A3	N	N	S	N	N	2.1612
A4	N	N	S	N	N	2.1612
B1	N	N	N	N	N	1
B2	N	N	N	N	N	1
B3	N	N	N	N	N	1
B4	N	N	N	N	N	1
C1	N	N	S	N	N	2.1612
C2	N	N	S	N	N	2.1612
C3	N	N	S	N	N	2.1612
D1	N	N	S	N	N	2.1612
D2	N	N	S	N	N	2.1612
D3	N	N	S	N	N	2.1612
D4	N	N	S	N	N	2.1612
E1	N	S	S	S	S	5.3548
E2	N	S	S	S	S	5.3548
I1	N	S	S	S	N	5.0645
I2	N	S	S	S	N	5.0645
J2	N	N	N	N	N	1
K1	N	N	S	S	N	2.7419
K2	N	N	S	S	N	2.7419

C'_M						
MÁQUINA	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	TOTAL
K3	N	N	S	S	N	2.7419
K4	N	N	S	S	N	2.7419
K5	N	N	S	S	N	2.7419
L1	N	N	N	N	N	1
M1	N	N	N	N	N	1
N1	N	N	N	N	N	1
V1	N	S	S	S	S	5.3548
V2	N	S	S	S	S	5.3548
W1	N	N	S	S	N	2.7419
W2	N	N	S	S	N	2.7419
W3	N	N	S	S	N	2.7419
X1	N	N	N	N	N	1
X2	N	N	N	N	N	1
X3	N	N	N	N	N	1
X4	N	N	N	N	N	1
Z1	N	N	S	S	N	2.7419
Z2	N	N	S	S	N	2.7419
Z3	N	N	S	S	N	2.7419
Z4	N	N	S	S	N	2.7419
AD1	N	N	S	N	N	2.1612
AD2	N	N	S	N	N	2.1612
AD3	N	N	S	N	N	2.1612

Tabla 4.1 Convertibilidad C'_M para cada una de las N maquinas individuales.

C'_H						
MÁQUINA	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	TOTAL
A1	N	N	N	S	N	1.5806
A2	N	N	N	S	N	1.5806
A3	N	N	N	S	N	1.5806
A4	N	N	N	S	N	1.5806
B1	N	N	N	S	N	1.5806
B2	N	N	N	S	N	1.5806
B3	N	S	N	S	N	3.3225
B4	N	S	N	S	N	3.3225
C1	N	N	N	S	N	1.5806
C2	N	N	N	S	N	1.5806
C3	N	S	N	S	N	3.3225
D1	N	N	N	S	S	1.8709
D2	N	S	N	S	N	3.3225
D3	N	S	N	S	N	3.3225
D4	N	S	N	S	N	3.3225
E1	N	N	N	S	S	1.8709
E2	N	N	N	S	S	1.8709
I1	N	S	S	S	S	5.3548
I2	N	S	S	S	S	5.3548
J2	N	S	N	S	N	3.3225
K1	N	S	N	S	S	4.1935
K2	N	S	N	S	S	4.1935

C'_H						
MÁQUINA	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	TOTAL
K3	N	S	N	S	S	4.1935
K4	N	S	N	S	S	4.1935
K5	N	S	N	S	S	4.1935
L1	N	N	N	S	N	1.5806
M1	N	N	N	S	N	1.5806
N1	N	N	N	S	N	1.5806
V1	N	S	N	S	N	3.3225
V2	N	S	N	S	N	3.3225
W1	N	N	N	S	N	1.5806
W2	N	N	N	S	N	1.5806
W3	N	N	N	S	N	1.5806
X1	N	S	N	S	N	3.3225
X2	N	S	N	S	N	3.3225
X3	N	N	N	S	N	1.5806
X4	N	N	N	S	N	1.5806
Z1	N	S	N	S	N	3.3225
Z2	N	S	N	S	N	3.3225
Z3	N	S	N	S	N	3.3225
Z4	N	S	N	S	N	3.3225
AD1	N	S	N	S	N	3.3225
AD2	N	S	N	S	N	3.3225
AD3	N	S	N	S	N	3.3225

Tabla 4.2 Convertibilidad C'_H que conecta cada una de las N maquinas individuales.

De esta manera y con ayuda de las ecuaciones 3.11 y 3.12 se obtuvieron los valores correspondientes de $C_M = 2.4252$ y $C_H = 2.7815$. Tomando en cuenta que el objetivo de un sistema reconfigurable es la capacidad de transformarse y adaptarse fácilmente para futuros productos, el nivel de preferencia para cada contribución se asignó de manera equitativa siendo $w = \frac{1}{3} \forall C_C, C_M, C_H$. Por lo tanto, la convertibilidad del sistema resulta $C_S = 2.7439$.

A partir de este resultado se puede determinar que el sistema posee aproximadamente un nivel de convertibilidad del 27%, lo que provoca en consecuencia una gran complejidad en la manufactura si en un futuro se quisiera introducir nuevos productos a la línea. Asimismo, cabe señalar que la mayor restricción para este caso recae a nivel de la maquina ya que de acuerdo con los datos, la mayoría de los equipos identificados son altamente manuales. Con base en lo anterior, la capacidad de convertibilidad que presenta el sistema se vuelve crítico si no se cuenta con la tecnología adecuada.

4.5 IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FAMILIAS DE PRODUCTOS

Dentro de la gran variedad de productos que ofrece la empresa Mabe, existen familias que se caracterizan por su volumen de producción, así como una variedad de particularidades -gama- que definen el precio total con el que se oferta en el mercado, entre mayor sean estas características o funciones, mayor será su costo. En la figura 4.13 se muestra el volumen de producción anualizado y costo promedio del total de familias identificadas por cada línea de producto, es decir, refrigeración, cocinado y cuidado de la ropa. Cabe mencionar que la información presentada esta validada con las áreas de producción y finanzas, las cuales solicitaron por políticas de la empresa y confidencialidad, fueran excluidos tanto los nombres de las familias como los valores reales de este trabajo. Por lo tanto, a partir de este momento los datos presentados estarán proporcionados en una escala de cero a uno y las familias identificadas como F_n , siendo n el número de familias.

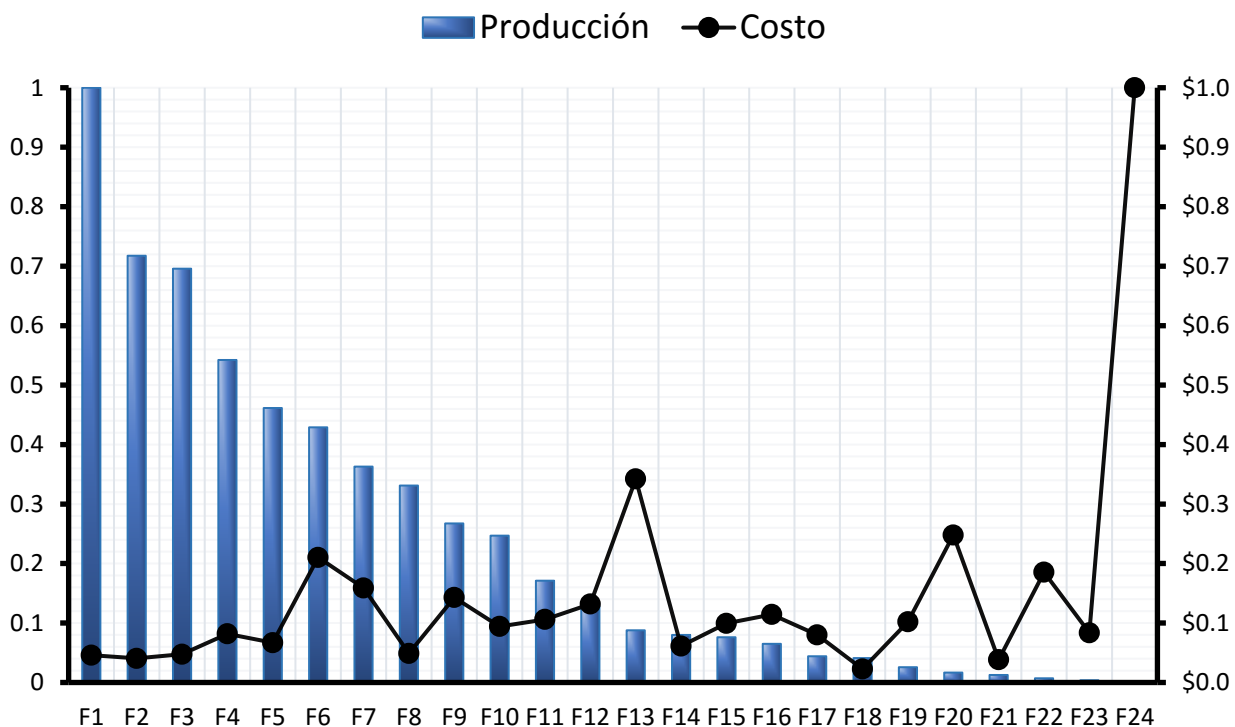


Fig. 4.13 Producción anual y costo promedio en Mabe.

