



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE
SISTEMAS RECONFIGURABLES DE FABRICACIÓN (RMS) A PARTIR DE
MODULARIDAD**

ING. JAIME ALBERTO MESA COGOLLO

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA
2012**



**UNIVERSIDAD
DEL NORTE**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE
SISTEMAS RECONFIGURABLES DE FABRICACIÓN (RMS) A PARTIR DE
MODULARIDAD**

ING. JAIME ALBERTO MESA COGOLLO

**Monografía presentada como requisito para optar al título de Magíster en
Ingeniería Mecánica**

**DIRECTOR:
ING. HERIBERTO ENRIQUE MAURY RAMÍREZ, Ph.D**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA
2012**

Este documento contiene información confidencial propiedad intelectual del Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Diseño (GIMYP) de la Universidad del Norte; se entrega a quien interese con el entendimiento que lo utilizará exclusivamente en la revisión y evaluación de su contenido y que lo mantendrá en forma confidencial, guardándolo contra inspección de terceras personas no autorizadas explícitamente por la Universidad del Norte.

Vo.Bo. Director del Proyecto
Ing. HERIBERTO MAURY RAMÍREZ, PhD.
Dpto. De Ingeniería Mecánica – Universidad del Norte
Barranquilla, 2012

Aprobado por la División de Ingenierías en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de Magíster en Ingeniería Mecánica.

**Director del Proyecto
Ing. Heriberto Maury, PhD.**

Miembro del Comité

Miembro del Comité

Miembro del Comité

Dedicatoria

A Dios por su compañía y ayuda en todos los momentos importantes de mi vida.

A mis padres Jaime y Darcy por todos sus sacrificios y enseñanzas en lo largo de toda mi vida, por su apoyo y constancia durante mis estudios y por dejarme la mejor herencia que existe para un hijo: “La educación”. A mis hermanos Jaime Javier y Jaime José que me motivan a seguir en las luchas contra la adversidad y me acompañan en los momentos felices.

AGRADECIMIENTOS

Al DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA de la UNIVERSIDAD DEL NORTE, por su apoyo durante mis estudios de Postgrado.

A mis compañeros de estudio **RAFAEL, RENÉ, YENNY, CÉSAR, OSCAR, JORGE, JAVIER Y DANNY** por su amistad, camaradería, apoyo y consejos durante nuestros estudios de maestría y como compañeros de trabajo. Gracias también a los auxiliares de laboratorio de materiales **ADOLFO Y LUIS** por su amistad y compañía durante mi rol como docente.

Al **Ing. HERIBERTO MAURY** por todos sus consejos y enseñanzas en mis estudios de maestría, por brindarme su amistad, por motivarme y enseñarme que el camino de la ingeniería a pesar de ser duro vale la pena y que todos los días hay algo por aprender. Muchas gracias Profe H. por su sencillez y apoyo tanto en lo personal como en lo profesional.

A los **Ing. LESME CORREDOR y ANTONIO BULA** por su soporte durante mis estudios de maestría, por sus enseñanzas y apoyo en las diferentes actividades y proyectos encomendados.

Al **Ing. RICARDO VASQUEZ** por su paciencia y apoyo en la realización de esta investigación y por motivarme para poder desarrollarla a pesar de los percances.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	13
1.1 OBJETIVOS:	13
1.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	13
1.3. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN	14
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	16
2.1 Evolución de los Sistemas de Fabricación	16
2.2 Definición de RMS	20
2.3 Tipos de RMS	22
2.4 Principios de Diseño para RMS.....	26
2.5 Modularidad en el Diseño de RMS.....	28
2.6 Otros Aportes Metodológicos al diseño de RMS.....	29
2.7 Otros Acercamientos en la implementación de RMS en la Arquitectura de Productos.	32
2.8 Tendencias y retos futuros para RMS	33
Capítulo 3. DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	35
3.1 Modelos para Diseño de Ingeniería	35
3.2 Descripción de la Metodología para el Diseño Conceptual de Sistemas Reconfigurables de Fabricación.	38
Etapa 1: Especificación Inicial.....	40
Etapa 2: Especificación Derivada para Reconfiguración	41
Etapa 3: Diseño Conceptual y Análisis de Modularidad.....	50
Etapa 4: Diseño Preliminar de Módulos y Configuraciones	62
Fases Posteriores a la Metodología	64
Capítulo 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	65
4.1 Caso de Aplicación: Diseño de una Máquina Reconfigurable de Ensamble para Intercambiadores de Calor Compactos.....	65
Implementación Etapa 1: Especificación Inicial	67
Implementación Etapa 2: Especificación Derivada para Reconfiguración	69
Implementación Etapa 3: Diseño Conceptual y Análisis de Modularidad	74

Implementación Etapa 4: Diseño Preliminar de Módulos y Configuraciones.....	93
4.2 FASES POSTERIORES A LA METODOLOGÍA.....	101
4.3 COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y LOS MÉTODOS TRADICIONALES DE DISEÑO QUE NO CONTEMPLAN RECONFIGURACIÓN.....	101
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	103
5.1 CONCLUSIONES	103
5.2 RECOMENDACIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	105
CAPITULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
ANEXOS	111
ANEXO 1: CARACTERIZACIÓN DE PRINCIPIOS DE ARQUITECTURA MODULAR	111
ANEXO 2: VALORACIONES CRITERIOS PARA EL CICLO DE VIDA	119
ANEXO 3: ANÁLISIS QFD.....	123
ANEXO 4: ALGORITMO DE GENERACIÓN DEL DENDOGRAMA (CÓDIGO EN MATLAB).....	125
ANEXO 5: VALORACIÓN DE CRITERIOS PARA EL CICLO DE VIDA A PARTIR DEL QFD	127
ANEXO 6: INTERFAZ DEL SOFTWARE EXPERT CHOICE PARA EVALUACIÓN EN EL CICLO DE VIDA Y ESTRUCTURA DEL ARBOL DE CRITERIOS.	128

Listado de Figuras

Figura 1: Comparación Capacidad vs Costo para DMS, FMS y RMS (Koren, y otros, 1999).....	18
Figura 2: Comparación entre Funcionalidad y Capacidad de DMS, FMS y RMS (Koren, y otros, 1999)	19
Figura 3: Reducción del tiempo de desarrollo de producto e introducción de nuevos productos al mercado. Mientras el tiempo de desarrollo de producto se reduce dramáticamente mediante el CAD, esto no se observa en el sistema de fabricación. El incremento en la frecuencia de introducción de nuevos productos requiere acortar el tiempo de diseño del sistema de fabricación y lograr una rápida adaptación a la producción de nuevos productos a través de una rápida reconfiguración. (Koren, y otros, 1999).	20
Figura 4: Organización del sistema y recursos reconfigurables (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008).....	22
Figura 5: Esquema de un sistema reconfigurable de mecanizado. a) Módulos, b) Distintas configuraciones posibles (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008)	23
Figura 6: Sistema de fijación modular reconfigurable (Bi & Zhang, 2001).....	23
Figura 7: Sistema de Ensamble Reconfigurable (Técnica de Grupo) (Wiendahl H. , y otros, 2007)	24
Figura 8: Sistema Híbrido de Ensamble con mesa giratoria (Hartel & Lotter, 2006).....	24
Figura 9: Esquema Sistema reconfigurable de procesamiento de material con sus diferentes patrones de procesamiento posibles (To & Ho, 2001).....	25
Figura 10: Sistema robótico deslizante paralelo RPRS de 6 Grados de Libertad (Bi & Zhang, 2001)	26
Figura 11: Diagrama General Metodología Propuesta.....	38
Figura 12: Modelo de Diseño para RMS propuesto en la investigación.....	39
Figura 13: Ejemplo de Dendograma para 4 productos. Tomado de (Galán, Racero, Eguia, & Canca, 2007)	49
Figura 14: Esquema algoritmo (ALCA). Tomado de (Galán, Racero, Eguia, & Canca, 2007).....	50
Figura 15: Esquema de Caja Negra para Construcción Funcional	51
Figura 16: Esquema de Funciones y Subfunciones derivadas de la función global que enmarca el problema de diseño a tratar.	52
Figura 17: Ejemplo de Estructura de Caja Transparente donde se ilustra la interacción y relación entre los distintos flujos (Energía, Material e Información).....	52
Figura 18: Estructura del Algoritmo para Selección funcional de los Principios de Arquitectura Modular.....	54

Figura 19: Gráfica de desempeño de los principios de arquitectura modular para variación en el nivel de exigencia respecto a los criterios de caracterización.....	57
Figura 20: Gráfica de desempeño de los principios de arquitectura modular para variación funcional respecto a los criterios de caracterización	58
Figura 21: Parámetros Constructivos de Intercambiadores de Calor en Aluminio. (Thermocoil®)	65
Figura 22: Dendograma para la familia de Productos de Intercambiadores de Calor	73
Figura 23: Diagrama de Caja Negra para la máquina reconfigurable de ensamble de intercambiadores de calor	74
Figura 24: Descomposición Funcional para el sistema a diseñar (Máquina para ensamble de I.C.).....	75
Figura 25: Caja Transparente para la Máquina Reconfigurable de Ensamble para Intercambiadores de Calor.....	77
Figura 26: Visualización de Interfaz creada para desarrollar la selección de principios de arquitectura modular	80
Figura 27: Esquema conceptual alternativa global de solución N° 1.....	86
Figura 28: Esquema conceptual alternativa de solución global N° 2	87
Figura 29: Esquema conceptual alternativa de solución global N° 3.....	88
Figura 30: Representación gráfica de los criterios de evaluación para el ciclo de vida.....	91
Figura 31: Resultados método AHP para evaluación y selección de alternativas de solución globales para el caso de diseño.....	92
Figura 32: Resultados jerarquización de alternativas, software Expert Choice®	92
Figura 33: Esquema general de la función recibir partes y su adaptación a las VR del caso de diseño.	94
Figura 34: Esquema general de la función realizar apilamiento y su adaptación a las VR del caso de diseño.	95
Figura 35: Esquema general de la función acomodar partes y su adaptación a las VR del caso de diseño.....	96
Figura 36: Esquema general de la función recibir tanques laterales y su adaptación a las VR del caso de diseño.....	97
Figura 37: Esquema general de la función colocar tanques laterales y su adaptación a las VR del caso de diseño.....	98
Figura 38: Esquema general de la función retirar Intercambiador y su adaptación a las VR del caso de diseño.	99
Figura 39: Interfaz del software Expert Choice, estructurado el árbol de criterios.....	128

Listado de Tablas

Tabla 1: Definición, Objetivos y Características de los principales sistemas de fabricación (Basado en ElMaraghy 2006 & Koren y Otros 1999).	17
Tabla 2: Definiciones de RMS según diferentes autores.	20
Tabla 3: Principios de Diseño para RMS a partir de diferentes autores.....	28
Tabla 4: Acercamientos y Autores para el Diseño de Arquitectura Máquina-Herramienta Reconfigurable.....	30
Tabla 5: Acercamientos y Autores para el diseño de configuración en Máquina-Herramienta Reconfigurable.....	31
Tabla 6: Estructura General Modelos de Diseño de Ingeniería por Fases según diversos autores. (Farias, Aca, Molina, Maury, & Riba, 2006).....	36
Tabla 7: Tipos de VRs y parámetros que representan.....	43
Tabla 8: Formato Propuesto para identificar y clasificar las VRs de una familia o Portafolio de Productos.	44
Tabla 9: Resumen de caracterización del escenario de fabricación.....	45
Tabla 10: Valoraciones y niveles para el tipo de variación de VRs.....	46
Tabla 11: Valoraciones y Niveles para la constante de influencia K.....	46
Tabla 12: Ejemplo de Matriz de Similitud para n productos.....	48
Tabla 13: Estructura de Matriz de Descomposición de Productos.....	48
Tabla 14: Combinaciones de respuesta para la selección de principios de Arquitectura Modular y sus grupos.	53
Tabla 15: Matriz de Diagrama Morfológico para Soluciones Reconfigurables.....	55
Tabla 16: Criterios de Evaluación de Principios de Arquitectura Modular	56
Tabla 17: Rangos cualitativos de criterios de evaluación para reconfiguración en principios de variación de exigencia en VR.	56
Tabla 18: Rangos cualitativos de criterios de evaluación para reconfiguración en Principios de Variación Funcional.	57
Tabla 19: Esquema general de Diagrama Morfológico.....	59
Tabla 20: Criterios de Evaluación para Alternativas de solución global enfocados al ciclo de vida del sistema.....	60
Tabla 21: Matriz de Relación Criterio Evaluación para el Ciclo de vida y atributos de QFD	61
Tabla 22: Matriz de Asignación de parámetros de VR por configuración	62
Tabla 23: Estructura de la Matriz de Configuraciones y parámetros para los conceptos de solución seleccionados.....	63
Tabla 24: Características Geométricas de Intercambiadores de Calor	66
Tabla 25: Listado de requerimientos para la Máquina Reconfigurable de Ensamble para intercambiadores de calor.....	67
Tabla 26: Pesos relativos obtenidos de la matriz 2a2 para los requerimientos de diseño. 68	68

Tabla 27: Valoración de Atributos de Ingeniería de acuerdo a análisis por QFD	69
Tabla 28: Variables de Reconfiguración del portafolio de Intercambiadores de Calor y sus diferentes valores	70
Tabla 29: Caracterización del escenario de fabricación para el caso de estudio	70
Tabla 30: Evaluación de criticidad de las VRs del caso de aplicación	71
Tabla 31: Matriz de descomposición geométrica de Productos para la familia de Intercambiadores de Calor.....	72
Tabla 32: Número de agrupaciones obtenidas a partir de análisis de similaridad y Clustering.....	73
Tabla 33: Descripción general subfunciones del sistema.....	75
Tabla 34: Matriz de Relación Función-VR.....	77
Tabla 35: Análisis funcional para modularidad del caso de diseño.....	78
Tabla 36: Establecimiento de Parámetros de variación para las subfunciones de reconfiguración	79
Tabla 37: Establecimiento de alternativas de solución para cada subfunción afectada por las VR.....	79
Tabla 38: Establecimiento de Principios de Arquitectura Modular compatibles con las alternativas de Solución obtenidas	81
Tabla 39: Alternativas de solución modulares para las subfunciones afectadas por las VRs	82
Tabla 40: Diagrama morfológico conceptos de solución	83
Tabla 41: Generación de alternativas de solución globales	84
Tabla 42: Descripción de componentes que conforman cada alternativa de solución global.....	85
Tabla 43: Listado de componentes, alternativa de solución global N° 1	86
Tabla 44: Listado de componentes, alternativa de solución global N°2	87
Tabla 45: Listado de componentes, alternativa de solución global N°3	88
Tabla 46: Valoración de Criterios para Evaluación en el Ciclo de Vida.....	89
Tabla 47: Establecimiento de parámetros en las configuraciones del sistema	93
Tabla 48: Configuraciones y parámetros para los conceptos de solución seleccionados..	99
Tabla 49: Etapas de las metodologías tradicional y propuesta en la investigación.....	101
Tabla 50: Comparación de actividades y enfoques entre la metodología tradicional de diseño y la metodología propuesta en la investigación.....	102
Tabla 51: Descripción General de Principios para Variación en niveles de exigencia de VR. Tomado de (Riba, 2002). Conceptos redefinidos para aplicarlos a conceptos de solución de para alternativas.....	112
Tabla 52: Descripción General Principios de Arquitectura Modular para Variación Funcional.....	113
Tabla 53: Descripción Principios de Arquitectura Modular Mixta	114

Tabla 54: Clasificación para el desempeño de los principios en facilidad de reconfiguración	116
Tabla 55: Clasificación para el desempeño de los principios en adaptabilidad a cambios en valores de las variables de reconfiguración.	116
Tabla 56: Niveles de evaluación para Movilidad	116
Tabla 57: Niveles de evaluación para Independencia Modular	116
Tabla 58: Niveles de evaluación para Vida Útil	117
Tabla 59: Niveles de evaluación facilidad de Reconfiguración en funcionalidad.....	117
Tabla 60: Niveles de evaluación Variedad Funcional.....	118
Tabla 61: Niveles de evaluación para independencia modular en variación funcional	118
Tabla 62: Rangos cualitativos de criterios de evaluación para reconfiguración en principios de variación de exigencia en VR.	118
Tabla 63: Rangos cualitativos de criterios de evaluación para reconfiguración en Principios de Variación Funcional.	119
Tabla 65: Pesos por Criterios de Evaluación del Ciclo de vida del producto	127

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran las generalidades más importantes de la investigación desarrollada, la metodología, contribución de la investigación y su estructura en el documento.

1.1 OBJETIVOS:

1.1.1. Objetivo General

Desarrollar y validar una metodología para el diseño conceptual de Sistemas Reconfigurables a partir de portafolios de producto.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar principales tendencias en métodos de diseño de máquinas y sistemas reconfigurable y las limitaciones de dichos métodos.
- Establecer los criterios de diseño fundamentales para el diseño de sistemas reconfigurables de fabricación a partir del análisis del estado del arte.
- Definir un modelo modificado de diseño que integre teorías de optimización, diseño de sistemas reconfigurables, diseño de productos y principios de arquitectura modular.
- Validar el modelo sobre un caso de aplicación real en el sector de fabricación industrial.
- Evaluar los resultados obtenidos de la validación del modelo de diseño e identificar nuevas tendencias en el campo de fabricación reconfigurable.

1.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

A partir de los objetivos establecidos inicialmente en la propuesta de la investigación, se muestra a continuación la metodología a implementar para lograr los resultados esperados:

1. **Definición del estado del arte:** se estudia la información en la literatura y en bases de datos, para determinar el estado del arte de RMS, identificación de tendencias, criterios y limitantes en los métodos de diseño relacionados.
2. **Desarrollo de la metodología de diseño:** a partir de la identificación y análisis de distintos modelos de diseño y arquitectura de productos se propone un modelo modificado de diseño para RMS enfocado a familias de productos. Este enfoque se realizará hasta una etapa de diseño básico y ayudará a la definición de la arquitectura del sistema utilizando principios de arquitectura modular.
3. **Validación y ajuste del modelo:** se valida y ajusta el modelo mediante su aplicación en casos reales de fabricación de familias de productos y se comparará posteriormente la efectividad del modelo planteado respecto a los modelos tradicionales de diseño que no consideran el enfoque de reconfiguración.
4. **Análisis y evaluación de resultados:** se hace un análisis de los resultados obtenidos en la etapa de validación con el fin de generar conclusiones generales e identificar nuevas ventanas de investigación.