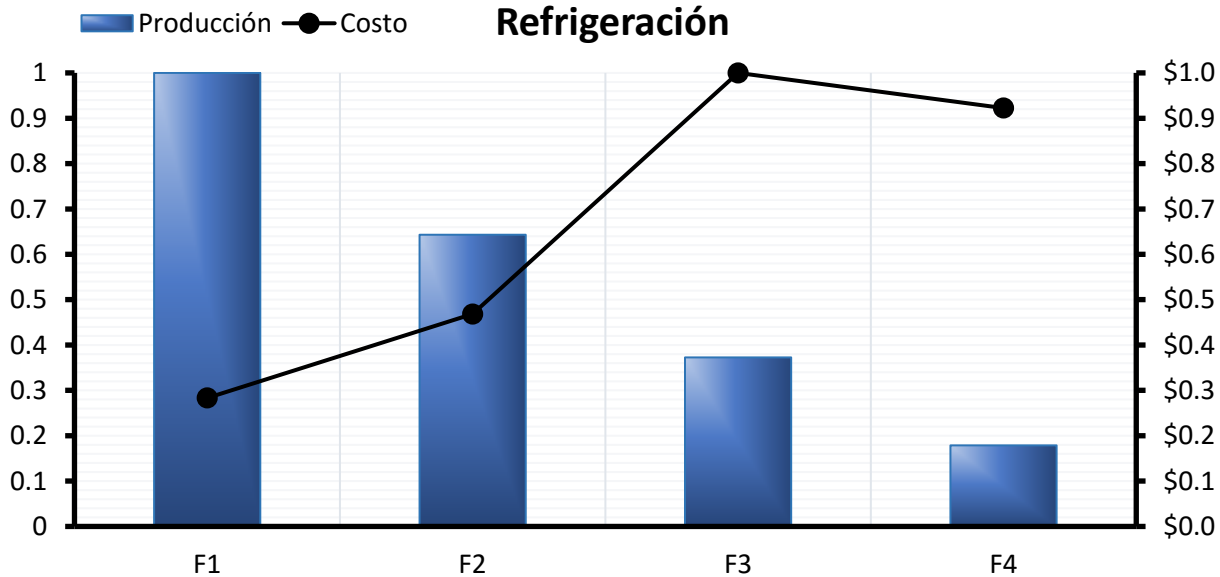
Como se puede apreciar en la gráfica previa, la empresa Mabe junto con sus tres diferentes líneas de productos proyectan una capacidad de adaptación de acuerdo a las necesidades de los consumidores, ofreciendo de este modo una variedad de productos y precios para los distintos mercados. En la siguiente figura se muestra la distribución de las familias identificadas en función al tipo de volumen (A, B, C) y tipo de gama (1, 2, 3).

VOLUMEN	Alto A	F1 F2 F3	F4 F5	
	Medio B	F8	F9 F10 F11 F12	F6 F7
	Bajo C	F18 F21	F14 F15 F16 F17 F19 F23	F13 F20 F22 F24
		1 Baja	2 Media	3 Alta
		GAMA		

Fig. 4.14 Clasificación de volumen de producción y gama.

De acuerdo con la clasificación de la figura 4.14, un gran número considerable de familias corresponden a un perfil de bajo volumen (C) y gama media (2). Por el contrario, se puede apreciar una ausencia de familias orientada a la categoría de volumen y gama alta (A3). No obstante, la clasificación presentada implica que los rangos dados para cada categoría fueran ajustados de manera general sin considerar la producción específica de cada planta ensambladora. Por lo tanto, se propone realizar una clasificación más detallada por cada línea de producto, de manera que cada clasificación sea ajustada de acuerdo a los valores de las familias correspondientes.

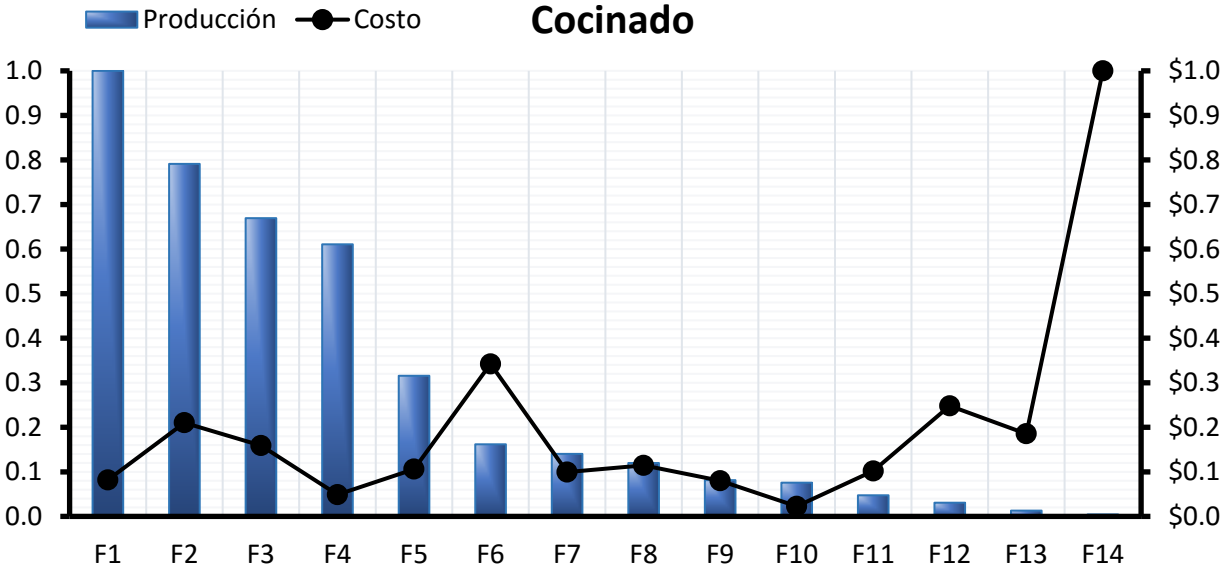
Para la línea de refrigeración se identificaron únicamente cuatro familias, de las cuales a partir de la clasificación de la figura 4.15, la mitad corresponden a un volumen alto y la otra mitad a un perfil de gama alta. No obstante, a pesar de mostrar de manera general la correspondiente clasificación, el perfil de volumen alto (A) y gama alta (3) no se ajusta para esta línea de productos al igual que la clasificación general de la figura 4.14.



VOLUMEN	Alto A	F1	F2	
	Medio B			F3
	Bajo C			F4
		1 Baja	2 Media	3 Alta
		GAMA		

Fig. 4.15 Clasificación de volumen de producción y gama en refrigeración.

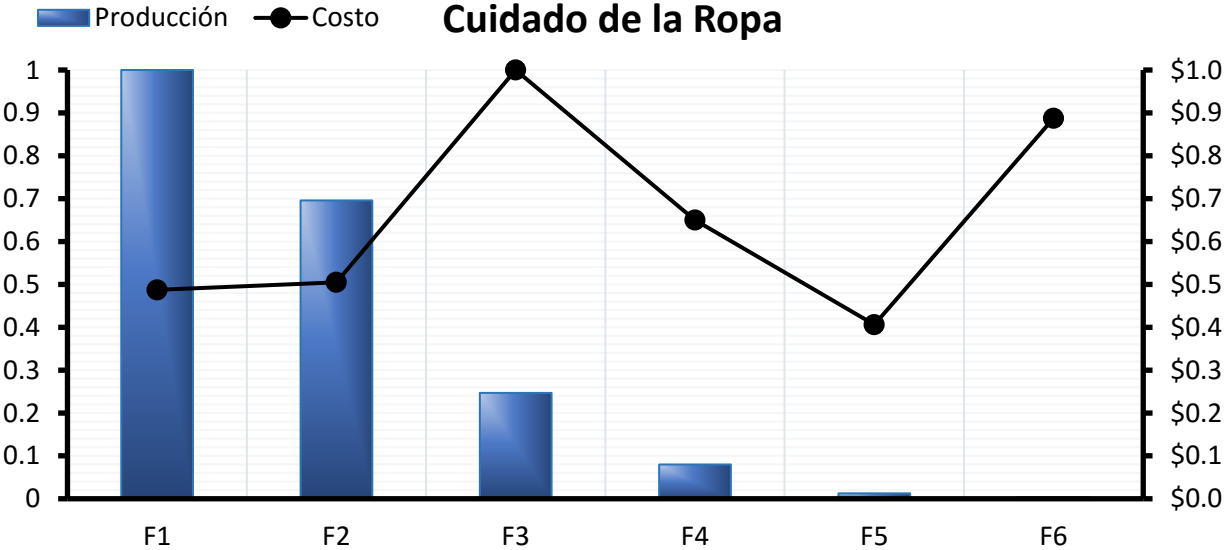
En la línea de cocinado se puede apreciar una diversidad en la cantidad de familias presentadas. Con respecto a la producción, aproximadamente el 43% de las familias corresponden a un volumen bajo y el 57% restante se distribuye equitativamente en volumen alto y medio. Para el tipo de gama, un 50% del total corresponde a un perfil medio, seguido por un 28% de gama baja y el restante en gama alta. De igual manera se puede apreciar que el perfil de volumen y gama alta (A3) son inexistentes para este caso.



VOLUMEN	Alto A	F1 F4	F2 F3	
	Medio B		F5 F7 F8	F6
	Bajo C	F9 F10	F11 F13	F12 F14
		1 Baja	2 Media	3 Alta
		GAMA		

Fig. 4.16 Clasificación de volumen de producción y gama en cocinado.

Finalmente, para el caso de la línea de productos correspondiente al cuidado de la ropa, su clasificación está determinada en su mayoría por volumen bajo con un 50% y un 33.3% en volumen alto. Asimismo, el perfil de gama media predomina con un 66.6% y el restante en gama alta y baja.



VOLUMEN	Alto A		F1 F2	
	Medio B			F3
	Bajo C	F5	F4 F6	
		1 Baja	2 Media	3 Alta
		GAMA		

Fig. 4.17 Clasificación de volumen de producción y gama en cuidado de la ropa.

A partir de la identificación de las familias de productos correspondientes a la empresa Mabe, se determinará en el siguiente apartado la mejor alternativa para considerar un sistema de manufactura reconfigurable mediante la metodología PAJ.

4.5.1 Proceso Analítico Jerárquico

Por medio de Excel se elaboró el modelo de acuerdo a la estructura de la figura 3.9 presentado en el capítulo 3. Posteriormente, se evaluaron los elementos a través de comparaciones pareadas. La información básica se obtuvo de varias visitas a las distintas plantas y de realizar reuniones para discutir el estado actual del sistema de manufactura con un futuro enfoque a los sistemas reconfigurables. Por lo tanto, para lograr un resultado numérico del modelo propuesto, se registró la importancia relativa de cada alternativa con respecto a cada uno de los criterios. Asimismo, se asumió como primera instancia que los criterios de costo, tiempo y esfuerzo tuvieran el mismo nivel de prioridad (33.3%) con respecto al objetivo.

Como puede apreciarse en la figura 4.18, la solución alternativa para este caso se clasifica como $A1 > A2 > A3 > B1 > B2 > C1 > B3 > C2 > C3$ con las prioridades de 0.231, 0.156, 0.128, 0.123, 0.090, 0.085, 0.071, 0.064, 0.050 respectivamente. Esto significa que la familia de productos que corresponde a un perfil de baja gama y alto volumen es más preferible que cualquiera de las otras familias. Sin embargo, por consideraciones prácticas solo se tomarán en cuenta las tres primeras alternativas como principales potenciales para un sistema de manufactura reconfigurable. Siendo de manera resumida las familias correspondientes a un alto volumen (A) de baja (1), media (2) y alta (3) gama son las más preferibles.

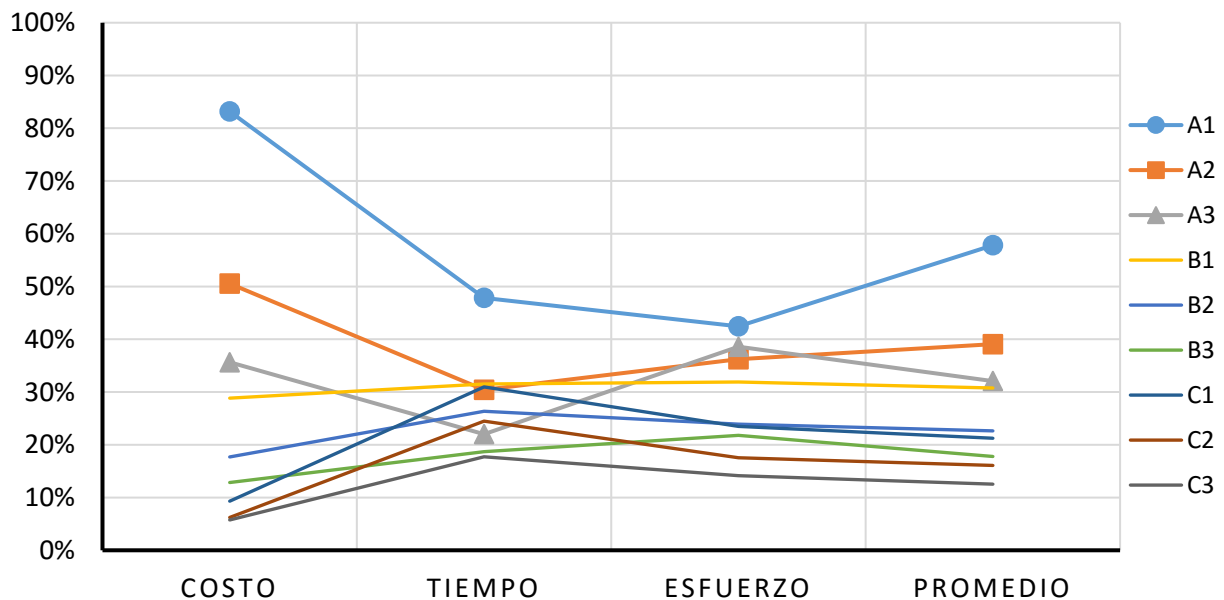


Fig. 4.18 Sensibilidad general con respecto al costo, tiempo y esfuerzo.

En las figuras 4.19, 4.20 y 4.21 se pueden observar los gradientes correspondientes a los criterios de costo, tiempo y esfuerzo con una inconsistencia total del 5.1%, 2.7% y 3.4% respectivamente. Es evidente que las evaluaciones totales por cada criterio indican un orden de preferencia distinto. Sin embargo, con un 33.3% –línea punteada– de prioridad puede percibirse que la intersección de las pendientes no es tan significativa. Por lo tanto, existe la posibilidad de alcanzar una solución alternativa modificando el nivel de prioridad de cada criterio.