Como puede observarse, la etapa 1 está enfocada a la fundamentación, conceptualización y contextualización en el área de interés de la investigación y ayuda a precisar el problema de investigación y cómo abordarlo. Mientras que la etapa 2 está dirigida al desarrollo de los aportes conceptuales y metodológicos que son necesarios para el diseño de sistemas de fabricación reconfigurables. Finalmente en las etapas 3 y 4 se muestra la validación de los aportes por su aplicación en casos de diseño y el análisis de los resultados obtenidos en ese proceso de validación y al desarrollo de los ajustes que requieren dichos aportes.

1.3. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

Para facilitar la comprensión o legalidad de los aportes desarrollados en esta tesina, se ha estructurado este documento de memoria de la siguiente forma:

Capítulo 1 – Introducción.

En este capítulo se hace una introducción sobre la investigación realizada, dando a conocer los aspectos generales más relevantes en cuanto a sus aportes y procesos metodológicos.

Capítulo 2 –Estado del Arte: RMS y Metodologías de Diseño para RMS.

En esta sección se hace una recopilación y revisión crítica de los principales avances y desarrollos en el tema de sistemas de fabricación reconfigurables, principios de diseño y tendencias más importantes.

Capítulo 3 – Desarrollo de la Propuesta: Metodología de Diseño para Sistemas Reconfigurables de Fabricación Basada en Modularidad.

Contiene la propuesta metodológica para el diseño conceptual de RMS, se explica cada etapa y subetapa del proceso de diseño, métodos y reglas utilizadas en cada una de ellas y las consideraciones adicionales para el diseño de RMS desde el punto de vista de los criterios más importantes del diseño de ingeniería.

Capítulo 4 – Validación de la Metodología Propuesta.

Se muestra la aplicación y validación de la metodología de diseño propuesta sobre casos de estudio real: a nivel máquina: Diseño de una máquina reconfigurable de ensamble para intercambiadores de calor. Aquí se hacen los ajustes que requieran los métodos y conceptos luego de su validación.

Del mismo modo se hace una comparación de las metodologías tradicionales y el modelo propuesto en cuanto a la definición de la arquitectura modular del sistema y la robustez del proceso de diseño de sistemas reconfigurables.

Capítulo 5 – Conclusiones y Desarrollos Futuros.

En este capítulo se muestran un resumen los resultados y contribuciones más relevantes de la investigación llevada a cabo y adicionalmente se presentan las recomendaciones para trabajos futuros en la línea de investigación de diseño para RMS.

Capítulo 6 – Referencias Bibliográficas

En este último capítulo se muestran las referencias bibliográficas empleadas para el desarrollo de esta investigación.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 Evolución de los Sistemas de Fabricación

En este apartado a partir del análisis del estado de la técnica y del arte se analiza, clasifica e identifican los sistemas de fabricación en relación con su flexibilidad, exponiendo sus capacidades, limitaciones y tendencias tecnológicas. En la actualidad la mayoría de las industrias de fabricación desarrollan sus actividades productivas empleando diferentes sistemas de fabricación para generar diseños y fabricar sus productos, estos sistemas son: los sistemas de fabricación dedicados (*DMS: Dedicated Manufacturing Systems*), los sistemas de fabricación flexibles (*FMS: Flexible Manufacturing Systems*), y por último los sistemas de fabricación reconfigurables (*RMS: Reconfigurable Manufacturing Systems*).

Los sistemas DMS se emplean en el caso que se requieran producir altos volúmenes de producción de una misma parte (parte única), es decir, una línea de producción rígida. Estos sistemas resultan muy rentables cuando existe una demanda alta por parte del consumidor y se garantiza la venta total de toda la producción, esto genera que el precio del producto y los costos de producción se tornen relativamente bajos. Por otro lado los sistemas de fabricación flexibles permiten producir una variedad de productos con volúmenes variables y cambio de especificaciones dentro del proceso de fabricación, sin embargo no permiten producción en masa debido a que los costos del sistema son relativamente altos respecto a los costos de los sistemas de fabricación dedicados y por ende el precio de las partes se incrementa (Koren, y otros, 1999), (Mehrabi M. , Ulsoy, Koren, & otros, 2002). Por último los sistemas reconfigurables permiten combinar aspectos de los dos primeros para alcanzar una personalización en masa y volúmenes altos de producción, si embargo aún no se han masificado debido a que se encuentran aún en fase de desarrollo (Koren, y otros, 1999).

Los sistemas de fabricación dedicados (DMS) surgieron luego de la evolución de las actividades manuales una vez se inició la era industrializada (finales del siglo XVIII- inicios del XIX), donde las máquinas lograron remplazar mano de obra y fue posible fabricar grandes volúmenes de partes y piezas con baja variedad y dirigidos por el modelo de economía de escala. Para la década de 1980 se introduce en la industria el concepto de fabricación flexible (FMS) con el fin de suplir las necesidades de personalización en masa y en búsqueda de cumplir con los requerimientos cambiantes del mercado. Con esta tendencia se alcanzaba

mayor variedad de productos pero sólo se alcanzaban volúmenes medianos de producción (Wiendahl H. , ElMaraghy, Nyhuis, Zah, Duffie, & Brieke, 2007)

En vista de las necesidades y nuevos retos para la industria de fabricación surgen en los años 90 los sistemas de fabricación reconfigurables (RMS) (Koren, y otros, 1999) (Fujii, y otros, 2000). Los cuales combinan aspectos de los sistemas tradicionales (DMS y FMS), logrando mayores volúmenes de producción y variedad de partes. Estos sistemas de fabricación se desarrollan para permitir que las máquinas, componentes o herramientas puedan ser añadidas, removidas, modificados o intercambiados con el fin de responder a diferentes necesidades de fabricación dependiendo de la demanda por parte del mercado y al cambio en los requerimientos de diseño (ElMaraghy, 2006).

En la Tabla 1 se presentan de forma comparativa los diferentes sistemas de fabricación ya mencionados, relacionando sus objetivos, características y limitaciones.

Tabla 1: Definición, Objetivos y Características de los principales sistemas de fabricación (Basado en ElMaraghy 2006 & Koren y Otros 1999).

	DMS	FMS	RMS
Definición General:	Sistema de fabricación diseñado para producir en grandes volúmenes una parte o producto específico.	Sistema de fabricación integrado por módulos de máquinas, equipos y materiales bajo control computarizado para automatización del proceso de fabricación.	Sistema de fabricación diseñado para cambios estructurales rápidos con el fin de ajustarse a las capacidades requeridas de producción y funcionalidad debido a los cambios del mercado.
Objetivos Generales:	Lograr rentabilidad del proceso a través de planificación previa y optimización	Lograr rentabilidad en la fabricación de diferentes tipos de partes predefinidas dentro de una familia de partes que pueden cambiar respecto al tiempo con mínimo sobre costo	Proveer las funcionalidades y capacidades exactas que se requieran y cuando se requieran, se busca el máximo aprovechamiento de los recursos.

	DMS	FMS	RMS	
		utilizando el mismo sistema y con la misma calidad.		
Características	Estructura del Sistema	Fija	Ajustable	Ajustable
	Estructura de Máquinas	Fija	Fija	Ajustable
	Enfoque del Sistema	Parte	Máquina	Familia de partes
	Flexibilidad	No	General	Personalizada
	Escalabilidad	No	Si	Si
	Operación simultánea de herramientas	Si	No	Si
	Costo	Bajo	Alto	Intermedio

En la Figura 1 se muestra una comparación gráfica considerando las variables capacidad de producción y costo del sistema, donde se aprecia que los sistemas de fabricación dedicados requieren grandes saltos tecnológicos para generar aumento de la capacidad del sistema debido a su rigidez, los sistemas flexibles permiten aumentos de la capacidad de forma escalonada con pasos pequeños, por otro lado los sistemas reconfigurables abarcan mayor capacidad de fabricación que los sistemas flexibles y no requieren saltos tecnológicos o cambios muy severos cuando se desea aumentar la capacidad como es el caso de los sistemas dedicados.

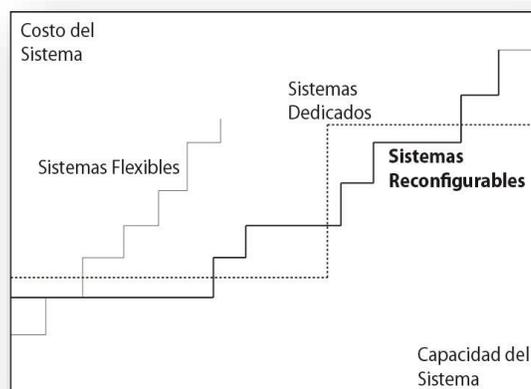


Figura 1: Comparación Capacidad vs Costo para DMS, FMS y RMS (Koren, y otros, 1999)

Por otro lado desde el punto de vista de funcionalidad y capacidad los sistemas reconfigurables se adaptan mejor a los cambios de requerimientos e introducción de nuevos productos, en la Figura 2 se ilustra como los sistemas dedicados pueden fabricar un solo producto en grandes volúmenes de producción mientras que los sistemas flexibles permiten fabricar gran variedad de productos pero en muy bajas cantidades. En este escenario los sistemas de fabricación reconfigurables permiten adaptarse rápidamente a los cambios de requerimientos e ir permitiendo la introducción de nuevos productos y simultáneamente ir aumentando la capacidad productiva.

La adaptabilidad a la introducción de nuevos productos es uno de los aspectos más importantes en la industria de fabricación actual, ya que cada vez se introducen de manera más rápida nuevos productos que van reemplazando a los anteriores, variando en calidad, capacidad y funcionalidad, por lo cual la reducción del tiempo de diseño y el tiempo de salida al mercado de productos (Ramp-up time) se convierte en aspectos obligatorios para los sistemas de fabricación. En la Figura 3 se observa la tendencia de fabricación en la cual se busca desarrollar productos en tiempos muy cortos y de igual forma lanzarlos al mercado rápidamente, por lo cual se requiere una reconfiguración en el sistema de fabricación para que se cumpla este objetivo.

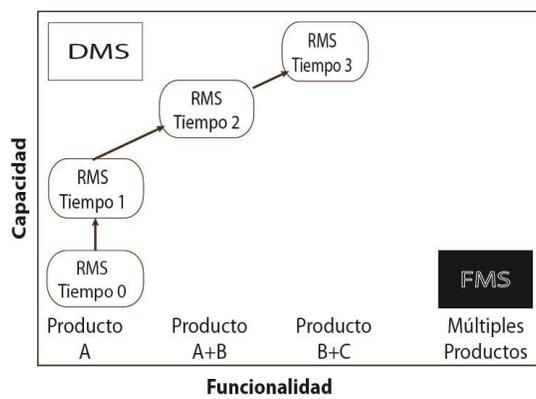


Figura 2: Comparación entre Funcionalidad y Capacidad de DMS, FMS y RMS (Koren, y otros, 1999)

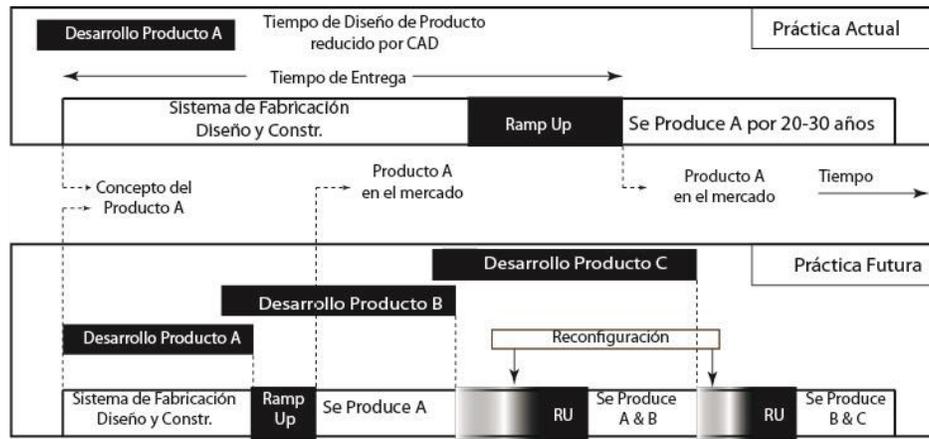


Figura 3: Reducción del tiempo de desarrollo de producto e introducción de nuevos productos al mercado. Mientras el tiempo de desarrollo de producto se reduce dramáticamente mediante el CAD, esto no se observa en el sistema de fabricación. El incremento en la frecuencia de introducción de nuevos productos requiere acortar el tiempo de diseño del sistema de fabricación y lograr una rápida adaptación a la producción de nuevos productos a través de una rápida reconfiguración. (Koren, y otros, 1999).

2.2 Definición de RMS

Diferentes autores han desarrollado distintas definiciones para los sistemas reconfigurables de fabricación (RMS llamados en inglés como *Reconfigurable Manufacturing Systems*), dentro de las definiciones más apropiadas se encuentra las dada por (Liles & Huff, 1990), (Koren, y otros, 1999) y (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008), que coinciden significativamente como se aprecia en la Tabla 2, en la cual se muestra una comparación entre ellas.

Tabla 2: Definiciones de RMS según diferentes autores.

Año	Autores	Definición
1990	(Liles & Huff, 1990)	Sistema capaz de adaptar la configuración de un sistema de fabricación para afrontar las demandas de producción que se le plantean dinámicamente.
1999	(Koren, y otros, 1999)	Sistema de fabricación que se diseña bajo el principio de cambios estructurales rápidos, así como de componentes de hardware y software, con el fin de ajustarse rápidamente en capacidad y funcionalidad para fabricar una familia de partes en respuesta a cambios repentinos en el mercado o en requerimientos regulatorios.
2000	(Mehrabi, Ulsoy, & Koren, 2000)	Sistema de Mecanizado que puede ser conformado mediante la incorporación de módulos básicos de proceso, tanto hardware como software, que pueden ser reorganizados o reemplazados rápida y seguramente. Se puede reconfigurar añadiendo,

removiendo o modificando capacidades específicas del proceso, controles, software o estructuras de la máquina para ajustarse a la capacidad de producción en respuesta a los cambios en demanda del mercado o de tecnologías. Este tipo de sistemas provee flexibilidad personalizada para una familia de partes particular y puede abrirse o cerrarse con el fin de mejorarse, actualizarse o reconfigurarse en vez de ser reemplazada.

En adición algunos autores encuentran similitudes entre los conceptos de fabricación reconfigurable es muy similar al de fabricación modular (Tsukune, y otros, 1993) sistemas de fabricación basados en componentes, (Weston, 1999) sistemas de productos modulares (Rogers & Botacci, 1997) y fabricación flexible modular (Kaula, 1998). Es importante resaltar que el concepto de fabricación incluye las actividades de Diseño, Manufactura y Ensamble (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 1994).

Desde el punto de vista de costos y capacidad, los sistemas de fabricación reconfigurables permiten obtener una relación capacidad-costo atractiva desde la perspectiva de rentabilidad, en consecuencia considera que es un tipo de sistema de fabricación muy adecuado para las condiciones actuales del mercado en las cuales se deben afrontar los siguientes retos (Mehrabi, Ulsoy, & Koren, 2000):

- El lanzamiento de nuevos modelos de productos al mercado, el ajuste inmediato de la capacidad del sistema de fabricación a las demandas del mercado.
- La rápida integración de nuevas funciones y tecnologías dentro de los sistemas existentes, teniendo en cuenta los posibles cambios a futuro a partir de las tendencias de fabricación.
- Fácil adaptación de las variables cuantificadas de productos para los nichos de mercado.

La reconfiguración de un sistema puede ser clasificada en términos del nivel en el cual las acciones de reconfiguración son tomadas. En la Figura 4 se muestra que a niveles más bajos (Máquinas, Celdas de Fabricación p.e.) se logra una mayor reconfiguración por el cambio de recursos de hardware, mientras que a niveles más altos la reconfiguración se logra cambiando recursos de software y/o seleccionando métodos alternativos o estructuras organizacionales flexibles. Sin

embargo lo ideal es que exista una combinación de los dos aspectos para maximizar la rentabilidad de la reconfiguración. (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008).

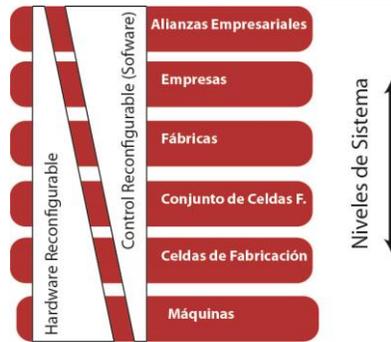


Figura 4: Organización del sistema y recursos reconfigurables (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008)

2.3 Tipos de RMS

Desde el punto de vista de hardware se han desarrollado diversos tipos de sistemas reconfigurables aplicados a la industria, a continuación se explican cada uno de los tipos de sistemas reconfigurables existentes según (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008), los cuales diseñados teniendo en cuenta los principios propuestos por (Mehrabi, Ulsoy, & Koren, 2000) y (Mehrabi M. , Ulsoy, Koren, & otros, 2002), estos sistemas son:

Sistemas Reconfigurables de Mecanizado. Tienen más de una década en el mercado y ya poseen estandarización internacional en cuanto el diseño y fabricación de unidades modulares. Las máquinas herramientas modulares son usadas tradicionalmente para incrementar variantes de producto para los productores de máquina-herramienta, algunos usuarios finales a menudo compran máquinas-herramientas con una configuración específica, y esas máquinas rara vez son reconfiguradas luego de que se instalan, en la Figura 5 se muestra un ejemplo de un sistema reconfigurable de mecanizado.

En esta categoría también se encuentran las máquinas de cinemática paralela (PKMs) (Cooke, y otros, 1995), (Bostelman, Jacoff, Proctor, Kramer, & Wavering, 2000), (Fassi & Wiens, 2000), (Katz, Li, & Pierrot, 2002), aunque actualmente no existen teorías y metodologías para su desarrollo comercial. Nuevos diseños de máquinas han sido estudiados por la Universidad de Michigan y aplican los principios de diseño expuestos por (Koren, y otros, 1999) con el fin de desarrollar máquinas capaces de reconfigurarse frecuentemente en un ambiente de rápidos cambios de requerimientos.

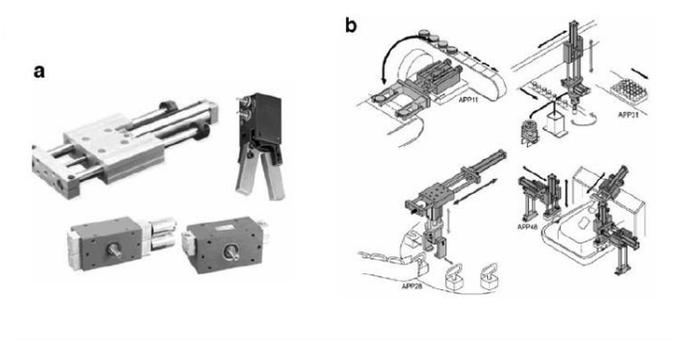


Figura 5: Esquema de un sistema reconfigurable de mecanizado. a) Módulos, b) Distintas configuraciones posibles (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008)

Sistemas Reconfigurables de Fijación. Se estudian desde 1960, cuando se iniciaron los diseños en fijaciones modulares para maquinaria. Un sistema de fijación modular está compuesto de varios módulos incluyendo localizadores, abrazaderas y conectores, en la Figura 6 se muestra un ejemplo de un sistema de fijación modular propuesto por Bi (Bi & Zhang, 2001). Algunos sistemas reconfigurables de fijación se han aplicado a robots industriales, que desarrollan programaciones específicas de tareas y son muy útiles por su flexibilidad (Benhabib, Chan, & Dai, 1991), (Shirinzadeh, 1993).

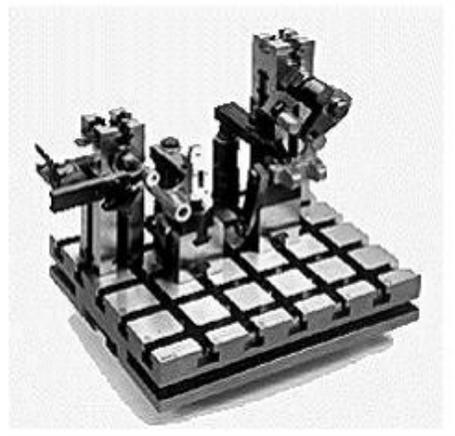


Figura 6: Sistema de fijación modular reconfigurable (Bi & Zhang, 2001)

Sistemas Reconfigurables de Ensamble. Son sistemas robotizados (Giusti, Santochi, & Arioti, 1994), (Arai, Aiyama, Sugi, & Ota, 2001), (Heilala & Voho,

2001), (Sugi, Maeda, Aiyama, & Arai, 2001). El número y tipos de equipamiento para ensamble son cambiados para adaptarse a los cambios de requerimiento de los productos. La reconfigurabilidad del sistema se logra si un sistema robótico puede ser modularizado por sí mismo. Algunas otras aplicaciones incluyen robots para calibrar sistemas de ensamble automáticamente y reducir el tiempo de entrada de un producto al mercado (ramp-up time). Por otro lado en esta área Mehrabi & Kannatey-Asibu (Mehrabi & Kannatey-Asibu, 2001) desarrollaron un sistema de monitoreo multi-sensor para incrementar la capacidad de diagnóstico del sistema.

A continuación se muestran dos ejemplos de sistemas de ensamble reconfigurable. En la Tabla 7 se muestra un ejemplo de sistema reconfigurable de ensamble para trabajo grupal, y en la Figura 8 un sistema reconfigurable híbrido con sistema de mesa giratoria.

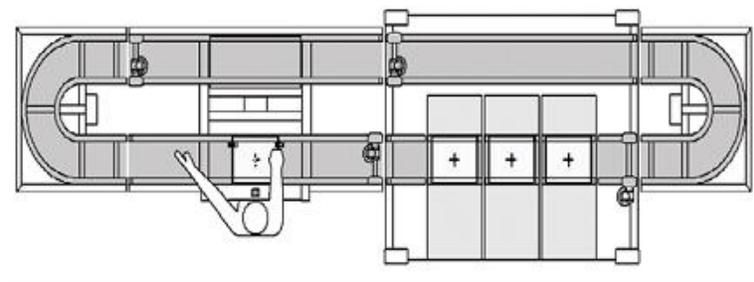


Figura 7: Sistema de Ensamble Reconfigurable (Técnica de Grupo) (Wiendahl H. , y otros, 2007)

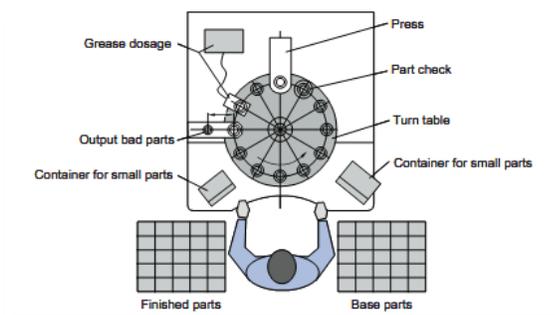


Figura 8: Sistema Híbrido de Ensamble con mesa giratoria (Hartel & Lotter, 2006)

Sistemas Reconfigurables de Manipulación de Material. Aún se encuentran en fase de desarrollo, algunos autores como Fukuda & Takagawa (Fukuda &

Takagawa, 2000) han diseñado sistemas de transferencia flexibles para un gran número de variantes de producto. Los componentes principales del sistema son robots autónomos. Otros autores como Ho & Ranky (Ho & Ranky, 1997) desarrollaron un sistema de bandas transportadoras reconfigurables que permite cambiar el volumen de producto en tiempo real. En Canadá el ATS (Sistema Automatización de Herramientas) desarrollo un sistema transportador programable, el cual permite el paso de material de un lugar a otro mediante el uso de paletas (Mellor, 2002). En la Figura 9 se muestra un esquema de máquina reconfigurable de procesamiento de material y diferentes rutas de procesamiento posibles.

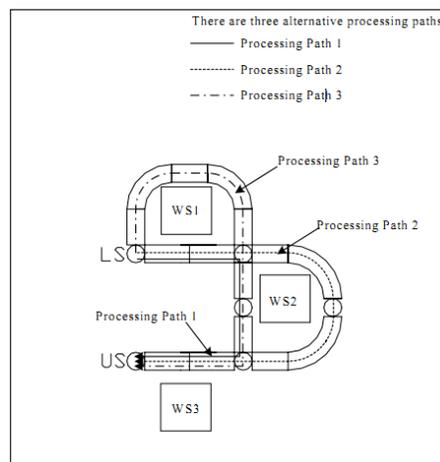


Figura 9: Esquema Sistema reconfigurable de procesamiento de material con sus diferentes patrones de procesamiento posibles (To & Ho, 2001)

Sistemas Reconfigurables de Alto nivel. En esta categoría se encuentran los sistemas a nivel de conjuntos de celdas de fabricación (shoopfloor Systems). Este tipo de sistemas están conformados por varias celdas que a su vez incluyen varias estaciones de trabajo que se dedican a una función en particular. Ejemplo de esto es el RMS desarrollado por Chen (Chen, 2001) que usa varios robots modulares para un sistema de ensamble. En la Figura 10 se observa un sistema robótico deslizando paralelo RPRS propuesto por Bi (Bi & Zhang, 2001).



Figura 10: Sistema robótico deslizante paralelo RPRS de 6 Grados de Libertad (Bi & Zhang, 2001)

2.4 Principios de Diseño para RMS

Diversos autores han identificado y propuesto características y principios fundamentales con los cuales debe cumplir todo sistema reconfigurable, utilizando estas características y principios es posible delimitar los aspectos más importantes en el diseño de estos sistemas, a continuación se muestran las características más importantes de los sistemas de fabricación reconfigurables, propuestas por Koren (Koren, y otros, 1999) Mehrabi (Mehrabi, Ulsoy, & Koren, 2000), Katz (Katz R. , 2007) y Wiendahl (Wiendahl H. , ElMaraghy, Nyhuis, Zah, Duffie, & Brieke, 2007) los cuales proponen diferentes principios con los cuales debe cumplir un sistema de fabricación reconfigurable, estos son:

- *Diseño enfocado a una familia de productos*; Un sistema reconfigurable es diseñado en base a una familia de partes de productos específica en la cual los productos compartan parámetros geométricos, procesos de fabricación o funcionalidades.
- *Modularidad*: diseñar todos los componentes del sistema, tanto hardware como software para que sean modulares y permitan intercambiabilidad de componentes.
- *Integrabilidad*: diseñar los sistemas y componentes para integraciones inmediatas y la introducción futura de nuevas tecnologías.
- *Convertibilidad*: permitir el rápido intercambio entre productos existentes y la rápida adaptabilidad para productos futuros.
- *Capacidad de Diagnóstico*: identificar rápidamente las fuentes de problemas de calidad y confiabilidad que ocurren en sistemas grandes.

- *Escalabilidad:* Una máquina reconfigurable es diseñada para ser escalable, es decir, que permita la adición o remoción de elementos que incrementan la productividad o eficiencia de la operación.
- *Personalización:* diseñar el sistema con flexibilidad y capacidad (en hardware y controles) para cumplir con la aplicación requerida (familia de productos).
- *Flexibilidad:* El sistema debe ser diseñado para permitir flexibilidad funcional y estructural, lo cual se obtiene adicionando, removiendo e intercambiando componentes para adaptarse a las variaciones de los parámetros del sistema.
- *Movilidad:* El sistema no debe restringirse a ser utilizado en un mismo lugar, debe contar con la capacidad de mover sus componentes, máquinas etc. dentro de la estructura de producción del sistema. Dentro de una celda de fabricación los módulos deben estar en la capacidad de ser utilizados en diferentes etapas del proceso.
- *Uso de la misma estructura básica:* Un sistema de máquinas reconfigurables es diseñado para permitir reconfiguración de máquinas que puedan operar en diversas locaciones de la línea de producción usando la misma estructura básica (principio válido para sistemas de fabricación compuesto por varias máquinas).
- *Universalidad:* El sistema debe ser diseñado para que el dimensionamiento de los componentes se haga teniendo en cuenta las tecnologías actuales. El sistema se debe diseñar para que se permita una fácil intercambiabilidad de consumibles, partes, herramientas y materias primas.
- *Compatibilidad:* El sistema debe ser diseñado para permitir la compatibilidad entre los flujos de energía, material, material e información y los diferentes componentes que interactúan entre dichos flujos. Las interfases entre los componentes del sistema deben estandarizarse y diseñarse para una fácil adaptación de hardware y software.

Mediante estos principios cumple el objetivo de los sistemas de fabricación reconfigurables. Los autores mencionados proponen estos criterios enfocándose al nivel de sistema Máquina, sin embargo su aplicación es válida para el resto de niveles de sistema mencionados anteriormente. Con el fin de diferenciar las propuestas de los diferentes autores mencionados a continuación en la Tabla 3 se resumen los criterios propuestos y abarcados por los autores estudiados.

Tabla 3: Principios de Diseño para RMS a partir de diferentes autores

Principio funcional y de Diseño	Koren 1999	Mehrabi 2000	Wiedahl 2003	Katz 2007
<i>Diseño para una familia de Productos</i>				■
<i>Modularidad</i>	■	■	■	■
<i>Integrabilidad</i>	■	■		
<i>Convertibilidad</i>	■	■		■
<i>Diagnosticabilidad</i>	■	■		
<i>Escalabilidad</i>	■		■	■
<i>Personalización</i>		■		
<i>Flexibilidad</i>				■
<i>Movilidad</i>			■	
<i>Uso de la misma estructura básica</i>				■
<i>Universalidad</i>			■	
<i>Compatibilidad</i>			■	

Convenciones:

□ No Considerado ■ Considerado

Como se observa en la Tabla 3 es posible observar cómo han cambiado con el tiempo y con diferentes autores las consideraciones de diseño para RMS. Cabe resaltar que el único criterio común entre los cuatro autores estudiados es la modularidad, convirtiéndose en un criterio fundamental que siempre se ha considerado para obtener reconfiguración de un sistema. Las últimas tendencias en diseño de RMS se centran en el diseño para familias de producto, uso de la misma estructura básica del sistema y flexibilidad.

2.5 Modularidad en el Diseño de RMS

Como el principio fundamental y de mayor utilización y estudio por diferentes autores el concepto de modularidad es un tópico de mucho interés para abarcar el diseño de sistemas reconfigurables. Diversos autores asemejan el concepto de RMS con el de “Fabricación Modular” (Tsukune, y otros, 1993), “Sistemas de Fabricación basados en componentes” (Weston, 1999), “Sistemas de Productos Modulares” (Rogers & Botacci, 1997) y “Fabricación Modular Flexible” (Kaula, 1998).

En el diseño de RMS la modularidad se ha implementado en el desarrollo de máquinas-herramientas, desde hace dos décadas se han diseñado y fabricado maquinaria con capacidad de cambiar de configuración a partir de la adición, sustracción y sustitución de módulos en los cuales se ha centrado la reconfiguración. Del mismo modo se han aplicado enfoques de modularidad a sistemas de fijación y sistemas de ensamble, sin embargo se requiere mayor

investigación y desarrollo para obtener diseños robustos y modularizar completamente sistemas robotizados para llevar a cabo estas labores (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008).

Entre los autores más destacados en la aplicación de modularidad se encuentra (Galán, Racero, Eguia, & Canca, 2007) el cual a partir de análisis matricial propone una metodología de diseño para RMS basada en modularidad para celdas de fabricación. Básicamente consiste en concentrar los productos a fabricar en familias o agrupaciones, teniendo en cuenta los criterios de costos de reconfiguración y reusabilidad de cada una de las configuraciones generadas.

Pocos autores han abarcado el tema de la modularización como el eje central de la reconfiguración de cualquier sistema, se observa en las diferentes investigaciones estudiadas el uso de módulos para ajustar el grado de respuesta de sistemas de fabricación, añadiendo funciones o incrementando el nivel de exigencia en la actividad específica del sistema en cualquiera de sus niveles.

2.6 Otros Aportes Metodológicos al diseño de RMS

Luego de hacer una revisión de estado del arte respecto a diseño de RMS se destacan principalmente diseños enfocados a máquinas-herramientas, siendo el principal campo de desarrollo de RMS en la actualidad y en el cual ya existen diseños validados y disponibles en el mercado. Sin embargo para el desarrollo de estos diseños no se emplearon metodologías formales de diseño de ingeniería. Se evidencian métodos de carácter intuitivo y en la mayoría de los casos basados en la experiencia del diseñador, lo cual permite que exista mucha subjetividad y falta de unificación en el proceso. Autores como Koren (Koren, y otros, 1999) y Bi (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008) han dividido el diseño de RMS en 3 etapas fundamentales:

Diseño de Arquitectura: donde se determinan los componentes y sus interacciones. Los componentes del sistema son los módulos, y las interacciones cada una de las opciones en las cuales los módulos se pueden ensamblar. En esta primera etapa se debe diseñar el sistema con el fin de producir la mayor cantidad de variantes del sistema que sean posible, de esta forma el sistema puede afrontar con los cambios e incertidumbres en los requerimientos rentablemente. En esta etapa la mayoría de los autores emplea acercamientos de tipo intuitivo tales como estudios de mercado y discusión, clasificación y entrevistas. Otras metodologías se encuentran aún en investigación y no son muy

comunes para el diseño de este tipo de sistemas, dentro de estas metodologías se encuentran el diseño axiomático, modelos estado-tiempo, simulación para diseño de sistemas basados en componentes, matrices multiatributos y métodos orientados a objetos (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008). En la Tabla 4 se muestran los principales autores para cada uno de los acercamientos mencionados.

Tabla 4: Acercamientos y Autores para el Diseño de Arquitectura Máquina-Herramienta Reconfigurable

Acercamiento/Método Empleado	Autores y año
Estudios de mercado y discusión	(Lee, 1997) (Kaula, 1998) (Koren, y otros, 1999) (Asl, Ulsoy, & Koren, 2000) (Mehrabi, Ulsoy, & Koren, 2000) (Mehrabi M. , Ulsoy, Koren, & otros, 2002) (Zhao, Wang, & Luo, 2000)
Clasificación	(Erixon, 1998) (Ueda, Markus, Monoston, Kals, & T, 2001)
Entrevistas	(Chick, Olsen, Sethuraman, Stecke, & White, 2000)
Diseño Axiomático	(Chen, 2001) (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008)
Modelos estado-tiempo	(Kuhnle, 2001)
Simulación	(Adolfsson, Olofsgard, Moore, Pu, & Wong, 2002)
Matrices multiatributos	(Kota & Chiou, 1992) (Tseng & Jiao, 1997)
Métodos orientados a objetos	(Moriwaki & Nonobik, 1994)

Diseño de Configuración: en esta etapa se establece la configuración del sistema bajo cada arquitectura de sistema dada para una tarea específica. Una configuración se define como un ensamble de módulos seleccionados y que puede cumplir con una tarea de forma óptima. Este diseño involucra dos aspectos fundamentales: el análisis de diseño y la síntesis de diseño, en el primer aspecto se establecen las rutas desde las variables de diseño hasta las restricciones de diseño y desde las variables de diseño hasta los objetivos del diseño. Mientras que en el segundo aspecto se busca encontrar una solución óptima para todas las configuraciones candidatas.