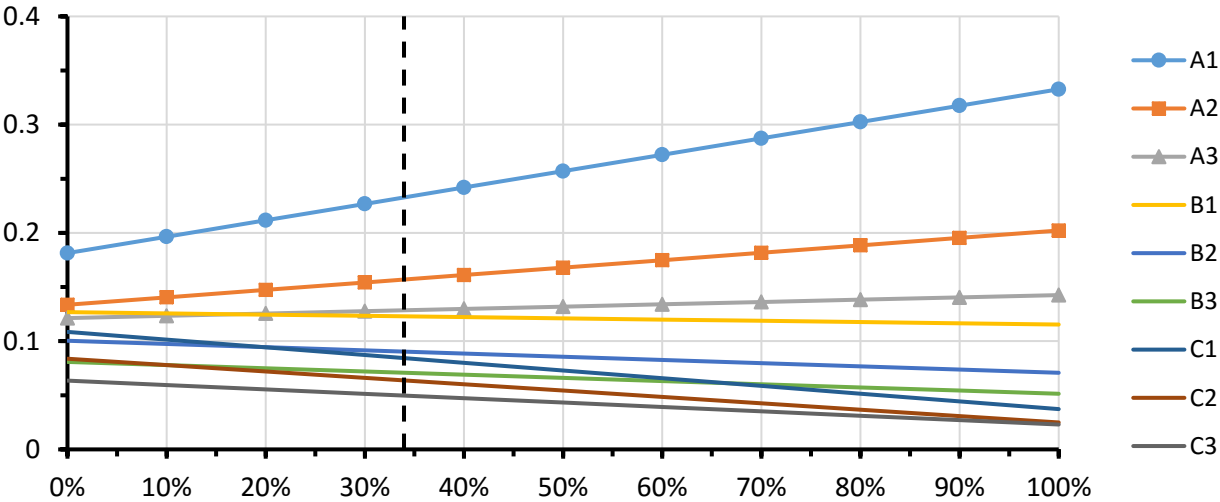


Fig. 4.19 Gradiente de sensibilidad en función al costo.

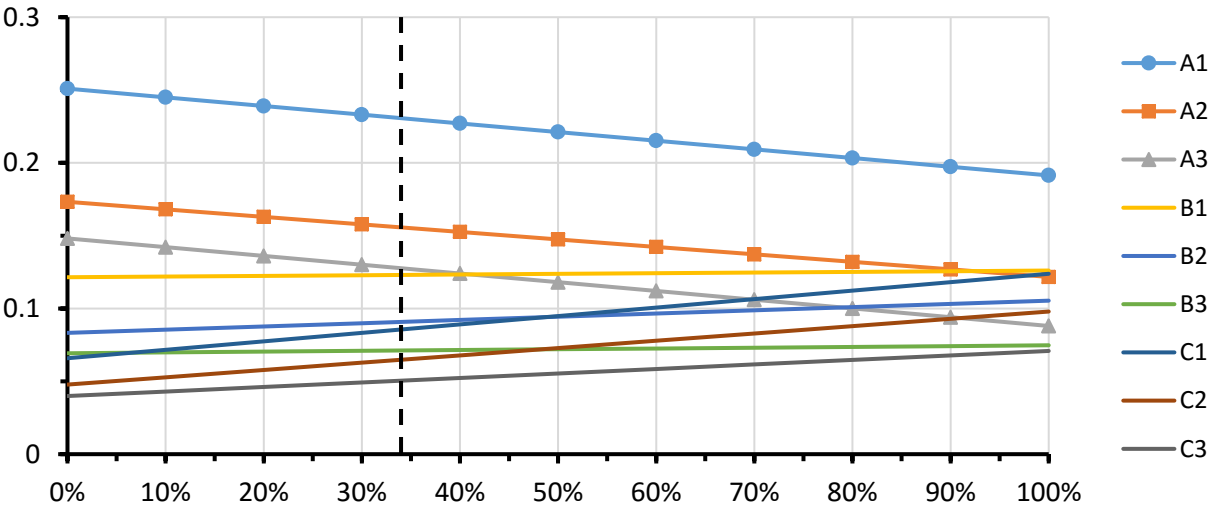


Fig. 4.20 Gradiente de sensibilidad en función al tiempo.

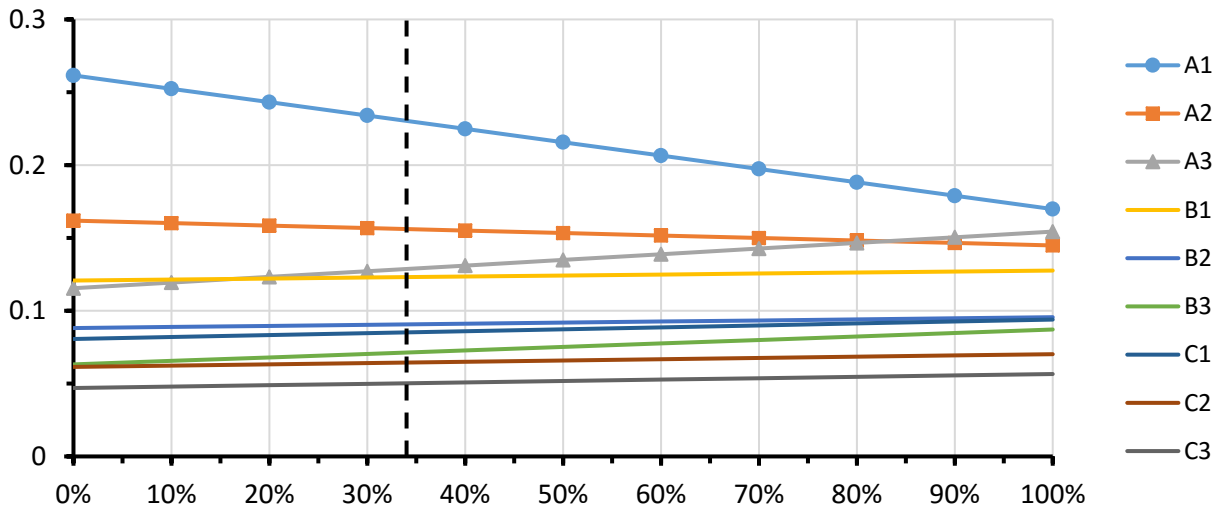


Fig. 4.21 Gradiente de sensibilidad en función al esfuerzo.

4.5.2 Prioridad modificada en costo

Con base en lo anterior, se propone modificar las prioridades con respecto al objetivo para identificar las soluciones posibles. Como primera prueba se mantiene el costo con una prioridad del 50% y una segunda prueba con el 70%. Dado que cada criterio tiene un efecto diferente sobre el total, se realizaron las pruebas con una distribución proporcional entre los demás criterios. De acuerdo con esto, ambas pruebas demuestran que la clasificación de preferencia total mantiene el mismo resultado ($A1 > A2 > A3$) que con una prioridad equitativa del 33.3%, mostrado en la figura 4.18.

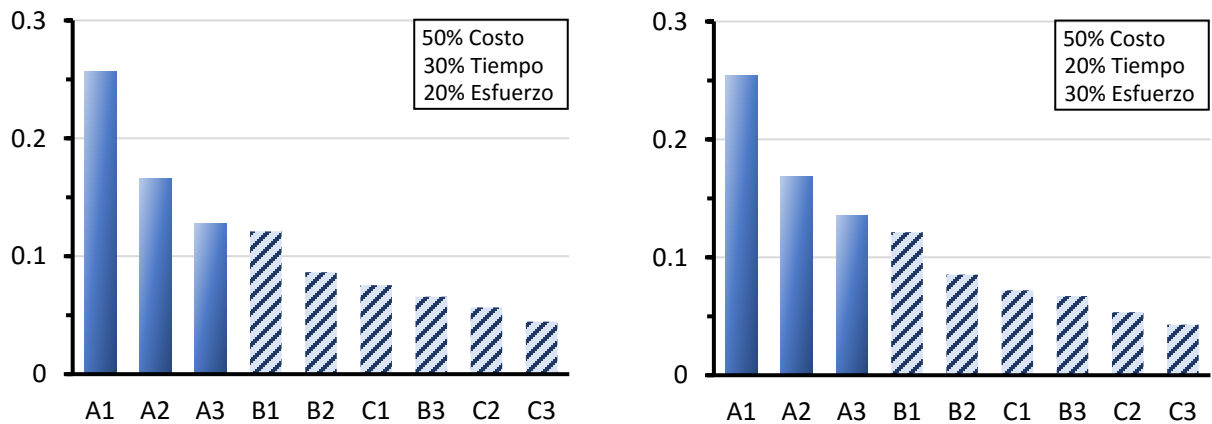


Fig. 4.22 Solución alternativa con 50% de prioridad en costo.

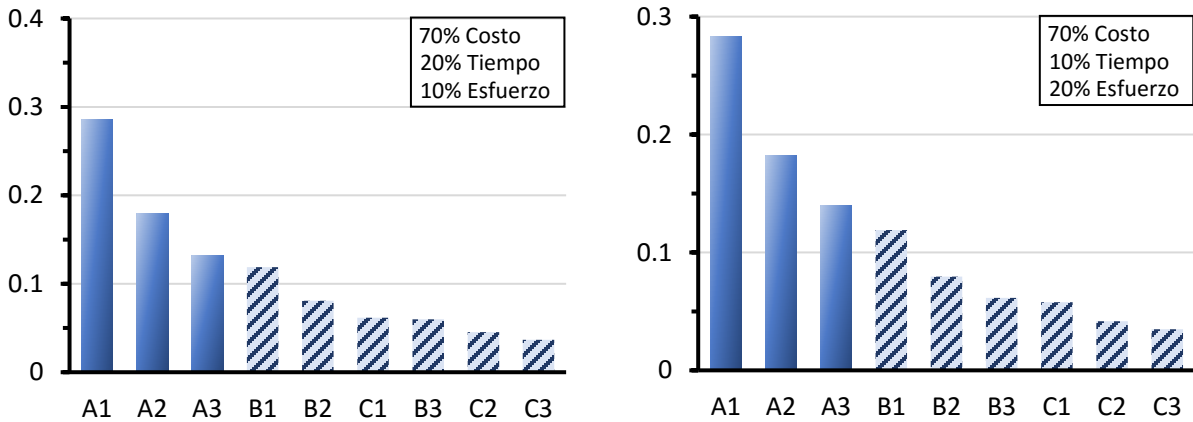


Fig. 4.23 Solución alternativa con 70% de prioridad en costo.

4.5.3 Prioridad modificada en tiempo

Continuando con las siguientes pruebas se modificó la prioridad del tiempo con los mismos valores de 50% y 70%. A partir de la gráfica de sensibilidad de gradiente para el criterio del tiempo (figura 4.20) se puede apreciar cambios en las pendientes –intersecciones– para valores mayores del 50%. Por lo tanto, esto resultó una clasificación distinta de preferencia total. Para todos los casos considerados se puede notar que el orden de preferencia ($A1 > A2 > B1$) sufrió un ligero cambio en la última alternativa. Esto demuestra que, al proporcionar un mayor peso al tiempo, los productos de volumen medio y gama baja (B1) mantienen una preferencia por encima de aquellos productos de alto volumen y gama alta (A3).

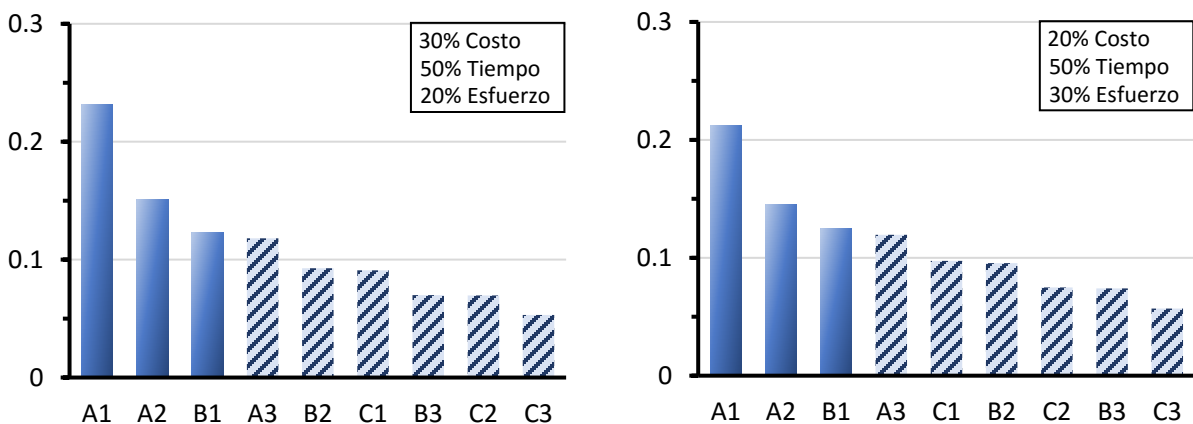


Fig. 4.24 Solución alternativa con 50% de prioridad en tiempo.

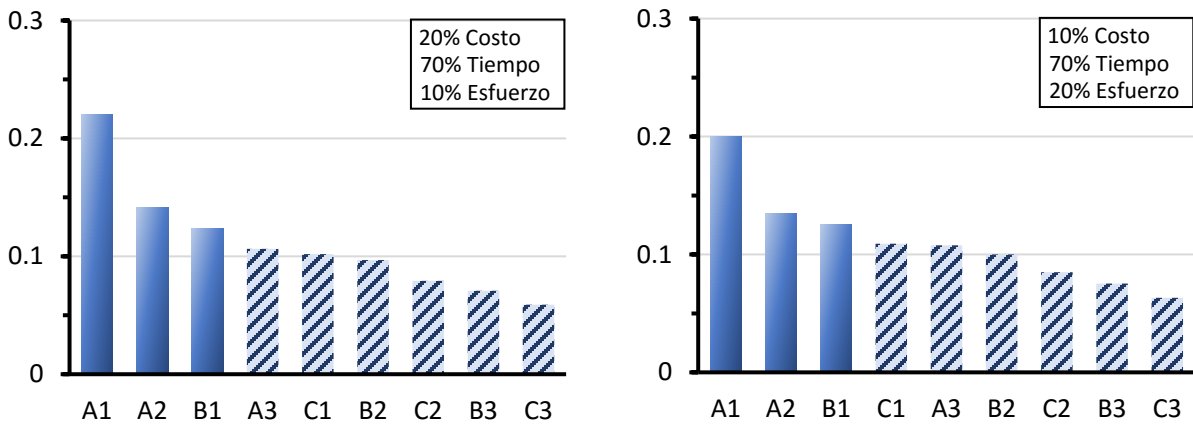


Fig. 4.25 Solución alternativa con 70% de prioridad en tiempo.

4.5.4 Prioridad modificada en esfuerzo

Por último, en las figuras 4.26 y 4.27 se muestran los resultados obtenidos a partir de las modificaciones de prioridad en el criterio de esfuerzo, los cuales indican tener la misma clasificación de preferencia ($A1 > A2 > A3$) al del estudio original (figura 4.18). A pesar que en la gráfica de sensibilidad de esfuerzo (figura 4.21) muestra que las pendientes son positivas para las alternativas de medio (B1, B2, B3) y bajo (C1, C2, C3) volumen, como en el caso del criterio del tiempo (figura 4.20), estas no presentan una pendiente tan pronunciada, lo que provoca que el efecto total no sea tan significativo como para modificar la clasificación de preferencia total.

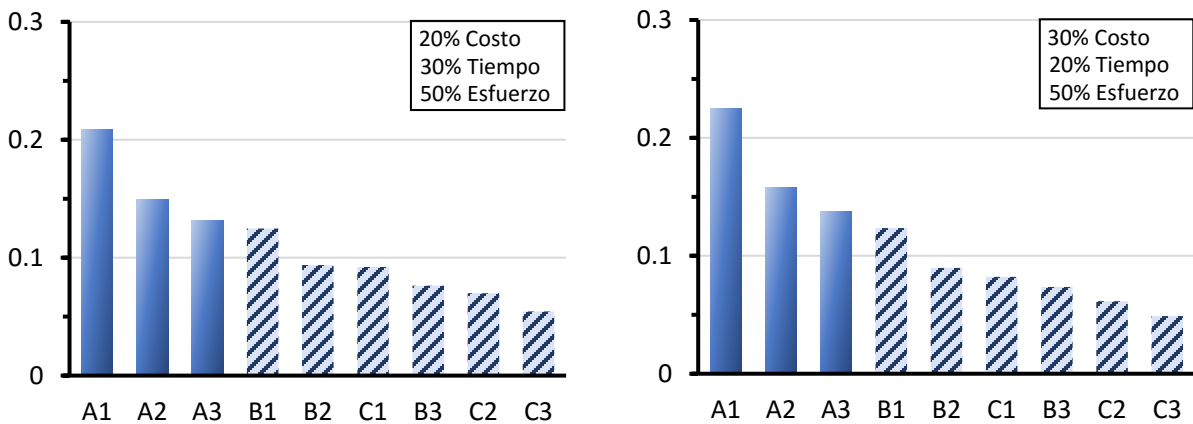


Fig. 4.26 Solución alternativa con 50% de prioridad en esfuerzo.