Las metodologías y acercamientos para el diseño de configuración dependen de la complejidad del sistema, el cual puede ser clasificado en: sistema desacoplado, sistema ligeramente acoplado y sistema fuertemente acoplado. En los sistemas desacoplados cada módulo corresponde a un requerimiento individual (p.e. un sistema de cómputo, donde el monitor es responsable del requerimiento de mostrar la interfaz y el teclado del requerimiento de entrada de datos). En un sistema ligeramente acoplado tal como un sistema de fijación, cada componente

corresponde a un requerimiento, pero algunos requerimientos dependen de todos los componentes (p.e. tolerancias, deformaciones). En un sistema fuertemente acoplado tal como un sistema de robot reconfigurable la función de un módulo no tiene relación directa con los requerimientos del sistema y todos los módulos tienen que ser considerados en conjunto para evaluar la capacidad del sistema en el cumplimiento de los requerimientos. En la Tabla 5 se muestran los principales autores en metodologías de acuerdo a la complejidad del sistema en el diseño de configuración:

Tabla 5: Acercamientos y Autores para el diseño de configuración en Máquina-Herramienta Reconfigurable

Complejidad del Sistema	Método / Acercamiento	Autores y Año
Sistema Desacoplado, Ligeramente Acoplado	Métodos basados en características Métodos basados en modularidad Métodos de Síntesis combinatoria Métodos Basados en Entidades Métodos Basados en Casos	(Perremans, 1996) (Tsai & Wang, 1999) (Levin, 2002) (Hong & Hong, 1998) (Watson, 1999)
Sistema Fuertemente Acoplado	Comportamiento del Sistema Diseño Concurrente Constantes Dinámicas y Cinemáticas	(Paredis & Khosla, 1993) (Paredis, 1996) (Leger, 1999)

Diseño de Control: en esta última etapa se establece las variables de proceso adecuadas (desplazamientos de juntas, velocidades etc. para las uniones entre los módulos) para que una configuración específica pueda cumplir con una tarea satisfactoriamente.

El diseño de control en RMS es uno de los tópicos más estudiados en la actualidad, convirtiéndose en uno de los retos más complejos que existen debido a la incertidumbre y variabilidad de las variables de proceso que se manejan. Según Bi (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008) el sistema de control de un RMS debe cumplir con los mismos principios de máquinas reconfigurables propuestos por Koren (Koren, y otros, 1999), es decir, debe ser autónomo, modular, abierto ante la introducción de nuevas variables, escalable, autoreconfigurable y con capacidad de autodiagnóstico.

El enfoque más utilizado por los autores en esta etapa de diseño son los sistemas de control de arquitectura abierta, los cuales proveen la infraestructura suficiente para desarrollar sistemas de control para RMS y cuya respuesta es bastante

aceptable, dentro de los principales autores que destacan el uso de este tipo de sistemas de control se encuentran Albus (Albus, 1993), Katz (Katz, Li, & Pierrot, 2002), Erol (Erol, Altintas, & Ito, 2000), Faulker (Faulkner, Levy, & Garner, 1999) y Pritschow (Pritschow, y otros, 2001).

2.7 Otros Acercamientos en la implementación de RMS en la Arquitectura de Productos.

A parte de las etapas de diseño para máquina-herramienta reconfigurable mostradas anteriormente algunos autores han propuesto acercamientos para añadir reconfigurabilidad a un sistema o máquina en general (no necesariamente máquina-herramienta), el caso de Galán (Galán, Racero, Eguia, & Canca, 2007), el cual propone el uso del algoritmo ALCA (Average Linkage Clustering Algorithm) para agrupar tecnologías y permitir la formación de familias de producto, y tiene en cuenta la modularidad, elementos comunes, compatibilidad, reusabilidad y demanda del sistema a través de modelos matriciales.

En el diseño de sistemas modulares orientados hacia reconfiguración de productos y su definición de arquitectura se encuentra dos métodos propuestos por Robert Stone:

- (Stone, 2000a): **Método Heurístico para la identificación de Módulos para arquitectura de productos.** En este método expone tres heurísticos para identificar la formación de módulos. Este autor emplea descomposición funcional y métodos heurísticos para obtener una selección óptima de los módulos.
- (Stone, 2000b): **Modelo Cuantitativo funcional para desarrollar arquitectura de productos.** En este estudio introduce una metodología para representar un modelo funcional de un producto de forma cuantitativa. Adicionalmente este modelo incluye la valoración de los requerimientos por parte del cliente y mediante manipulación numérica y de matrices obtiene un planteamiento de la arquitectura de producto para una familia de partes.

Además de existir métodos para agregar reconfigurabilidad también existen acercamientos enfocados a evaluar dicha reconfigurabilidad desde otros puntos de vista. Dentro de estos acercamientos se encuentran por ejemplo el propuesto por (Carnahan, Chung, & delaHostria, 2006), el cual evalúa la mejora de la sensibilidad del sistema hacia los cambios de requerimientos de mercado. (Abdi, 2009) propone un método de evaluación basado en lógica difusa (Fuzzy) mediante

un modelo multicriterio teniendo en cuenta la reconfigurabilidad del proceso de fabricación, el costo, la calidad y el rendimiento de la máquina. Otra forma de evaluación de la que se dispone es la propuesta por (Ahmed & ElMaraghy, 2007) en la cual se busca evaluar y optimizar la programación de un sistema reconfigurable desde el punto de vista de su capacidad de escalabilidad.

Otro tema a considerar y que está muy enfocado al diseño de RMS es el del diseño de las interfases entre los diferentes módulos que conforman un sistema o máquina, siendo un tema de importancia ya que la modularidad implica movilidad y facilidad de remoción, adición y sustitución de componentes. En esta área (Abele, Wörn, Fleischer, Wieser, Martin, & Klöpper, 2007) definen los principales parámetros de rendimiento para diseñar las interfases de componentes mecánicos de máquinas herramientas reconfigurables.

2.8 Tendencias y retos futuros para RMS

Una vez conocidas las tecnologías actuales y tópicos de interés, es importante establecer los aspectos hacia los cuales apuntan los próximos desarrollos en sistemas reconfigurables. A continuación se resumen las principales tendencias para RMS:

- Implementación de RMS como estrategia de producción ajustada, optimizando el uso de los recursos para una familia de productos específicos. Utilizando este tipo de sistemas de fabricación se reduce la subutilización del sistema, empleando lo necesario y ajustándose a los cambios de requerimientos (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008).
- El desarrollo de RMS apunta hacia el diseño de sistemas de control autónomos, distribuidos, escalables y autoreconfigurables capaces de adaptarse a los cambios en las interacciones software – hardware.
- Implementación y extensión de teorías de RMS a diferentes áreas de diseño, se observa que inicialmente se han desarrollado acercamientos en diseño y fabricación enfocados a Máquina-Herramienta y mecanizado, sin embargo se está extendiendo la implementación de RMS hacia otros tipos de sistemas y máquinas (ensamble, fijación, manejo de material, robótica industrial, etc.)

En cuanto a los retos futuros en el área de RMS se pueden mencionar:

- Aumentar la robustez de los sistemas de control para RMS, mediante algoritmos, software nuevos sistemas robóticos dinámicos y diseños de

nuevos actuadores y máquinas, generar controles adaptativos para aumentar la productividad de la máquina o sistema (Molina, y otros, 2005), (EIMaraghy, 2006).

- Desarrollo de metodologías sistemáticas para diseñar RMS y sus controladores, se requieren métodos que consideren todos los aspectos necesarios para la reconfiguración del sistema (tiempos, cambios de configuración, complejidad etc.) (Mehrabi, Ulsoy, & Koren, 2000), (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008).
- Evaluación del ciclo de vida para RMS teniendo en cuenta modelos económicos que permitan seleccionar alternativas de solución adecuadas y robustas de acuerdo a los requerimientos impuestos.(EIMaraghy, 2006).
- Generar métodos en medición y reducción de la complejidad de un sistema reconfigurable y técnicas de manejo (EIMaraghy, 2006).
- Generar modelos para medir cada una de las características fundamentales de RMS (Intercambiabilidad, flexibilidad, escalabilidad, Diagnosticabilidad etc.) y sus relaciones (EIMaraghy, 2006).
- El uso de tecnologías de grupo para capitalizar en estandarización de partes, secuencias de operación, estructuras de producto, plataformas, ingeniería y venta. Buscando la integración de la reconfigurabilidad en todas las áreas relacionadas con los procesos industriales. (EIMaraghy, 2006).

Capítulo 3. DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO

3.1 Modelos para Diseño de Ingeniería

Existen diversidad de tipos de modelos y métodos para el diseño de ingeniería, entre los más utilizados y con mayor aceptación se destacan los modelos de fases, en los cuales se plantea un patrón concreto de actividades a realizar para desarrollar y alcanzar una solución al problema de diseño. Una de las ventajas más sobresalientes de este tipo de modelos es el énfasis en la necesidad de un trabajo analítico y sistemático para proceder a la generación de conceptos de soluciones, identificando y entendiendo completamente la problemática y garantizando que las soluciones definidas sean acertadas (Ferrer, 2007).

Los modelos de fases aparte de ser los más utilizados en la actualidad también son aquellos que poseen mayor desarrollo investigativo, ofrecen un enfoque sistemático por etapas, el cual facilita el desarrollo y entendimiento del proceso de diseño. Una de sus grandes potencialidades es que especifican como se estructura el proceso de diseño para conseguir el producto final y proporcionan una idea general de la información que hay que obtener en cada una de las fases (llamadas entradas y salidas de cada fase) (Ferrer, 2007).

Las propuestas metodológicas expuestas por la mayoría de los autores estructuran básicamente cuatro fases comunes o generales entre sí, la *fase de ideación*, *fase de Desarrollo Conceptual y Básico*, *fase de Desarrollo Avanzado y Lanzamiento*. Dentro de los principales modelos que adoptan esta estructura se encuentra el de Pahl & Beitz (1977), Pugh (1991), Ullman (1992) y la guía alemana VDI 2221/2222 (1973), las cuales a pesar de no tener fronteras entre las fases claramente definidas y no son abordadas explícitamente por todos los autores pueden considerarse globalmente en estas cuatro etapas. A continuación se definen cada una de estas etapas (Farias, Aca, Molina, Maury, & Riba, 2006).

i) Ideación: en esta primera fase se realiza una definición de las necesidades del mercado y se definen completamente los requerimientos del producto. Suelen dividirse estas actividades por áreas como mercadotecnia. En esta etapa también suelen realizarse planes detallados de trabajo para todo el equipo de diseño y que permiten identificar la concurrencia entre todas las actividades.

ii) Desarrollo Conceptual y Básico: en esta etapa se desarrollan las alternativas de solución sobre el producto funcional. Con el fin de alcanzar esto se realizan

actividades analíticas que permiten comparar productos análogos o principios básicos que pueden ser de utilidad en el desarrollo del concepto a tratar; actividades de síntesis, que integran los principios o ideas para generar las alternativas conceptuales; y actividades de simulación y evaluación para estimar el comportamiento de las alternativas generadas y seleccionar las mejores. Según Pahl y Beitz (1977) y VDI 2221, en esta etapa se determina la estructura constructiva del producto o sistema, lo que significa definir la composición y organización de los subsistemas y sus especificaciones para que a partir de ello se pueda proceder al diseño de detalle de las piezas o componentes (Riba, 2002).

iii) Desarrollo Avanzado: esta fase involucra todas las actividades que ofrecen como resultado documentos de ingeniería detallados que son la base para la fabricación del producto. También se conoce por otros autores como Diseño de Detalle

iv) Lanzamiento: En esta última fase se fabrican prototipos para evaluar el diseño e incluso, se diseña el proceso de producción y se comienza con la fabricación del producto. No todos los modelos clásicos por etapas abordan esta fase.

Para diferenciar estas etapas y la concepción estructural de los modelos de fase clásicos, se resumen dichos modelos y su estructura de desarrollo en la Tabla 6.

Tabla 6: Estructura General Modelos de Diseño de Ingeniería por Fases según diversos autores. (Farias, Aca, Molina, Maury, & Riba, 2006)

Fases Globales (Farias, Aca, Molina, Maury, & Riba, 2006)	(Pahl, Beitz, Wallace, Blessing, & Bauert, 1996)	(Dieter, 2000)	(Pugh, 1991)	(Ullman, 1992)
Ideación	Clarificación de la tarea	Mercado Especificación	Establecimiento de la necesidad Desarrollo/Planeación de las especificaciones	Clarificación de la tarea
Desarrollo conceptual y básico	Diseño conceptual Diseño básico o de materialización	Diseño del concepto	Desarrollo de conceptos	Diseño Conceptual Diseño de Forma
Desarrollo Avanzado	Diseño Detallado	Diseño detallado	Diseño del producto	Diseño Detallado
Lanzamiento	No incluida	Manufactura Ventas	Producción, Servicio, Retiro	No incluida

La metodología propuesta en esta investigación se basa en los modelos de fase mostrados en anteriormente, tomando como punto de partida las cuatro fases principales de dichos modelos (especificación inicial, diseño conceptual, diseño básico y diseño de detalle). Al agregar principios de reconfigurabilidad, arquitectura modular y RMS sea añaden nuevas fases denominadas *Especificación Derivada para Reconfiguración* y *Diseño Preliminar de Módulos y Configuraciones*. De la misma forma que se modifica la fase de diseño conceptual agregando nuevas tareas que permiten definir preliminarmente la modularidad del sistema a diseñar (*Diseño Conceptual y Análisis de Modularidad*). Estas nuevas fases y tareas en la metodología propuesta tienen como fin complementar las actividades en los modelos tradicionales con aspectos relacionados con teorías de familias de producto, la identificación de las variables asociadas a la reconfiguración del sistema y la definición de la arquitectura modular más adecuada para el diseño.

Es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones para el desarrollo y aplicación de la metodología propuesta:

En el modelo propuesto cuando se hace referencia a Sistemas Reconfigurables de Fabricación (RMS) se debe considerar la clasificación hecha por Bi (Bi, Lang, Sheng, & Wang, 2008), en la cual se enlistan los diferentes tipos de RMS existentes. Dichos sistemas no necesariamente están asociados a la transformación de materia prima, sino que también pueden relacionarse con la manipulación de material, actividades de ensamble y fijación.

El modelo desarrollado en esta investigación se enfoca a la fabricación de una familia de productos, por lo cual es requisito fundamental y necesario que los productos a fabricar compartan ya sea características geométricas, funcionales, de procesos de fabricación entre otras. Es importante establecer las características de la familia de productos que determinan las variaciones funcionales y que definen la reconfiguración del sistema, en la medida que existan cambios en cuanto a los flujos funcionales o en las *Variables de Reconfiguración* (VR) dentro del portafolio de productos, también se afectará la arquitectura del sistema y las soluciones que se obtengan para cada una de las funciones y subfunciones del mismo.

En la descripción de las etapas de los modelos de diseño tradicionales se definen la mayor parte de conceptos y definiciones según lo planteado por (Dieter, 2000) y

(Maury, 2000) los cuales exponen con claridad y objetividad cada una de las tareas que se llevan a cabo en dichas etapas.

Las *Variables de Reconfiguración* (VR) tendrán valores límites impuestos por restricciones espaciales, técnicas y económicas. La reconfigurabilidad que se estipula en el proceso de diseño planteado debe ser delimitada por el diseñador y determinada a partir de las especificaciones iniciales y la familia de productos a fabricar.

3.2 Descripción de la Metodología para el Diseño Conceptual de Sistemas Reconfigurables de Fabricación.

El modelo desarrollado consta de 4 etapas principales, en cada fase se agrupan tareas o procedimientos que van aportando información a lo largo del proceso de diseño hasta su finalización. En la Figura 11 se muestra el esquema fundamental del modelo.



Figura 11: Diagrama General Metodología Propuesta

A continuación en la Figura 12 se muestra la metodología propuesta dividida en cada una de sus etapas con sus respectivas tareas y procedimientos. Posteriormente se detallan a profundidad cada una de las etapas, siguiendo el orden sistemático propuesto en esta investigación, cabe resaltar que existen actividades de diseño tomadas de las metodologías tradicionales y otras propuestas encaminadas a añadir aspectos fundamentales de reconfiguración y modularidad en el diseño.

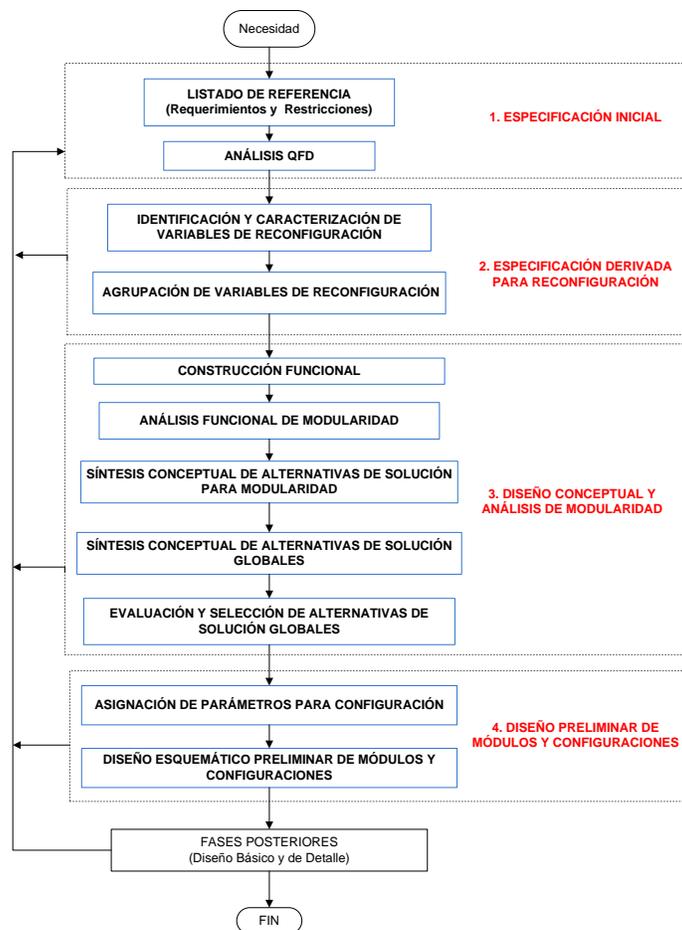


Figura 12: Modelo de Diseño para RMS propuesto en la investigación

En la figura anterior se detallan procedimientos y tareas en cada etapa de la metodología de diseño propuesta, nótese que el alcance de la metodología es definir hasta una etapa preliminar básica el comportamiento funcional y físico del sistema. Las etapas posteriores de Diseño Básico y Diseño de Detalle siguen los

mismos principios y tareas de las metodologías tradicionales que se encuentran en la literatura.