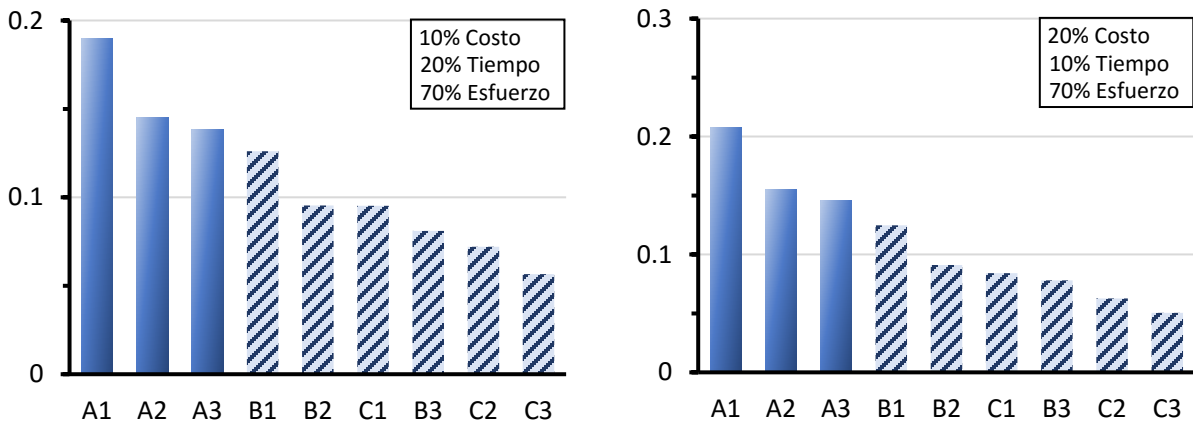


Fig. 4.27 Solución alternativa con 70% de prioridad en esfuerzo.

4.5.5 Identificación y prioridad de las familias de productos en Mabe

Con base en las evaluaciones previamente realizadas y la clasificación de familias por línea de producto en Mabe, se concluye que la categoría de volumen alto y gama baja (A1) es la opción más preferible para todos los casos considerados, seguido por la categoría de volumen alto y gama media (A2). En la figura 4.28 se muestran las familias correspondientes a las líneas de refrigeración (F1) y cocinado (F1, F4) como primera preferencia y para la línea de cuidado de la ropa en la segunda preferencia.

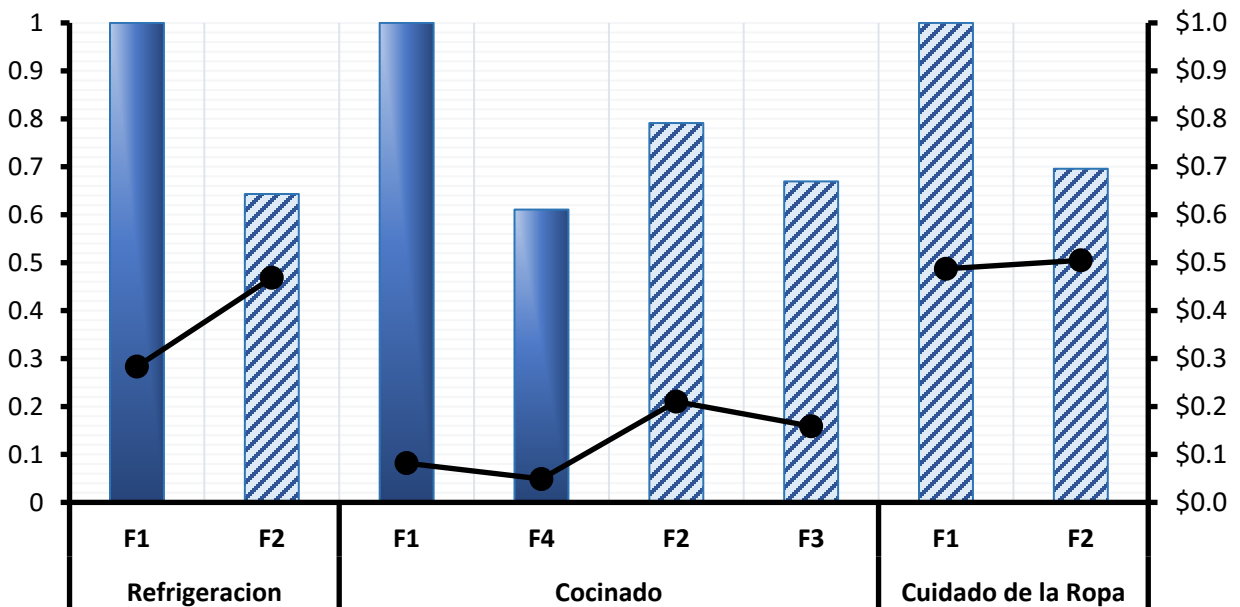


Fig. 4.28 Familias preferentes para cada línea de producto en Mabe.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Un sistema de manufactura reconfigurable está designado para fabricar partes de una familia de productos y luego reconfigurarse para fabricar la siguiente y así sucesivamente. La importancia de seleccionar un conjunto apropiado de familias reside en el hecho de que los costos incurridos en las reconfiguraciones del sistema, manejo de materiales, etc., dependen de ello. En consecuencia, los costos de las piezas o productos fabricados están directamente relacionados con el conjunto de familias seleccionadas. Por lo tanto, la identificación y agrupación de familias de piezas/productos es el primer paso para establecer un sistema de manufactura reconfigurable.

Con base en el análisis de similitud para una familia de productos correspondientes a la línea de refrigeradores, se determinó en primera instancia la relación cuantitativa de los procesos involucrados de tres modelos. En esta primera prueba se confirmó una similitud cercana al 100% en dos de los modelos estudiados. Sin embargo, ésta disminuyó un 22% con el modelo tres, el cual se identificó con una serie de características particulares. Posteriormente, la línea se modificó para aumentar su volumen de producción, así como el anexo de un nuevo modelo, con este nuevo análisis se comprobó que la diferencia de similitud de los tres modelos originales se mejoró en un 36%. Sin embargo, al anexar el nuevo modelo al sistema, esta se vio afectada en un 44%.

De acuerdo con ingeniería de manufactura y producción, el nuevo modelo no representa un gran impacto en la eficiencia global de sistema, ya que debido a su diseño y el tipo de mercado solicitado no corresponde a la clasificación de volumen alto. No obstante, será necesario replantear una posible exclusión de este modelo en el sistema si el volumen de producción se incrementa, a tal grado de representar una afectación en la eficiencia operativa del sistema.

La capacidad de responder a las condiciones futuras del mercado es un elemento fundamental en el que las empresas, como el caso de los electrodomésticos, deban valorar no solo en los productos que se fabrican hoy en día, sino también aquellos que se fabriquen a lo largo de la vida útil del sistema. A través de un análisis de modularidad y convertibilidad del sistema, se podrá proporcionar una referencia cuantitativa de dos de las características distintivas de los sistemas reconfigurables que hacen que ciertas

alternativas de diseño, así como de configuraciones posibles sean mejores que otros en términos de flexibilidad y capacidad de respuesta.

Estos parámetros son particularmente útiles durante las primeras fases de diseño, aunque pueden resultar una herramienta efectiva para comprobar si el sistema actual posee las condiciones necesarias para someterse a una reconfiguración sin la necesidad de recurrir a conjeturas o procedimientos no sistemáticos. En el caso de mabe, tanto el análisis de modularidad como de convertibilidad, se tomó como referencia la línea de refrigeradores presentada en el apartado de análisis de similitud, esto con el fin de dar continuidad al estudio.

A partir de la matriz de estructura de diseño, así como los valores singulares, confirman ser herramientas funcionales para determinar el grado de modularidad de un sistema. Con el análisis de modularidad correspondiente a las UDN's de fabricación, puertas y ensamble se registró un nivel entre el 40% y 45%, lo cual significa que no debe pasar por alto el resultado si se llegara en un futuro considerar la introducción de nuevos modelos, equipos y/o maquinas al sistema ya que la implementación de un sistema reconfigurable podría ser un inconveniente debido a la inflexibilidad del mismo.

Por otra parte, el análisis de convertibilidad confirmó la estrecha relación correspondientes a los diferentes niveles que influyen en la capacidad del sistema para adaptarse a nuevos cambios. Este estudio rebeló que, los parámetros de configuración, máquina y manejo de materiales presentaron un nivel de convertibilidad del 27% lo cual indica que el sistema no cuenta con las condiciones necesarias para responder rápidamente a un cambio. Este resultado se confirma mediante las condiciones actuales del sistema, esto es, maquinas en su mayoría manuales y una poca flexibilidad en el flujo de los materiales.

Dentro de los elementos que se plantearon en este estudio, la metodología del Proceso Analítico Jerárquico se puede considerar como un elemento que contribuye a establecer un sistema reconfigurable. Esta metodología se adaptó para ayudar encontrar una alternativa viable en función de los criterios de costo, tiempo y esfuerzo, los cuales influyen en la decisión para determinar si una familia de productos tiene las condiciones necesarias para adaptarse a un sistema reconfigurable. Al ser aplicado en este estudio se llegó a la conclusión que aquellas familias de alto volumen con un perfil

de gama baja sugieren ser la primera prioridad en todos los casos estudiados, seguido por las familias de alto volumen y gama media.

Con base en lo anterior y volviendo al caso de mabe, solo tres familias se identificaron con prioridad uno, y cinco familias en prioridad dos. Esto quiere decir que, Mabe tiene la posibilidad de cambiar su esquema operativo hacia los sistemas reconfigurables. Sin embargo, tiene que concentrar su atención en aquellas familias que no representen un efecto significativo en temas de inversión, pero al mismo tiempo que generen alta utilidad debido al volumen programado. Asimismo, cabe mencionar que debido a una gran parte de los procesos son manuales e incluso en algunos casos artesanales, es oportuno considerar el beneficio de la tecnología para abordar una mayor flexibilidad en el sistema.

Retomando la teoría de Y. Koren, un sistema tendrá un alto nivel de reconfiguración si se consideran todas las características que lo distinguen. Hay diferentes maneras de ampliar este trabajo, por medio de un estudio correspondiente a la diagnosticabilidad de los procesos con el fin de obtener un acercamiento más preciso sobre la reconfiguración. Por otra parte, un diseño propio del elemento clave, como son las maquinas reconfigurables, permitirán ampliar una arquitectura más compleja del sistema. Asimismo, un énfasis en la arquitectura modular del producto es conveniente al proporcionar grandes beneficios en el aprovechamiento de los procesos, materiales y herramientas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHRYSSOLOURIS, G. Introduction. In *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. New York, NY: Springer New York, 2006, p. 1-53.
- [2] COCHRAN, D. S., J. F. ARINEZ, J. W. DUDA AND J. LINCK A decomposition approach for manufacturing system design. *Journal of Manufacturing Systems*, 2001/2002, 20(6), 371-389.
- [3] OKE, A. O., K. ABOU-EL-HOSSEIN AND N. J. THERON The Design and Development of a Reconfigurable Manufacturing System. *South African Journal of Industrial Engineering*, Nov 2011, 22(2), 121-132.
- [4] ELMARAGHY, H. AND H. P. WIENDAHL Changeability - An Introduction. In *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, Canada: Springer, 2009, 3-24.
- [5] CHRYSSOLOURIS, G. The Design of Manufacturing Systems. In *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. New York, NY: Springer New York, 2006, p. 329-463.
- [6] BROWNE, J., K. RATHMILL, S. P. SETHI AND K. E. STECKE Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine*, 1984, 114-117.
- [7] MATTA, A., Q. SEMERARO AND T. TOLIO. A Framework for Long Term Capacity Decisions in AMs. In A. MATTA AND Q. SEMERARO eds. *Design of Advanced Manufacturing Systems: Models for Capacity Planning in Advanced Manufacturing Systems*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005, p. 1-35.
- [8] ELMARAGHY, H. A. Reconfigurable Process Plans for Responsive Manufacturing Systems. In P. F. CUNHA AND P. G. MAROPOULOS eds. *Digital Enterprise Technology: Perspectives and Future Challenges*. Boston, MA: Springer US, 2007, p. 35-44.
- [9] KOREN, Y. AND M. SHPITALNI Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, Oct 2010, 29(4), 130-141.
- [10] KOREN, Y., U. HEISEL, F. JOVANE, T. MORIWAKI, et al. Reconfigurable Manufacturing Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1999, 48(2), 527-540.

- [11] SINGH, A., P. KUMAR AND S. SINGH Vision, Principles and Impact of Reconfigurable Manufacturing System. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Oct 2013, 3(1), 238-240.
- [12] KOREN, Y. AND A. G. ULISOY Reconfigurable Manufacturing Systems. Engineering Research Center for Reconfigurable Machining Systems. ERC/RMS Report #1. Sep 20 1997, 1-21.
- [13] KOREN, Y. Open-Architecture Controllers for Manufacturing Systems. In Y. KOREN, F. JOVANE, AND G. PRITSCHOW ed. *Open architecture control systems: Summary of global activity*. Milano, Italy: ITIA Series, 1998, vol. 2, p. 85-99.
- [14] MEHRABI, M. G. AND A. G. ULISOY State of the art in reconfigurable manufacturing systems. Engineering Research Center for Reconfigurable Machining Systems. ERC/RMS Report #2. Sep 20 1997.
- [15] ZHONG, W., Y. HUANG AND S. J. HU 2002. Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. "Modeling Variation Propagation in Machining Systems with Different Configurations". New Orleans, Louisiana, USA. November 17-22.
- [16] SETCHI, R. M. AND N. LAGOS Reconfigurability and reconfigurable manufacturing systems - State-of-the-art review. 2004 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics: Collaborative Automation - One Key for Intelligent Industrial Environments, 2004, 529-535.
- [17] ERIXON, G., A. VON YXKULL AND A. ARNSTRÖM Modularity – the Basis for Product and Factory Reengineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1996, 45(1), 1-6.
- [18] YIGIT, A. S. AND A. ALLAHVERDI Optimal selection of module instances for modular products in reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, Nov 20 2003, 41(17), 4063-4074.
- [19] KOREN, Y. Reconfigurable Manufacturing Systems. In *The Global Manufacturing Revolution*. John Wiley & Sons, Inc., 2010, p. 227-252.
- [20] LANDERS, R. G., B. K. MIN AND Y. KOREN Reconfigurable Machine Tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2001, 50(1), 269-274.

- [21] KOREN, Y. General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems. In A. I. DASHCHENKO ed. *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, p. 27-45.
- [22] HU, S. J. AND Y. KOREN Stream-of-Variation Theory for Automotive Body Assembly. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1997, 46(1), 1-6.
- [23] MALER-SPEREDELOZZI, V., Y. KOREN AND S. J. HU Convertibility Measures for Manufacturing Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003, 52(1), 367-370.
- [24] HASAN, F., P. K. JAIN AND D. KUMAR Machine Reconfigurability Models Using Multi-Attribute Utility Theory and Power Function Approximation. *Procedia Engineering*, 2013, 64, 1354-1363.
- [25] LANDERS, R. G. A new paradigm in machine tools: reconfigurable machine tools. Japan–USA Symposium on Flexible Automation, Jul 23–26 2000, Ann Arbor, MI.
- [26] MOON, Y. M. AND S. KOTA Design of Reconfigurable Machine Tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124(2), 480-483.
- [27] GOYAL, K. K., P. K. JAIN AND M. JAIN Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing system using NSGA II and TOPSIS. *International Journal of Production Research*, Aug 01 2012, 50(15), 4175-4191.
- [28] KOREN, Y. AND S. KOTA. 1999. Patent No. 5 943 750. Reconfigurable machine tool. USA.
- [29] KOREN, Y. AND A. G. ULSOY Vision, Principles and Impact of Reconfigurable Manufacturing Systems. *Powertrain International*, 2002, 5(3), 14-21.
- [30] DHUPIA, J., B. POWALKA, R. KATZ AND A. G. ULSOY Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(2), 326-334.
- [31] MAJIJA, N., K. MPOFU AND D. MODUNGWA. Conceptual Development of Modular Machine Tools for Reconfigurable Manufacturing Systems. In A. AZEVEDO ed. *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems: 23rd International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing*. Heidelberg: Springer International Publishing, 2013, p. 467-477.