A continuación se describen cada una de las fases y actividades del modelo propuesto y se establece el alcance de cada una de ellas:

Etapa 1: Especificación Inicial

El propósito de la especificación inicial en los modelos de fase tradicionales es lograr definir las especificaciones (requerimientos y restricciones) iniciales de ingeniería a partir de información general respecto a la necesidad, esta información puede obtenerse de varias formas entre las cuales se destacan estudios de mercado, fuentes secundarias, cuestionarios técnicos entre otros.

En el modelo propuesto se ha dividido esta etapa en dos tareas principales que son: el establecimiento del listado de referencia para el diseño y la jerarquización de las variables de ingeniería a partir del análisis QFD (Quality Function Deployment) para el proceso de diseño. A continuación se definen cada una de estas tareas.

a. Establecimiento del Listado de Referencia para el Diseño (Identificación de Requerimientos y Restricciones)

Esta primera tarea tiene como propósito cualificar y cuantificar o caracterizar el desempeño que se espera de la solución deseada en términos de ingeniería. Se pueden diferenciar tres tipos de elementos fundamentales para tener en cuenta:

- Requisitos Funcionales: elementos que describen el desempeño ideal o propuesto para la solución, se pueden clasificar en: Obligatorios (los que deben ser satisfechos necesariamente por las soluciones que se consideren válidas) y los Deseables (si se cumple se le añade un valor adicional a la solución).
- Criterios de Diseño: aspectos o elementos que se deben considerar en la evaluación y selección de las soluciones con la importancia que se definan (peso relativo).
- Restricciones: limitantes jurídicas, ambientales, económicas, de normas o códigos que se deben tener en cuenta en el desarrollo de las soluciones. Ayudan a delimitar el espacio de búsqueda, por lo cual acotan y facilitan la definición de las mismas.

Se propone la utilización del método de listado de referencia para describir en detalle cada uno de los requerimientos de diseño, se deben tener en cuenta los

requisitos funcionales, los criterios de diseño y las restricciones existentes. Entre los aspectos principales que se deben considerar para obtener un listado de referencia completo son: Funcionamiento, Materiales de Trabajo, Materiales de Fabricación, Vida Útil, Seguridad, Costo, Transporte, Apariencia, Peso y Volumen y Aspectos Legales.

En el listado de referencia es recomendable establecer si el requerimiento es estipulado por el cliente, el grupo de ingeniería o ambos; del mismo modo se debe definir si cada requerimiento es obligatorio o deseado. Desde el punto de vista de ingeniería es importante añadir también un valor meta para cada requerimiento en particular; esto facilita la evaluación de cada una de las alternativas de diseño que puedan surgir.

b. Diseño para Calidad (Análisis QFD)

Esta segunda tarea permite asegurar la calidad de un producto en cuanto a sus características y ayuda a identificar cuales atributos mejorar para obtener la mejor calidad del producto respecto a lo deseado por el cliente. Esta actividad se considera fundamental, ya que permite enfocar el diseño hacia lo que el cliente verdaderamente necesita, ofrece al equipo de diseño las herramientas para decidir sobre los aspectos más importantes a resaltar para lograr el éxito del producto en el mercado, adicionalmente se tiene en cuenta la competencia para realizar este análisis, por lo cual representa ir un paso adelante del resto de competidores. Gracias a esta actividad se determinan los aspectos hacia los cuales se orientará principalmente el diseño con el fin de satisfacer los requerimientos del cliente y conseguir una aceptación y sostenimiento del diseño en el mercado.

Como entregable de esta primera etapa o fase se debe desarrollar el Listado de Referencia y el análisis de QFD que arroja la jerarquización de los aspectos de ingeniería para tener en cuenta a lo largo del proceso de diseño.

Etapa 2: Especificación Derivada para Reconfiguración

Esta tarea es agregada al modelo con el fin de dedicar esfuerzos en la determinación los atributos de la familia de productos o portafolio a tener en cuenta para el diseño y de su conjunto de Variables de Reconfiguración (VR). Las especificaciones de la familia de productos deben permitir diferenciar cada uno de los productos dentro de sus variables de ingeniería (tamaño, funcionamiento, materiales de fabricación, procesos de fabricación, etc.).

En la fabricación de familias de productos la variedad de las especificaciones y requerimientos es mayor, debido a esto los RMS se desarrollan para abarcar mayores variaciones de los mismos en lapsos cortos. Es posible encontrar tres escenarios para categorizar y agrupar los requerimientos de reconfiguración a partir de la familia de productos o portafolio a fabricar:

- **Categorización de requerimientos según los segmentos de mercado:** se da en el caso de que cada variable de producto en particular pertenezca a un segmento de mercado diferente (p.e. sector alimenticio, industrial etc.). Las variantes de producto poseen requerimientos básicos comunes y otros diferenciadores específicos dentro de la familia. Es común encontrar que los requerimientos diferenciadores se traduzcan en componentes específicos y variaciones funcionales que pueden conducir al desarrollo de módulos específicos.
- **Categorización de requerimientos para un segmento de mercado con diferentes niveles de exigencia en el desempeño:** esta situación se presenta cuando sólo se fabrican productos para un segmento, por lo general con las mismas especificaciones o requerimientos pero con distinto nivel de exigencia dentro de la familia de productos. Por ejemplo, diferentes tamaños de intercambiadores de calor para el segmento de refrigeración industrial, en este caso existen únicamente cambios en el nivel de exigencia en cuanto al tamaño. Además de estas consideraciones de exigencia es importante que se tengan en cuenta los distintos escenarios de uso del sistema a lo largo de su ciclo de vida, considerando los distintos modos de operación posibles (Uso normal, Stand by, Mantenimiento, Instalación etc.)
- **Categorización de requerimientos para un escenario de Demanda Mixta:** esta situación es una combinación de las dos anteriores, donde existen requerimientos diferenciadores tanto en segmentos de mercado como en niveles de exigencia, este grupo de requerimientos o especificaciones presenta la mayor complejidad debido al gran número de variantes posibles dentro de la familia de productos o portafolio.

a. Identificación y Categorización de Variables de Reconfiguración (VR)

La metodología propuesta busca definir la arquitectura funcional y modular del sistema a diseñar, dicha arquitectura depende del comportamiento de las VRs de

una familia o portafolio de productos. En esta actividad se analizan las VR desde el punto de vista de su naturaleza y tipo de variación.

En esta actividad se deben definir los siguientes elementos de análisis:

- **Segmentos de Mercado (1,2...j):** un portafolio de productos puede estar orientado hacia diferentes segmentos de mercado, en cada segmento es posible encontrar elementos diferenciadores en la parte funcional, procesos de fabricación, materiales, aspectos geométricos etc.
- **Tipos de VR involucradas (Naturaleza del tipo de Variable):** describe la naturaleza del tipo de variables del portafolio de producto que conducen a la reconfiguración del sistema. Estas pueden clasificarse en: Variables Geométricas (VG), Variables de Potencia (VP), Variables de Flujo (VF), Variables Operacionales (VO) y Variables de Manejo de partes (VM). En la
- Tabla 7 se muestran algunos ejemplos de estos tipos de variables.

Tabla 7: Tipos de VRs y parámetros que representan

TIPO DE VRs	Parámetro de Ingeniería
<i>Variables Geométricas (VG)</i>	Alto, Ancho, Profundidad
<i>Variables de Potencia (VP)</i>	Voltajes, Corrientes, Fuerzas
<i>Variables de Flujo (VF)</i>	Flujo Volumétrico, Flujo Másico
<i>Variables Operacionales (VO)</i>	Procedimientos sobre el producto (Operaciones, funciones o procedimientos adicionales)
<i>Variables de Manejo de Partes (VM)</i>	Partes o componentes

- **Números de Productos:** el número de productos junto con la cantidad de variaciones de las VRs dentro del portafolio determina en gran medida la criticidad de reconfiguración del sistema a diseñar.
- **Número de variaciones de VRs (1,2..n):** indica la complejidad del portafolio de productos desde el punto de vista de variaciones entre productos.

- **Valores de VR en cada nivel (1,2..m):** son los valores de los parámetros de ingeniería que existen en cada variación de VR. Estos parámetros en el proceso de diseño definen la distribución y comportamiento del sistema en los módulos y configuraciones que resulten.

En la Tabla 8 se muestra un formato propuesto para identificar y clasificar los elementos mencionados anteriormente dentro de una familia o portafolio de productos.

Tabla 8: Formato Propuesto para identificar y clasificar las VRs de una familia o Portafolio de Productos.

Segmento de Mercado	Número de Productos	Tipo de VR	Cantidad VR	Valor	Variables de Reconfiguración (VR)					
					1	2	3	4	...	n
					Var1	Var2	Var3	Var4		Varn
Segmento 1	V11						
				V12						
				V13						
				...						
				V1m						
.....						
				...						
				...						
				...						
Segmento j	Vj1						
				Vj2						
				...						
				Vjm						

Para realizar una caracterización formal se propone la Tabla 9, en la cual se resumen las características del escenario de fabricación del caso de diseño, a continuación se muestra la estructura de esta tabla y las posibilidades en cada criterio de caracterización.

Tabla 9: Resumen de caracterización del escenario de fabricación

Caracterización Escenario de Fabricación	Posibilidades
Comportamiento de VR	<ul style="list-style-type: none"> -Continua (Intervalo grande) -Continua (Intervalo Pequeño) -Discreta (pasos irregulares) -Discreta (pasos regulares e intervalo grande) -Discreta (pasos regulares e intervalo pequeño)
Tipo de Variación Esperada	<ul style="list-style-type: none"> -Rango Actual -Rango Actual con variación leve -Variaciones fuera del rango -Valores puntuales dentro del rango -Valores puntuales fuera del rango -No hay valores comunes
Amplitud del Rango de VR	Depende del caso de diseño
Necesidad de independencia del sistema	<ul style="list-style-type: none"> -Independencia total -Independencia general >75% -Independencia parcial alta 50-74% -Independencia parcial baja 25-49% -Dependiente
Vida útil esperada	-Número de lanzamientos de portafolio de producto esperados
Tipo de Arquitectura	<ul style="list-style-type: none"> -Arquitectura fija -Arquitectura no definida (aleatoria)
Variedad Funcional	<ul style="list-style-type: none"> -Modularización de una única función -Modularización de múltiples funciones

Esta caracterización servirá posteriormente para establecer el principio de arquitectura modular adecuado para el sistema. Es importante tener en cuenta que no todos estos criterios son necesarios para definir el escenario de fabricación, esto dependerá del tipo de variación requerida (variación en el nivel de exigencia, variación funcional o variación mixta).

b. Agrupación de Variables de Reconfiguración

Una vez se han identificado las *Variables de Reconfiguración* y su comportamiento es necesario establecer al menos de forma preliminar las posibles configuraciones que será necesario desarrollar para poder garantizar que el sistema alcance todas las variaciones impuestas inicialmente a partir de los parámetros del portafolio o familia de productos.

Esta actividad se ha dividido en dos tareas principales: la jerarquización de la criticidad en la reconfiguración y la agrupación de productos en grupos a partir de su similitud. A continuación se describen estas tareas.

i) Jerarquización de Criticidad en la Reconfiguración

Una vez se han identificado y las VR se procede a jerarquizarlas con el fin de reducir la complejidad del sistema desde el punto de vista de modularidad. Se debe buscar una reconfiguración basada la priorización de las VRs críticas (variables o parámetros con mayor afectación en la reconfiguración del sistema). Al jerarquizar las VRs se disminuye la complejidad del sistema desde el punto de vista funcional, ya que limita la reconfiguración que se establecerá posteriormente una vez se establezcan las subfunciones de plataforma y las subfunciones de reconfiguración.

En esta metodología se propone la utilización de un indicador del grado de complejidad de reconfiguración (G_{CR}) de cada VR mediante la cantidad de niveles de cada una de las ellas (N_N), el tipo de variación de VR (fija, semifija o irregular) y una constante k que mide la influencia de las variables en un cambio de portafolio de productos. En la Tabla 10 se muestra la valoración para el tipo de variación de VRs y en la Tabla 11 se muestra la valoración para los niveles de la constante de influencia.

Tabla 10: Valoraciones y niveles para el tipo de variación de VR.

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Irregular	No existe una variación establecida, no hay pasos definidos entre los valores del parámetro.
3	Semi-fija	Existe al menos dos valores de pasos dentro del portafolio de productos.
1	Fija	Existe un único valor de paso dentro del portafolio de productos.

Tabla 11: Valoraciones y Niveles para la constante de influencia K

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Fuerte	El parámetro influye drásticamente sobre la funcionalidad del producto.
3	Media	El parámetro influye levemente sobre la funcionalidad del producto.
1	Débil	El parámetro no influye en la funcionalidad del producto.

La ecuación para calcular el grado de complejidad se muestra a continuación (Ver Ec. 1).

$$G_{CR} = \sqrt[3]{N_n * T_{VR} * k} \quad (\text{Ec. 1})$$

Una vez se tengan jerarquizadas las VR se deberá asegurar principios de solución de acuerdo a la arquitectura modular, centrándose en las subfunciones con mayor criticidad en la reconfiguración.

ii) Agrupación de productos de acuerdo a su similaridad

Para esta tarea se utiliza la metodología para añadir reconfigurabilidad propuesta por (Galán, Racero, Eguia, & Canca, 2007), el cual propone la utilización de un algoritmo de agrupación (ALCA: Average Linkage Clustering Algorithm) para determinar la mejor distribución de los productos en grupos que faciliten su fabricación y que permitan minimizar los costos que involucran pasar de una configuración determinada a otra. A continuación se describe el procedimiento utilizado según Galán para determinar de forma preliminar las configuraciones a partir de la agrupación de las variables de los productos.

iii) Matriz de Similaridad de Jaccard: a partir de las variables de reconfiguración identificadas es posible generar una matriz de similaridad para comparar todos los productos entre sí. Para ello se emplea la Ecuación 2, la cual corresponde al Coeficiente de Similaridad de Jaccard, el cual se emplea para establecer similaridad a partir de atributos en común entre diferentes elementos, en este caso de esta metodología se usa para analizar los parámetros asociados a las VR dentro de la familia de productos y permitir agruparlos. Este coeficiente se define como:

$$S_{mn} = \frac{a}{a+b+c} \quad 0 \leq S_{mn} \leq 1 \quad (\text{Ec.2})$$

Donde a representa el número de procesos, componentes o variables (VR) que comparten los productos m y n , b indica el número de procesos, componentes o variables geométricas que sólo posee el producto n , y c el número de procesos, componentes o variables geométricas que sólo posee el producto m . A medida que S_{mn} se aproxime a 1 se considera que los productos poseen una alta similaridad y pueden agruparse. Un ejemplo de una matriz de coeficientes de Jaccard se muestra continuación en la

	Producto 2	Producto 3	Producto n
--	------------	------------	-------	------------

Tabla 12:

Producto 1	$S_{1,2}$	$S_{1,3}$	.....	$S_{1,n}$
Producto 2		$S_{2,3}$	.....	$S_{2,n}$
Producto 3			.....	$S_{3,n}$
.....

Tabla 12: Ejemplo de Matriz de Similitud para n productos

	Producto 2	Producto 3	.....	Producto n
Producto 1	$S_{1,2}$	$S_{1,3}$	.....	$S_{1,n}$
Producto 2		$S_{2,3}$	.....	$S_{2,n}$
Producto 3			.....	$S_{3,n}$
.....

Una herramienta que facilita la organización de los elementos que pueden presentar en común los productos dentro de la familia de productos es la utilización de una matriz de descomposición de producto, la cual puede hacerse a partir de cualquier VR. En la Tabla 13 se muestra el esquema de dicha matriz para 4 productos (A, B, C y D) y 9 elementos de similitud (VR).

Dicha matriz de descomposición de producto se hace comparando cada producto contra los elementos de interés presentes en la familia de productos, en este caso las VR. Se emplea el parámetro a_{ij} para identificar la celda de evaluación, su valor será igual a 1 si el producto i contiene el elemento j y será 0 si no contiene el elemento.

Tabla 13: Matriz de

	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
A	a_{A1}	a_{A9}	Estructura de
B	a_{B1}	...	...	...	...	...	...	...	...	a_{B9}
C	a_{C1}	...	...	...	...	...	...	...	...	a_{C9}
D	a_{D1}	...	...	...	...	...	...	...	...	a_{D9}

Descomposición de Productos

iv) Submatriz de Agrupaciones: posteriormente a la obtención de la matriz de similitud de Jaccard se procede a generar agrupaciones de los productos que posean el mayor coeficiente de similitud hasta llegar a un solo conjunto de productos (Familia de productos completa). Para obtener estas agrupaciones se emplea una submatriz a partir de valores de similitud calculados a partir de la siguiente ecuación (Ec. 2):

$$S_{ij} = \frac{\sum_{m \in i} \sum_{n \in j} S_{mn}}{N_i \cdot N_j} \quad (\text{Ec 2.})$$

Dónde:

i, j : Agrupaciones

m, n : Productos de agrupaciones i y j , respectivamente,

S_{ij} : Coeficiente de similitud entre agrupaciones i y j ,

S_{mn} : Coeficiente de similitud entre productos m y n ,

N_i, N_j : Número de productos en agrupaciones i y j , respectivamente.

Una forma de representar el proceso de simplificación de esta submatriz hasta que se alcanza una sola agrupación es mediante un gráfico denominado *Dendograma*, en el cual se puede representar de qué forma los productos van siendo agrupados en distintos niveles de similitud. En la Figura 13 se muestra un ejemplo de dendograma para 4 productos.

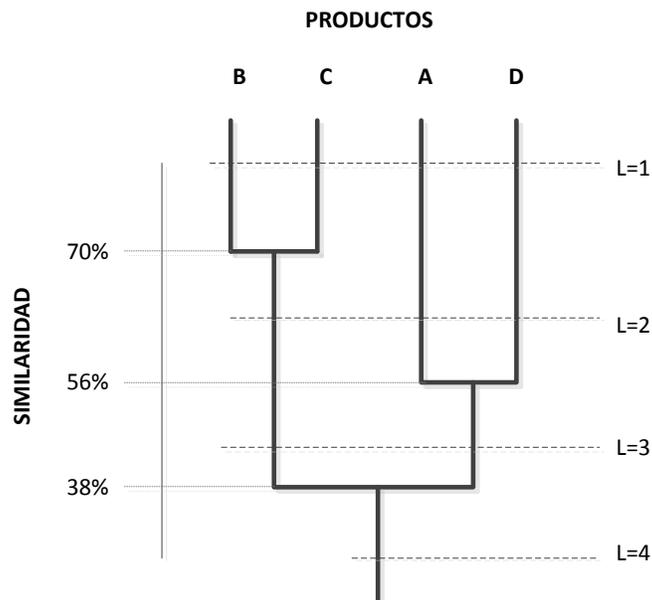


Figura 13: Ejemplo de Dendograma para 4 productos. Tomado de (Galán, Racero, Eguia, & Canca, 2007)

En la Figura 14 se muestra un esquema básico del algoritmo empleado para la agrupación de los productos (ALCA), dónde se describe el procedimiento a seguir (iteraciones de cálculo en la submatriz) hasta que se consigue agrupar todos los productos en un mismo grupo.

Nótese que es posible que se obtengan diferentes agrupaciones con diferentes niveles de similaridad, sin embargo se deben tener en cuenta las VR críticas para escoger las agrupaciones que no afecten funcionalmente el sistema y ofrezcan compatibilidades con los cambios requeridos en las VR.

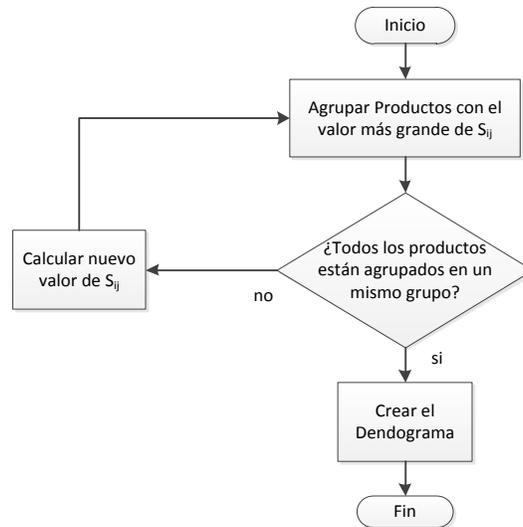


Figura 14: Esquema algoritmo (ALCA). Tomado de (Galán, Racero, Eguia, & Canca, 2007)

Una vez se finaliza el dendograma se obtienen diversas configuraciones de agrupación que se traducen posteriormente en las configuraciones del sistema a partir de soluciones modulares que tienen en cuenta las *Variables de Reconfiguración* de la familia de productos estudiados para el caso de diseño. Las VR con mayor criticidad deben ser verificadas en cada una de estas configuraciones con el fin de que exista compatibilidad en cuanto a las variaciones de parámetros y su afectación sobre el sistema.

Al finalizar esta segunda fase de diseño se deben tener como entregables el listado de referencia completo para el sistema a diseñar, la determinación de las VR del sistema y la agrupación de productos del portafolio en configuraciones definidas.

Etapa 3: Diseño Conceptual y Análisis de Modularidad

En esta tercera etapa se busca construir funcionalmente el sistema a diseñar, teniendo en cuenta criterios de ingeniería tradicionales, añadiendo principios de

arquitectura modular y criterios para el ciclo de vida que permitan establecer un diseño robusto y adecuado acorde con los requerimientos iniciales.

La modularidad del sistema se analiza desde el enfoque conceptual en esta metodología para considerar desde la parte funcional la definición de las arquitecturas apropiadas y su impacto sobre los procesos de diseño posterior. A continuación se describen las tareas que abarca esta tercera fase de la metodología:

a. Construcción Funcional

Inicialmente se debe identificar la función o funciones globales del sistema. Mediante el diagrama de caja negra (Figura 15) se muestran las entradas y salidas principales de la solución que se desea en el problema de diseño.

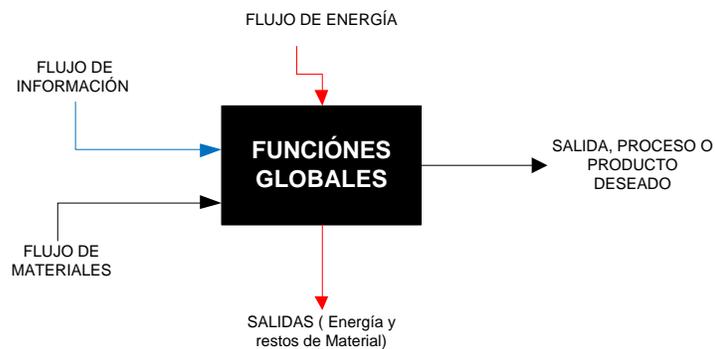


Figura 15: Esquema de Caja Negra para Construcción Funcional

Para llevar a cabo la construcción funcional del sistema inicialmente se deben identificar las funciones y subfunciones a desarrollar por el mismo para llevar a cabo la función global, para lograr esto se deben establecer y jerarquizar las funciones principales y dividir las en subfunciones hasta considerar todas las acciones que desarrolla el sistema (Figura 16).

Una vez se tienen todas las funciones principales y subfunciones es posible construir la *Caja Transparente*, donde se interrelacionan y mezclan los diferentes flujos para obtener las salidas deseadas y otros flujos tales como energía en forma de calor, ruido, vibraciones y flujos de material de residuo. La caja transparente debe llevar en su interior las funciones y/o subfunciones identificadas anteriormente (Figura 17).

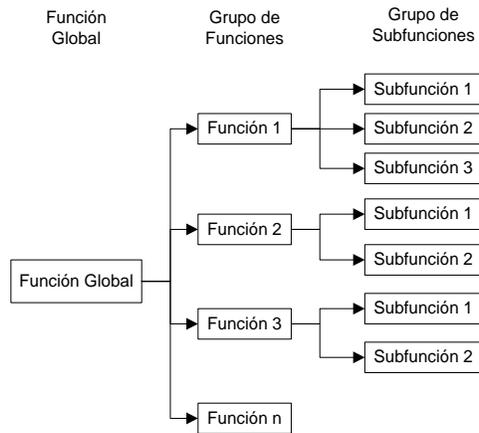


Figura 16: Esquema de Funciones y Subfunciones derivadas de la función global que enmarca el problema de diseño a tratar.

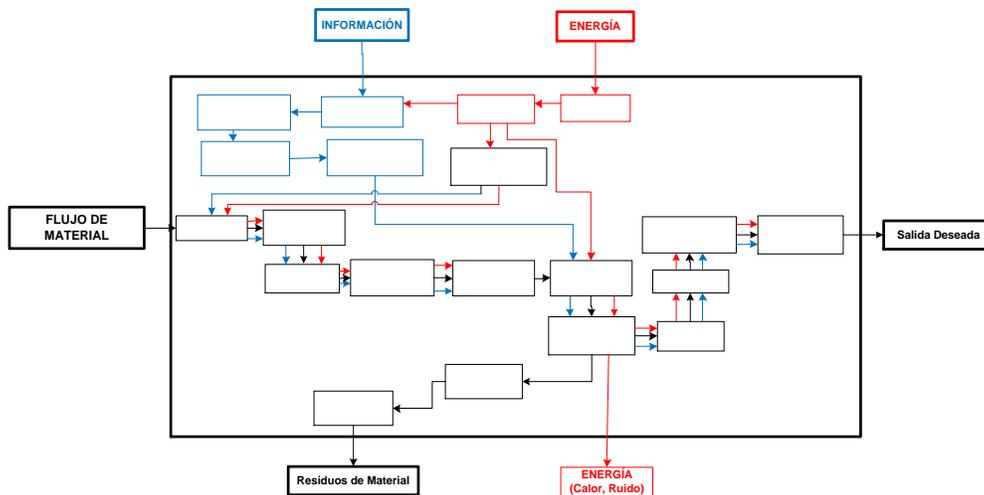


Figura 17: Ejemplo de Estructura de Caja Transparente donde se ilustra la interacción y relación entre los distintos flujos (Energía, Material e Información)

Una vez se tienen completamente definidas las interacciones entre las funciones y subfunciones se procede a generar el listado de subfunciones del sistema para llevar a cabo una evaluación funcional para identificar las subfunciones de plataforma y las subfunciones de reconfiguración.

b. Análisis Funcional de Modularidad

En esta tarea se propone la utilización de un algoritmo de decisión enfocado en la funcionalidad del sistema y que se enfoca en la reconfigurabilidad de hardware. El algoritmo consiste en una serie de tres preguntas básicas que permiten diferenciar

y establecer los principios de arquitectura modular que satisfacen cada función y/o subfunción del sistema. Los principios de arquitectura modular y su caracterización se encuentran en el ANEXO 1.

Las preguntas son las siguientes:

- i) ¿La función o subfunción es de tipo Hardware?*
- ii) ¿Varían los niveles de exigencia de las VR para la función o subfunción dentro del portafolio de productos?*
- iii) ¿La función o subfunción es utilizada para todos los productos del portafolio?*

Las respuestas pueden ser Si o No y se emplea la simbología 1 y 0 para denotar la respuesta. Si la respuesta es Si, se describe con 1, en caso contrario se denota con 0. Dependiendo la combinación de respuestas un grupo de principios modulares es seleccionado. La Tabla 14 resume las posibles combinaciones de respuesta y el grupo de principios que satisfacen la función o subfunción.

Tabla 14: Combinaciones de respuesta para la selección de principios de Arquitectura Modular y sus grupos.

Combinaciones de Respuesta (1-5)	Grupo Asignado	Clasificación	Principios de Arquitectura Modular
0 - -	1	Software de Plataforma	Extensión/Ajuste (Software).
1 0 1	2	Hardware de Plataforma	Extensión (Hardware).
1 0 0	3	Variación funcional	Seccional/M. Permutados/M. Compartidos
1 1 1	4	Variación en el nivel de exigencia	Escalonamiento/Apilamiento/Ajuste
1 1 0	5	Mixta	Mixta

En la

Figura 18 se muestra la estructura del algoritmo explicado anteriormente, las diferentes rutas y los grupos de solución posibles.

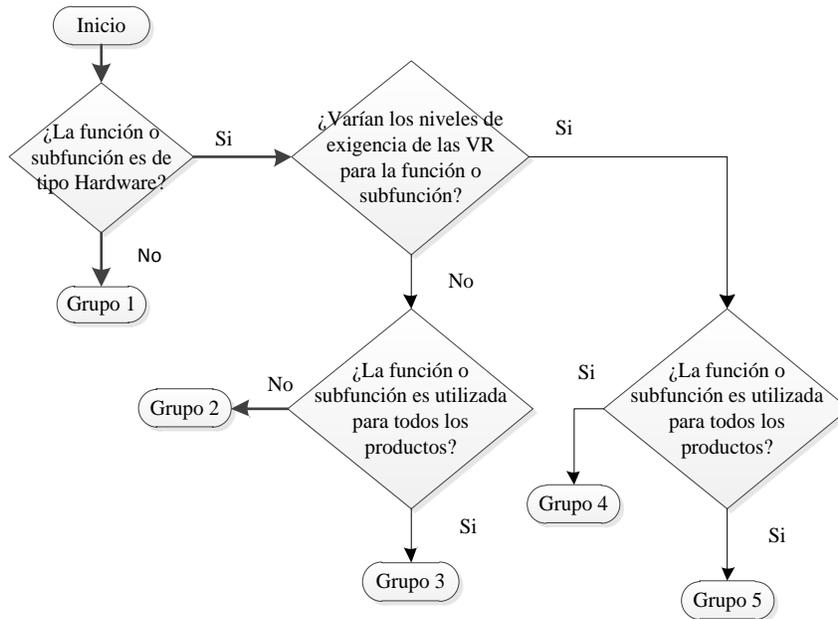


Figura 18: Estructura del Algoritmo para Selección funcional de los Principios de Arquitectura Modular

En los casos 0 - - y 1 0 1 la función o subfunción requiere un único módulo que satisfaga todas las configuraciones del sistema. Para desarrollar la función o subfunción no se requiere reconfigurar y sólo existe un principio modular que cumple con esta condición: “Extensión”, el cual puede aplicarse tanto a hardware como a software.

c. Síntesis Conceptual de Alternativas de Solución para Modularidad

Esta tarea tiene como objetivo el planteamiento de los conceptos de solución para las subfunciones de reconfiguración obtenidas del algoritmo de selección de los principios de arquitectura modular. Se deben plantear conceptos de solución que satisfagan las subfunciones de reconfiguración y dependiendo el grupo de principios modulares asignado en el análisis de modularidad se proponen los conceptos de solución modular aplicando los principios de arquitectura modular mencionados en el ANEXO 1. Un ejemplo de la matriz propuesta para crear el diagrama morfológico de modularidad se muestra a continuación en la

Tabla 15, se toma como ejemplo el grupo de variación en el nivel de exigencia de las VR y se muestran un ejemplo dónde se indica si cumple o no cada combinación de concepto y principio de arquitectura.

Subfunciones Afectadas por las VRs	Alternativas de Solución para la función	Principio1	Principio2	Principio3
Subfunción 1	Concepto 1	Si	No	Si
	Concepto 2	Si	No	No
	Concepto 3	Si	Si	Si
	Concepto i	Si	No	Si
Subfunción n	Concepto 1	No	Si	Si
	Concepto 2	Si	Si	No
	Concepto j	No	No	No

Tabla 15: Matriz de Diagrama Morfológico para Soluciones Reconfigurables

En esta actividad es importante resaltar que los conceptos de solución que se obtengan deben ser compatibles funcionalmente para desarrollar los cambios de configuración de las VR (dendograma de productos a partir de similaridad).

En la matriz de diagrama morfológico como se observa en la

Tabla 15 se enlistan las alternativas y se verifica la posibilidad de aplicar los principios de arquitectura modular del grupo al que corresponde la función en cuestión. De esta forma se establecen conceptos modulares que se aplican a la función y que permiten crear un campo amplio de soluciones.

A partir de la caracterización realizada sobre los principios de arquitectura modular (ANEXO 1), se pueden evaluar de forma cuantitativa los conceptos de solución para las funciones de reconfigurabilidad y de esta forma acotar de primera instancia y desde la fase conceptual el campo de soluciones para las funciones de reconfiguración en las que se centra principalmente el problema de diseño de sistemas reconfigurables.

Los criterios utilizados para la evaluación y filtrado de los conceptos que satisfacen el campo de soluciones para las funciones de reconfiguración se enlistan en la Tabla 16.

Tabla 16: Criterios de Evaluación de Principios de Arquitectura Modular

Criterio de Evaluación	Descripción	Tipo de Principio al que Aplica
Facilidad de Reconfiguración.	Evalúa la complejidad de cambio entre diferentes configuraciones del sistema.	Todos
Adaptabilidad a Cambios de VR.	Evalúa la facilidad para ajustarse a cambios en los valores iniciales de las VR, asociado a la introducción de nuevos productos.	Principios de variación de exigencia en VR.
Variedad Funcional.	Evalúa la capacidad del principio de arquitectura de ofrecer más de una función dentro del sistema.	Principios de variación Funcional
Movilidad	Evalúa la cantidad y volumen de módulos utilizados por el sistema y su transporte.	Principios de variación de exigencia en VR.
Independencia Modular	Evalúa la centralización de la reconfiguración y la dependencia funcional del sistema.	Todos
Tiempo de Vida Útil	Evalúa la vida útil relativa de los módulos respecto a los componentes de plataforma del sistema.	Principios de variación de exigencia en VR.

A partir de la caracterización realizada sobre los principios de arquitectura modular estudiados se muestran a continuación los rangos de calificación para cada uno de ellos. La calificación asignada resulta de una valoración cualitativa y cuantitativa de cada uno de los aspectos de evaluación en cada principio, dicha evaluación y caracterización se encuentra en el ANEXO 1.

En las Tablas 17, 18 y 19 se muestran los rangos de calificaciones relativas en cada uno de los criterios.

Tabla 17: Rangos cualitativos de criterios de evaluación para reconfiguración en principios de variación de exigencia en VR.

Criterios de Caracterización	Principios de variación de exigencia en VR		
	Escalonamiento	Apilamiento	Ajuste
1-Facilidad de Reconfiguración	Muy Baja-Baja	Muy Baja-Media	Media-Muy Alta
2-Adaptabilidad a cambios en VR	Muy Baja-Media	Muy Baja-Media	Media-Muy Alta
3-Movilidad	Muy Baja-Baja	Muy Baja-Media	Alta- Muy Alta
4-Independencia Modular	Alta-Muy Alta	Media-Muy Alta	Muy Baja-Baja
5-Vida Útil	Alta	Media	Baja

Tabla 18: Rangos cualitativos de criterios de evaluación para reconfiguración en Principios de Variación Funcional.

Criterios de Caracterización	Principios de Variación Funcional		
	M. Permutados	M. Compartidos	Seccional
1-Facilidad de Reconfiguración (variación funcional)	Muy Baja-Media	Muy Baja-Media	Muy Baja-Media
2-Variedad Funcional	Media-Alta	Muy Baja	Alta
3-Independencia Modular (variación Funcional)	Media-Alta	Alta	Baja-Media

Selección del principio de arquitectura modular

Con el fin de seleccionar el principio de arquitectura modular se utiliza una evaluación global a partir de las características del escenario de fabricación y se evalúa a partir de los criterios mostrados anteriormente y sus niveles (Ver ANEXO 1).