- [32] KATZ, R. Design principles of reconfigurable machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34(5), 430-439.
- [33] LANDERS, G. R., J. RUAN AND F. LIOU. Reconfigurable Manufacturing Equipment. In A.I. DASHCHENKO ed. *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, p. 79-110.
- [34] XIAOBO, Z., W. JIANCAI AND L. ZHENBI A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 1: A framework. *International Journal of Production Research*, 2000, 38(10), 2273-2285.
- [35] XIAOBO, Z., W. JIANCAI AND L. ZHENBI A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 2: Optimal configurations. *International Journal of Production Research*, 2000, 38(12), 2829-2842.
- [36] GUPTA, S. AND V. KRISHNAN Product Family-Based Assembly Sequence Design Methodology. *IIE Transactions*, 1998, 30(10), 933-945.
- [37] ABDI, M. R. AND A. W. LABIB Grouping and selecting products: the design key of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs). *International Journal of Production Research*, 2004, 42(3), 521-546.
- [38] LAAKKO, T. AND MANTYLA, M. Feature-based modelling of product families. In *ASME International Computers in Engineering Conference*, 1994, 45-54.
- [39] MITROFANOV, S. P. *The Scientific Principles of Group Technology*. Boston Spa, Yorkshire, England: National Lending Library for Science and Technology, 1966.
- [40] SELIM, H. M., R. G. ASKIN AND A. J. VAKHARIA Cell formation in-group technology: Review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, 1998, 34(1), 3-20.
- [41] KING, J. R. Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order-clustering algorithm. *International Journal of Production Research*, 1980, 18(2), 213-232.
- [42] KUSIAK, A. AND W. S. CHOW Efficient solving of the group technology problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 1987, 6(2), 117-124.

- [43] MAHESH, O. AND G. SRINIVASAN Incremental cell formation considering alternative machines. *International Journal of Production Research*, 2002, 40(14), 3291-3310.
- [44] CHANDRASEKHARAN, M. P. AND R. RAJAGOPALAN An ideal seed non-hierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, 1986, 24(2), 451-463.
- [45] CHANDRASEKHARAN, M. P AND R. RAJAGOPALAN ZODIAC-an algorithm for concurrent formation of part-families and machine-cells. *International Journal of Production Research*, 1987, 25(6), 845-850.
- [46] SRINIVASAN, G. AND T. T. NARENDRAN GRAFICS-a nonhierarchical clustering algorithm for group technology. *International Journal of Production Research*, 1991, 29(3), 463-478.
- [47] RAKESH, K., P. K. JAIN AND N. K. MEHTA A framework for simultaneous recognition of part families and operation groups for driving a reconfigurable manufacturing system. *Advances in Production Engineering & Management*, 2010, 5(1), 45-58.
- [48] GALAN, R., J. RACERO, I. EGUIA AND D. CANCA A methodology for facilitating reconfiguration in manufacturing: the move towards reconfigurable manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(3), 345-353.
- [49] GALAN, R., J. RACERO, I. EGUIA AND J. M. GARCIA A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Robotics and Computer- Integrated Manufacturing*, 2007, 23(5), 489-502.
- [50] SARKER, B. R. AND K. M. S. ISLAM Relative performances of similarity and dissimilarity measures. *Computers & Industrial Engineering*, 1999, 37(4), 769-807.
- [51] MCAULEY, J. Machine grouping for Efficient Production. *Production Engineer*, 1972, 51(2), 53-57.
- [52] GUPTA, T. Clustering algorithms for the design of a cellular manufacturing system—an analysis of their performance. *Computers & Industrial Engineering*, 1991, 20(4), 461-468.
- [53] SEIFODDINI, H. AND P. M. WOLFE Application of the similarity coefficient method in group technology. *IIE Transactions*, 1986, 18(3), 271-277.

- [54] GUPTA, T. AND H. I. SEIFODDINI Production data based similarity coefficient for machine-component grouping decisions in the design of a cellular manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 1990, 28(7), 1247-1269.
- [55] VAKHARIA, A. J. AND U. WEMMERLÖV A comparative investigation of hierarchical clustering techniques and dissimilarity measures applied to the cell formation problem. *Journal of Operations Management*, 1995, 13(2), 117-138.
- [56] GOYAL, K. K., P. K. JAIN AND M. JAIN A comprehensive approach to operation sequence similarity based part family formation in the reconfigurable manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(6), 1762-1776.
- [57] ULRICH, K. AND K. TUNG 1991. *Proceedings of ASME Design Technical Conferences. "Fundamentals of Product Modularity"*. Miami, Florida.
- [58] HUANG, CHUN-CHE AND A. KUSIAK Modularity in Design of Products and Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 1998, 28(1), 66-77.
- [59] GERSHENSON, J. K. AND G. J. PRASAD Modularity in product design for manufacturability. *International Journal of Agile Manufacturing*, 1997, 1(1).
- [60] HU, W, Z. KONG, G. ZHU AND J. YU 1993. *Proceedings of International Conference on Engineering Design. "Modules for modular design of machine tools"*. The Hague. August 1287-1294.
- [61] TSUKUNE, H., M. TSUKAMOTO, T. MATSUSHITA, F. TOMITA, K. OKADA, T. OGASAWARA, K. TAKASE AND T. YUBA Modular manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1993, 4, 163-181.
- [62] ROGERS, G. G. AND L. BOTACCI Modular production systems: a new manufacturing paradigm. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1997, 8, 147-156.
- [63] ERICSSON, A. AND G. ERIXON *Controlling Design Variants: Modular Product Platforms*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 1999.
- [64] FUJITA, K. AND H. YOSHIDA Product Variety Optimization Simultaneously Designing Module Combination and Module Attributes. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 2004, 12(2), 105-118.

- [65] JIAO, R., G. HUANG AND M. TSENG Concurrent Enterprising for Mass Customization. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 2004, 12(2), 83-88.
- [66] BALDWIN, C. Y. AND K. B. CLARK *Design Rules: The Power of Modularity*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2001.
- [67] WHITNEY, D. E. *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford, New York: Oxford University Press, 2004.
- [68] PIMMLER, T. U. AND S. D. EPPINGER 1994. ASME Design Engineering Technical Conferences. "Integration Analysis of Product Decompositions". Minneapolis, Minnesota, USA. 343-351.
- [69] STONE, R. B., K. L. WOOD AND R. H. CRAWFORD A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architecture. *Design Studies*, 2000, 21(1), 5-31.
- [70] ZAMIROWSKI, E. J. AND K. N. OTTO 1999. Design Engineering Technical Conferences. "Identifying Product Family Architecture Modularity Using Function and Variety Heuristics". Las Vegas, Nevada, USA.
- [71] HOLTTA, K. M. M. AND M. K. SALONEN 2003. Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences. "Comparing Three Different Modularity Methods". Chicago, Illinois, USA. September 2-6.
- [72] AARNIO, J. 2003. Modularization by Integration: Creating Modular Concepts for Mechatronic Products. PhD Thesis, Tampere University of Technology.
- [73] SOSA, M. E., S. D. EPPINGER AND C. M. ROWLES Identifying Modular and Integrative Systems and their Impact on Design Team Interactions. *Journal of Mechanical Design*, 2003, 125(2), 240-252.
- [74] BROWNING, T. R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2001, 48(3), 292-306.
- [75] HOLTTA, K., E. S. SUH AND O. WECK 2005. International Conference on Engineering Design. "Tradeoff between Modularity and Performance for Engineered Systems and Products". Melbourne, Australia. August 15-18.

- [76] HOLTTA, K. AND O. WECK Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 2007, 15(2), 113-126.
- [77] GOLUB, G. H. AND C. REINSCH Singular value decomposition and least squares solutions. *Numerische Mathematik*, 1970, 14(5), 403-420.
- [78] KOREN, Y., S. J. HU AND T. W. WEBER Impact of Manufacturing System Configuration on Performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1998, 47(1), 369-372.
- [79] PERRONET, G., S. NOTO LA DIEGA A Reference Scenario for IMS Strategic Design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1999, 48(1), 381-384.
- [80] SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [81] ABDI, M. R. AND A. W. LABIB A design strategy for reconfigurable manufacturing systems (RMSs) using analytical hierarchical process (AHP): a case study. *International Journal of Production Research*, 2003, 41(10), 2273-2299.
- [82] MAIER-SPEREDELOZZI, V. AND S. J. HU Selecting manufacturing system configurations based on performance using AHP. *Technical Paper-Society of Manufacturing Engineers*, 2002, MS02-179, 1-8.
- [83] SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 1987, 9(3), 161-176.
- [84] ALONSO, J. A. AND M. T. LAMATA Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A New Approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2006, 14(04), 445-459.