La selección de los principios de arquitectura modular puede presentarse de diferentes formas, ya sea para variación en el nivel de exigencia, para variación funcional o selección mixta (sistema reconfigurable mixto).

En el caso de variación en el nivel de exigencia los principios de arquitectura modular de esa categoría (Escalonamiento, Apilamiento y Ajuste) compiten, ya que permiten obtener variaciones de las variables de reconfiguración con diferentes características. A continuación en la Figura 19 se muestra el comportamiento de los principios de arquitectura modular para este caso.

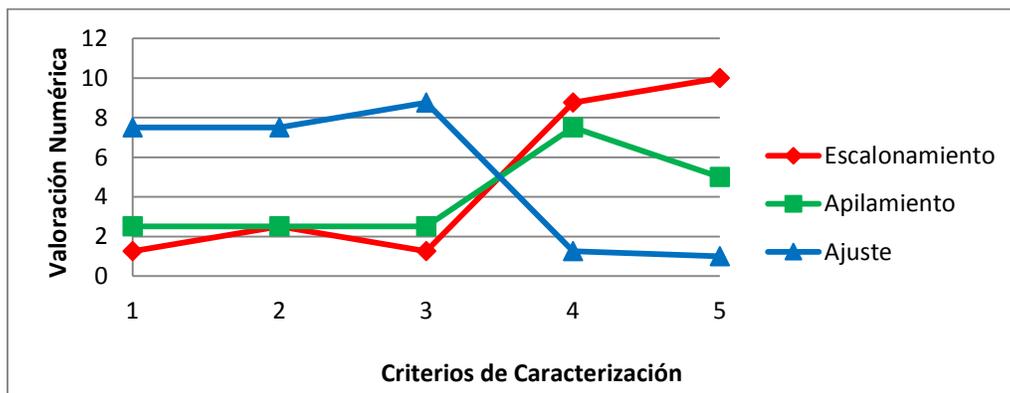


Figura 19: Gráfica de desempeño de los principios de arquitectura modular para variación en el nivel de exigencia respecto a los criterios de caracterización

Para la selección del principio de arquitectura modular de este primer caso se emplea un método de superposición del comportamiento de las VR y el escenario de fabricación sobre las gráficas de desempeño de los principios de arquitectura modular en los 5 criterios de caracterización mencionados. Mediante el cálculo del error cuadrático medio se jerarquizarán los principios de arquitectura mostrando cual será el más adecuado para el caso de diseño en particular. De esta forma se genera una cuarta línea de comportamiento que mostrará diferentes valores de error cuadrático medio respecto a cada línea de comportamiento de los principios de arquitectura modular. La ecuación utilizada para calcular el error cuadrático medio se muestra a continuación Ec.3.

$$ECM = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - X_t)^2}{n} \quad \text{Ec. 3}$$

Siendo Y_t el valor numérico del criterio de caracterización asignado por el diseñador a partir del escenario de fabricación, X_t el valor numérico establecido en la caracterización particular del principio de arquitectura modular y n el número de criterios de caracterización. El principio que ofrezca menor error cuadrático medio será el más adecuado para solucionar el problema de diseño.

En el caso de variación funcional los principios de arquitectura modular no compiten entre sí debido a que cada uno satisface condiciones especiales del escenario de fabricación. La Figura 20 muestra el comportamiento de los tres principios de arquitectura modular de este caso y su desempeño respecto a los tres criterios de caracterización establecidos.

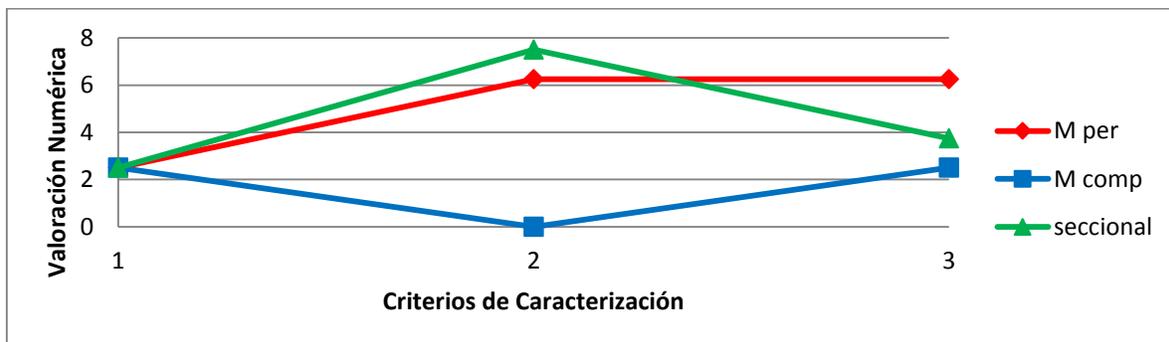


Figura 20: Gráfica de desempeño de los principios de arquitectura modular para variación funcional respecto a los criterios de caracterización

En el caso de que exista un escenario de fabricación mixto (se requiera variación en el nivel de exigencia y variación funcional simultáneamente) los criterios y valores deben ajustarse dependiendo el proceso en particular debido a la complejidad del sistema.

Se recomienda escoger al menos las 3 mejores alternativas de solución a partir de esta evaluación con el fin de desarrollar la evaluación de alternativas de solución globales con las subfunciones modulares con mayor robustez a partir de la caracterización de los principios de arquitectura modular realizada.

e. Síntesis Conceptual de Alternativas de Solución Globales

En esta tarea se crean diagramas morfológicos para establecer diferentes alternativas de solución globales. La finalidad de este diagrama es generar un campo de soluciones del cual se deriven alternativas adecuadas para la solución global de la problemática de diseño.

Estos diagramas morfológicos son comúnmente utilizados en diseño de productos, a continuación en la

Tabla 19 se muestra un esquema de diagrama morfológico tradicional.

Tabla 19: Esquema general de Diagrama Morfológico

N	Subfunción	Concepto de Solución 1	Concepto de Solución 2	Concepto de Solución 3	Concepto de Solución n
1	Subfunción 1	--	--	--	--
2	Subfunción 2	--	--	--	--
...	...	--	--	--	--
n	Subfunción n	--	--	--	--

Una vez se tienen diferentes conceptos de solución que satisfacen cada una de las subfunciones se procede a establecer conjuntos de soluciones a partir de la combinación de los conceptos de solución establecidos con el fin de definir alternativas globales del sistema. Posteriormente se procede a realizar la evaluación para el ciclo de vida, gracias a la cual se obtiene la mejor alternativa de solución global. En este diagrama morfológico para alternativas de solución

global se deben definir los conceptos de solución para las subfunciones no afectadas por las VR, los conceptos de solución para las subfunciones afectadas por las VRs ya han sido definidas y sólo serán consignadas en la matriz del diagrama morfológico.

f. Evaluación de alternativas de solución globales a partir de criterios para el ciclo de vida

Debido a que las alternativas de solución globales poseen un componente de plataforma (subfunciones satisfechas por el principio de *Extensión* o subfunciones de plataforma) y otro componente de reconfigurabilidad (subfunciones de reconfiguración o afectadas por las VR) es necesario realizar una evaluación general de cada alternativa global mediante criterios que permitan escoger una alternativa robusta para solucionar la problemática de diseño. En esta metodología se proponen 15 criterios de evaluación enfocados al ciclo de vida del sistema, teniendo en cuenta que el ciclo de vida de los sistemas reconfigurables difiere del ciclo de vida de producto tradicional, ya que existe una etapa de actualización en la cual se reconfigura el sistema para adaptarse a un nuevo portafolio con nuevos valores de VRs.

Los 15 criterios de evaluación enfocados al ciclo de vida del sistema se muestran a continuación en la

Tabla 20. Se tienen en cuenta las etapas de Fabricación/Compra, Instalación, Uso, Mantenimiento, Actualización y Disposición Final.

Tabla 20: Criterios de Evaluación para Alternativas de solución global enfocados al ciclo de vida del sistema

Etapa del Ciclo de Vida	Subcriterios
Fabricación/Compra	Disponibilidad de Proveedores Complejidad del Proceso Inversión Inicial
Instalación	Movilidad del Sistema Costo de Instalación
Uso	Confiabledad Seguridad Complejidad de uso Uso de Recursos
Mantenimiento	Movilidad en Mantenimiento Costo de Mantenimiento
Actualización	Facilidad de Actualización Reusabilidad del Sistema
Disposición Final	Facilidad de Reciclaje

Se puede realizar la evaluación de los criterios propuestos la reconfiguración considerando pesos iguales para cada etapa y jerarquizando la importancia de cada criterio, en esta metodología se propone una matriz de relación para ponderar la importancia de estos criterios a partir de los atributos de ingeniería jerarquizados inicialmente mediante el método QFD.

Para jerarquizar estos criterios de evaluación para el ciclo de vida se propone una matriz de relación con los atributos del QFD (Ver Tabla 21), relacionando los valores obtenidos y asignando valoraciones a partir del promedio de los valores relacionados, de esta forma se jerarquizan los criterios de evaluación para el ciclo de vida.

Tabla 21: Matriz de Relación Criterio Evaluación para el Ciclo de vida y atributos de QFD

	Atributo 1 Val. At. 1	Atributo 2 Val. At. 2	Atributo 3 Val. At. 3	...	Atributo t Val. At. K	Total (Prom. sumatoria valores de atributos relacionados)
Criterio 1	val at 1	-	Val at. 3	....	Val at. T	Prom. Val at. Por criterio
Criterio 2	Val at 1	Val at 2	-	....	-	....
....	-
Criterio p	Val at	....	....	....	-	....

Se debe generar una valoración deseada para cada uno de los criterios de evaluación con el fin de aplicar el algoritmo AHP (Analytical Hierarchical Process). Para disminuir la subjetividad en la evaluación. En esta metodología se proponen niveles (bajo, medio, alto) con su respectiva evaluación cuantitativa y una

descripción del comportamiento del criterio en cada nivel. Dichas valoraciones se encuentran en el ANEXO 2.

Etapa 4: Diseño Preliminar de Módulos y Configuraciones

En esta última etapa de la metodología propuesta se deben definir el número de configuraciones del sistema, el número de módulos y el orden de reconfiguración adecuado para lograr abarcar las variaciones funcionales y de reconfiguración que exige la familia o portafolio de productos. A continuación se describen detalladamente las tareas a realizar en esta fase de la metodología.

a. Asignación de Parámetros por Configuración

A partir de las configuraciones preliminares obtenidas con el algoritmo ALCA y una vez se han identificado las VR que afectan las variables de reconfiguración se procede a generar el número definitivo de configuraciones y módulos del sistema, asignando a cada módulo una configuración que satisface una determinada cantidad de productos dentro de la familia de productos.

Para facilitar esta tarea se puede utilizar una matriz para agrupar y definir los valores de las VR del sistema en cada configuración. Ver

Tabla 22 se muestra la matriz empleada en esta actividad.

Tabla 22: Matriz de Asignación de parámetros de VR por configuración

Agrupaciones	Ref. Productos	Valores parámetro 1	Valores Parámetro 2	..	Valores Parámetro m
1	Listado prod conf 1	--	--		--
2	Listado prod conf 2	--	--		--
n	Listado prod conf n	--	--		--

En esta tarea se debe tener en cuenta la criticidad de las VR con el fin de que no existan incompatibilidades técnicas con los rangos de las variables o sus valores en cada configuración generada.

b. Diseño Esquemático Preliminar y Básico de conceptos de solución Seleccionados

En esta última tarea de la metodología se deben proponer esquemas visuales de los conceptos de solución seleccionados, se recomienda establecer el

comportamiento funcional del concepto y su comportamiento frente a las configuraciones requeridas por el sistema.

Un modelo CAD 2D o 3D sirve para establecer preliminarmente el comportamiento del concepto en su dominio físico. En cuanto al comportamiento y respuesta de cada concepto de solución frente a las configuraciones del sistema, se propone el uso de una matriz para consignar los parámetros y cada uno de sus valores en cada configuración. En la Tabla 23 se muestra la estructura general de esta matriz.

Tabla 23: Estructura de la Matriz de Configuraciones y parámetros para los conceptos de solución seleccionados

Config.	Par.	Concepto de solución escogido subfunción 1	Concepto de solución escogido subfunción 2	....	Concepto de solución escogido subfunción k
1	Par1	-	-	-	-
	Par2	-	-	-	-
	Parn	-	-	-	-
...	Par1	-	-	-	-
	Parn	-	-	-	-
m	Par1	-	-	-	-
	Par2	-	-	-	-
	Parn	-	-	-	-

El proceso de diseño propuesto abarca hasta un diseño básico preliminar, las fases posteriores siguen los mismos procedimientos establecidos en las metodologías de diseño tradicional. Para mayor detalle de estos procedimientos consultar (Dieter, 2000).

Fases Posteriores a la Metodología

Diseño Básico

Esta fase comprende el diseño general de la alternativa seleccionada (máquinas, módulos y componentes) y de acuerdo a esta se hace un análisis ingenieril para determinar sus condiciones físicas y geométricas, de modo que permitan la mejor utilidad durante el ciclo de vida del sistema y teniendo en cuenta las restricciones existentes.

En esta etapa para el modelo modificado propuesto se plantea una división de tres aspectos fundamentales teniendo en cuenta los análisis desarrollados por diversos autores tales como (Mehrabi, Ulsoy, & Y.Koren, 2000a) y (Dieter, 2000), los cuales estudian los que se consideran los tres aspectos fundamentales de diseño para maquinaria reconfigurable, dichos aspectos incluyen: Diseño de Arquitectura, Diseño de Configuración y Diseño de Control (Paramétrico).

Diseño de Detalle

En esta última fase se termina el proceso de diseño, tiene como objetivo definir a fondo cada uno de los aspectos fundamentales del diseño que permiten obtener una descripción de ingeniería completa sobre el producto diseñado. Esta etapa agrega a la documentación del diseño las dimensiones finales, tolerancias, propiedades superficiales, materiales y procesos de fabricación de cada parte; con lo cual se puede conectar el proceso de diseño con la fabricación y consecución de cada componente y parte (Dieter, 2000).

A continuación se describen las actividades propias del Diseño de Detalle:

- **Planos de Detalle**
- **Ensayos de Calificación de Prototipos**
- **Hoja de Materiales**
- **Revisión final de Diseño**
- **Entrega de Información final a la etapa de Fabricación**

Capítulo 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

En este capítulo se valida la metodología de diseño propuesta en la investigación sobre un caso real: *Diseño de una Máquina Reconfigurable de Ensamble para Intercambiadores de Calor Compactos en Aluminio*. A continuación se detallan paso a paso los procedimientos propuestos en la metodología sobre el caso.

4.1 Caso de Aplicación: Diseño de una Máquina Reconfigurable de Ensamble para Intercambiadores de Calor Compactos.

Dentro de los muchos tipos de intercambiador en aluminio existentes comercialmente se destacan los de tipo compacto, denominados así por su tamaño relativamente pequeño y altas tasas de transferencia de calor, este tipo de intercambiadores ofrecen bajo peso y volumen por lo cual son muy atractivos industrialmente. Son empleados comúnmente para aplicaciones de la industria automotriz, radiadores en refrigeración de motores, calentadores para compartimentos de calentamiento de pasajeros, evaporadores, condensadores para aire acondicionado, enfriadores de aceite entre otros. En este caso de aplicación se busca diseñar una máquina reconfigurable de ensamble para estos productos fabricados mediante el apilamiento de microcanales, aletas o placas y posterior soldadura mediante un proceso denominado Brazing por horno. Para validar la metodología propuesta sobre este caso se utiliza un catálogo de intercambiadores de calor compactos en aluminio ofrecido por la empresa Thermocoil® (Ver Figura 21) como portafolio de productos. En dicho catálogo se muestran las especificaciones de 25 intercambiadores de calor en aluminio, los cuales se diferencian a partir de sus parámetros geométricos constructivos (ver

Tabla 24).

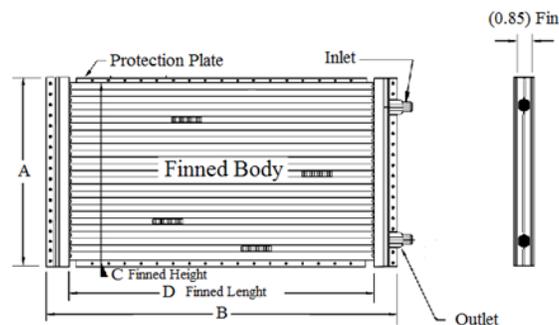


Figura 21: Parámetros Constructivos de Intercambiadores de Calor en Aluminio. (Thermocoil®)

En la

Tabla 24 se muestran los parámetros geométricos y aspectos constructivos del portafolio de intercambiadores ofrecidos en el catálogo de Thermocoil®.

Tabla 24:

Modelo	Configuración	Pasos	Dimensiones en Pulgadas			
			A	B	C	D
C120-20S4	S	4	12	20	11,48	18,268

Características Geométricas de Intercambiadores de Calor

C120-21S4	S	4	12	21	11,48	19,268
C120-22S4	S	4	12	22	11,48	20,268
C120-23S4	S	4	12	23	11,48	21,268
C120-24S4	S	4	12	24	11,48	22,268
C120-26S4	S	4	12	26	11,48	24,268
C124-15O3	O	3	12,3	15	12,3	13,268
C124-20O3	O	3	12,3	20	12,3	18,268
C124-22O3	O	3	12,3	22	12,3	20,268
C124-24O3	O	3	12,3	24	12,3	22,268
C124-26O3	O	3	12,3	26	12,3	24,268
C122-15O5	O	5	12,1	15	11,48	13,268
C122-18O5	O	5	12,1	18	11,48	16,268
C122-20O5	O	5	12,1	20	11,48	18,268
C122-21O5	O	5	12,1	21	11,48	19,268
C122-22O5	O	5	12,1	22	11,48	20,268
C122-24O5	O	5	12,1	24	11,48	22,268
C122-26O5	O	5	12,1	26	11,48	24,268
C140-18S4	S	4	13,8	18	13,12	16,268
C140-20S4	S	4	13,8	20	13,12	18,268
C140-21S4	S	4	13,8	21	13,12	19,268
C140-22S4	S	4	13,8	22	13,12	20,268
C140-23S4	S	4	13,8	23	13,12	21,268
C140-24S4	S	4	13,8	24	13,12	22,268
C140-26S4	S	4	13,8	26	13,12	24,268

A continuación se sigue el procedimiento expuesto en la metodología de diseño propuesta para el caso de aplicación:

Implementación Etapa 1: Especificación Inicial

Se procede a dividir esta etapa en sus dos tareas fundamentales: a) Establecimiento del Listado de Referencia para el Diseño y b) Diseño para Calidad (QFD).

a. Listado de Referencia- Requerimientos Globales de Diseño

En esta primera subetapa se enlisan los requerimientos con los que debe cumplir el diseño de la máquina de ensamble (Ver Tabla 25).

Tabla 25: Listado de requerimientos para la Máquina Reconfigurable de Ensamble para intercambiadores de calor

PROYECTO:				
Máquina Reconfigurable de Ensamble para Intercambiadores de Calor Compactos en Aluminio Brazed				
Concepto	O/D	Propone	Requerimientos	Valor Meta
Funcionamiento	O	I y C	Capaz de Reconfigurarse	Portafolio de Productos
	D	I	Semiautomática	Asistido por Operario
	O	I y C	Fácil de Reconfigurar	***
	O	C	Capaz de Ensamblar con Precisión	***
Materiales de la máquina	O	I	Materiales resistentes a la corrosión	***
	O	C	Materiales de Fabricación Resistentes	***
Vida Útil	D	I	Alta	≥15Años
Seguridad	O	C	Botón de apagado en el caso de emergencias	***
	O	C	Cumplimiento de estándares industriales de seguridad industrial	Norma Europea: Real Decreto 1435/1992
	D	C	Sistema de Alarma en caso de Malfuncionamiento	***
Costo	D	C	Precio Asequible	No superior a 10.000 USD
	D	C	Bajo costo de reconfiguración	< 2 minutos
	D	I y C	Bajo consumo de energía e insumos	***
Apariencia	D	I	Esquinas redondeadas	***
	D	I y C	Interfaz de control táctil	***
	D	I	Cableado organizado y Oculto para el usuario	***
	D	I y C	Buen acabado superficial	***
Peso y Volumen	D	C	Máquina compacta y de bajo peso	≤3m ³ , ≤ 1 ton
Aspectos Legales	D	C	Cumplimiento Legal normas de seguridad industrial	Norma Europea. Real Decreto 1435/1992

Convenciones: O; Obligatorio; D:Deseado; I:Ingeniería, C:Cliente

b. Diseño para Calidad (Análisis QFD)

En esta primera actividad se analizan los requerimientos desde el punto de vista de la voz del cliente, con el fin de enfocar el diseño hacia lo que se desea en el mercado. Se obtienen los pesos relativos de los requerimientos al compararse entre sí. En la Tabla 26 se muestran los resultados de la matriz 2 a 2 para los requerimientos, en el ANEXO 3 se muestra la matriz 2 a 2 completa.

Tabla 26: Pesos relativos obtenidos de la matriz 2a2 para los requerimientos de diseño

Requerimientos	Pesos Relativos
----------------	-----------------

Fácil de reconfigurar	11.7%
Capaz de reconfigurarse	10.8%
Cumplimiento normas ambientales	9.8%
Cumplimiento estándares de seguridad industrial	8.4%
Tipo de funcionamiento: Semiautomático	7.3%
Alta vida útil	6.9%
Botón de apagado en caso de emergencia	6.3%
Sistema de alarma en caso de malfuncionamiento	6.2%
Bajo costo de reconfiguración	5.9%
Precio asequible	4.7%
Bajo consumo de energía e insumos	4.7%
Capaz de ensamblar con precisión	3.4%
Materiales de fabricación resistentes a la corrosión	3%
Máquina compacta y de bajo peso	3%
Materiales de fabricación resistentes	2.3%
Interfaz de control táctil	1.9%
Esquinas y bordes redondeados	1.4%
Cableado organizado y oculto para el usuario	1.3%
Buen acabado superficial	1%

En el ANEXO 3 se muestra el desarrollo de la carta QFD para este diseño, y en la Tabla 27 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se resume los resultados obtenidos de este análisis. Se observa que del análisis se obtienen los atributos de ingeniería más importantes a tener en cuenta durante el proceso de diseño, para este caso en particular se obtiene que los atributos de ingeniería más importantes son “Costo de Equipo”, “Vida Útil”, “Reconfigurable” y “Cumplimiento de Normas Ambientales” . Por lo cual el diseño debe enfocarse principalmente hacia una alternativa económica, la vida útil de la máquina por lo cual debe ser un diseño robusto y que ofrezca un buen desempeño a largo plazo y de manera rentable, la reconfigurabilidad como aspecto indispensable para el funcionamiento enfocado en la flexibilidad y las normas ambientales que apuntan hacia un diseño amigable con el ambiente y que genere un bajo impacto ambiental.

Tabla 27: Valoración de Atributos de Ingeniería de acuerdo a análisis por QFD

¿Cómo(s)? Atributos de Ingeniería	Valoración QFD
Costo de Equipo	533,2
Vida Útil	493

Reconfigurable	401
Cumplimiento Normas Ambientales	394,4
Peso de la Máquina	349,8
Costo de Operación	349
Facilidad de Actualización	339,6
Tiempo de Cambio de Configuración	336,6
Grado de Automatización	334,8
Cumplimiento Normas de seguridad Industrial	322,8
Volumen de la Máquina	305
Botón de Apagado en caso de emergencia	251,8
Alarma en caso de malfuncionamiento	248,4
Interfaz Táctil	231,6
Repetitividad de Operaciones	185,2
Rigidez Estructural	154,2
Grado de Corrosión	146,8
Cableado Organizado y Oculto	104,6
Esquinas y Bordes Redondeados	103,8

Implementación Etapa 2: Especificación Derivada para Reconfiguración

Posteriormente se identifica el tipo de categorización de requerimientos para este caso de aplicación en específico, en este caso se tiene que los intercambiadores de calor se fabrican para un mismo segmento de mercado (Automotriz). Este caso por lo tanto se cataloga como un caso de **Categorización de requerimientos para un segmento de mercado con diferentes niveles de exigencia en el desempeño**. A partir del catálogo se observa que la familia de intercambiadores posee variaciones de tipo geométrico, siendo el ancho, largo y longitudes aleteadas los parámetros que rigen la reconfiguración.

a. Identificación y Caracterización de las Variables de Reconfiguración (VR)

En la Tabla 28 se resumen los valores de los parámetros geométricos que se analizarán en este caso de diseño para la definición de los módulos que permitirán reconfigurar el sistema. En la Tabla 29 se muestra la caracterización hecha a partir del tipo de producto y del escenario de fabricación.

Tabla 28: Variables de Reconfiguración del portafolio de Intercambiadores de Calor y sus diferentes valores

Segmento de	Número de	Tipo de	Niveles	Valor	Variables de
-------------	-----------	---------	---------	-------	--------------

Mercado	Productos	VR	VR	Reconfiguración				
				1	2	3	4	
				A	B	C	D	
Automotriz	25	Geométrica (VG)	8	1	12	15	11,5	13,268
				2	12,17	18	12,3	16,268
				3	12,37	20	13,1	18,268
				4	13,84	21		19,268
				5		22		20,268
				6		23		21,268
				7		24		22,268
				8		26		24,268

Tabla 29: Caracterización del escenario de fabricación para el caso de estudio

Caracterización Escenario de Fabricación	
Comportamiento de VR	Continua, intervalo pequeño
Tipo de Variación Esperada	Rango Actual
Amplitud del Rango de VR	A(1.48"), B(11"), C(1.6"), D(11")
Necesidad de independencia del sistema	Independencia Parcial
Vida útil esperada	Alta

Esta caracterización posteriormente se utilizará para definir los principios de arquitectura modular más adecuados para satisfacer la reconfiguración del sistema.

b. Agrupación de Variables de Reconfiguración

En esta tarea se jerarquizan las VRs en función de su criticidad en la reconfiguración y se procede a realizar la agrupación de productos a partir de la matriz de similaridad de Jaccard. Inicialmente se construye la matriz de descomposición de productos, la cual se centra en las *Variables de Reconfiguración*, que en este caso son los parámetros geométricos constructivos del catálogo de intercambiadores de calor.

i) Jerarquización de Criticidad en la Reconfiguración: a partir de la Ec.1 propuesta en la metodología se procede a calcular la criticidad de las VRs del

caso de diseño. En la Tabla 30 se muestra la evaluación de criticidad de las VR del caso de diseño.

Tabla 30: Evaluación de criticidad de las VRs del caso de aplicación

Variable (VR)	N_n	T_{VR}	k	G_{CR}
A (Alto I.C.)	4	2	1	2
B (Ancho I.C.)	8	2	1	2.51
C (Alto Cuerpo Aleteado)	3	1	3	2.08
D (Ancho Cuerpo Aleteado)	8	2	3	6.92

Se observa que la variable de reconfiguración con mayor criticidad es el ancho del cuerpo aleteado ya que esta presenta un número considerable de niveles y su variación influye directamente sobre la funcionalidad del producto. Este índice de criticidad se tendrá en cuenta a la hora de definir las alternativas de solución para modularidad.

ii) Matriz de Similaridad de Jaccard: a continuación se muestra el desarrollo de la Matriz de similaridad de Jaccard para el portafolio de productos de estudio. En la Tabla 31 se muestra la matriz de descomposición de productos para el caso de estudio, en la Figura 22 se muestra el dendograma para el portafolio de productos.

En la Tabla 31 se muestra la matriz de descomposición geométrica de productos para este caso de diseño.

Tabla 31: Matriz de descomposición geométrica de Productos para la familia de Intercambiadores de Calor

PRODUCTOS	PARÁMETROS DE LA FAMILIA DE PRODUCTOS																						
	A				B								C			D							
	12	12,372	12,166	13,843	15	18	20	21	22	23	24	26	11,48	12,3	13,12	13,268	16,268	18,268	19,268	20,268	21,268	22,268	24,268
1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
14	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
15	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
17	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
19	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
22	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
23	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
24	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
25	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Utilizando el software MatLAB® 2010a y un algoritmo de Clustering se lleva a cabo el proceso de construcción del dendograma para la familia de productos a partir de un algoritmo empleando la función “*dendrogram*” que ofrece el software. En el ANEXO 4 se muestra en detalle el código del algoritmo y los resultados obtenidos en MatLAB. En la Figura 22 se muestra el dendograma obtenido para el portafolio de intercambiadores de calor estudiado en este caso de aplicación de la metodología.

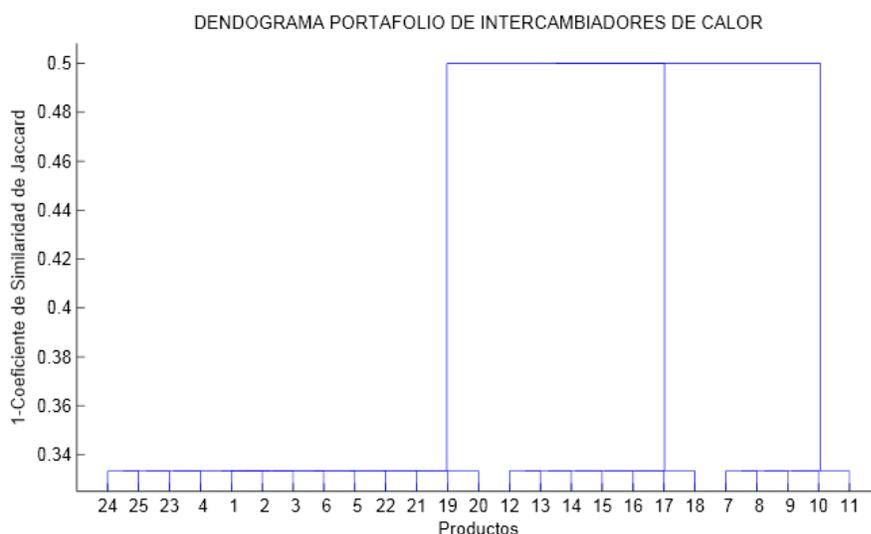


Figura 22: Dendograma para la familia de Productos de Intercambiadores de Calor

Se observa que existe una alta similitud (66.67%) entre los productos del portafolio, formándose tres grupos principales (clústers) de productos con alta similitud y que permite establecer de antemano el número de configuraciones necesarias para llevar a cabo la operación sobre el portafolio de productos. En la Tabla 32: Número de agrupaciones obtenidas a partir de análisis de similitud y Tabla 32 se enlistan las agrupaciones y los productos correspondientes en cada una de ellas.

Tabla 32: Número de agrupaciones obtenidas a partir de análisis de similitud y Clustering

Agrupaciones	Productos
1	12,13,14,15,16,17,18
2	1,2,3,4,5,6,19,20,21,22,23,24,25

El número de agrupaciones se tendrá en cuenta para las fases posteriores de la metodología para el diseño preliminar de módulos y configuraciones.

Implementación Etapa 3: Diseño Conceptual y Análisis de Modularidad

En esta tercera etapa se procede a definir conceptualmente la morfología del sistema a diseñar, se tiene en cuenta inicialmente las consideraciones de diseño y preferencias del cliente (Análisis por QFD), posteriormente se genera la construcción funcional (Caja Negra y Caja Transparente), la síntesis de alternativas (de modularidad y globales) y por último la selección y evaluación de alternativas a partir de criterios para el ciclo de vida.

a. Construcción Funcional

En esta actividad se definen las salidas y entradas del sistema, se utiliza un diagrama de “Caja Negra” para representar los flujos principales y la función general del sistema. En la Figura 23 se muestra el diagrama de caja negra para el caso de estudio en particular.

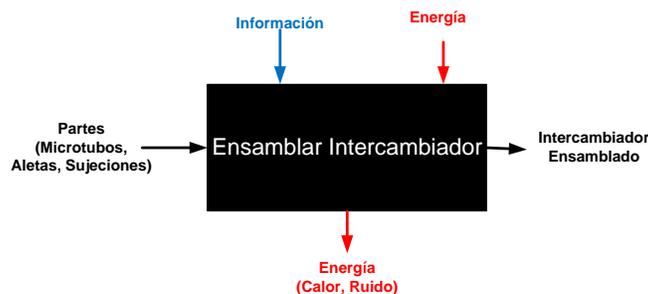


Figura 23: Diagrama de Caja Negra para la máquina reconfigurable de ensamble de intercambiadores de calor

Como se observa en el diagrama de Caja Negra la función Principal o General es “Ensamblar Intercambiador”, sin embargo existen funciones secundarias en las cuales se descompone esta función principal. Dichas funciones secundarias son:

- Iniciar el Sistema.
- Ingreso y Manejo de la Información.
- Recibir Partes (Microtubos, Aletas o Placas).
- Hacer Arreglo de Partes.
- Añadir Tanques Laterales.
- Retirar el Intercambiador.

Estas funciones secundarias se dividen a su vez en subfunciones, las cuales conllevan a todas las tareas o acciones que realiza la máquina. A continuación se muestra la categorización de las funciones mostradas (con sus subfunciones) a partir de la función global. (Ver Figura 24).

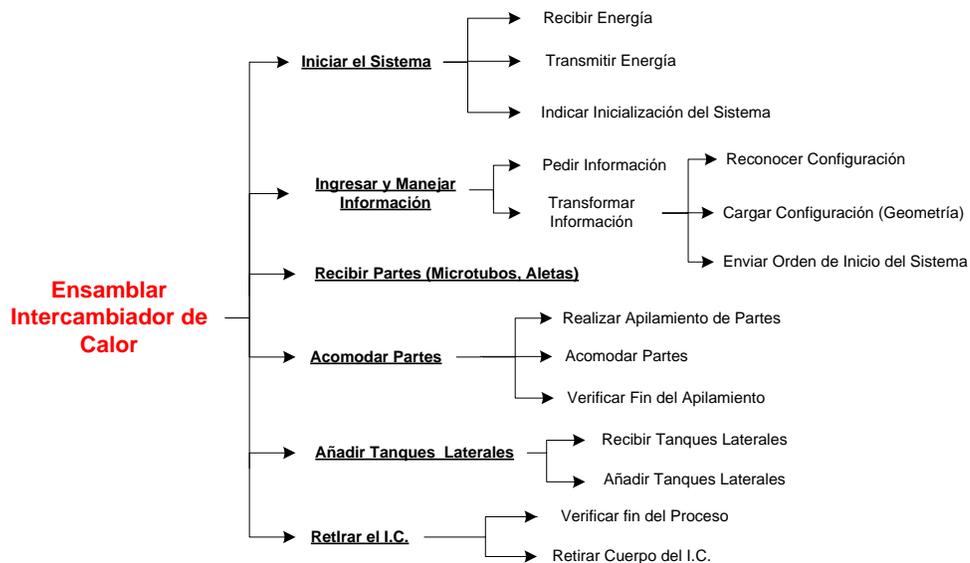


Figura 24: Descomposición Funcional para el sistema a diseñar (Máquina para ensamble de I.C.)

Con el fin de aclarar la información sobre las subfunciones propuestas a continuación en la Tabla 33 se describen las subfunciones establecidas a partir de la construcción funcional.

Tabla 33: Descripción general subfunciones del sistema

N	Subfunción	Descripción General
1	Recibir Energía	Recepción de energía externa para desarrollar las funciones del sistema.

N	Subfunción	Descripción General
2	Transmitir Energía	Se hace la transmisión de energía recibida a los componentes del sistema.
3	Indicar Iniciación del Sistema	Indicar que el sistema está encendido y se inicializa el proceso de ensamble.
4	Pedir Información	Se ingresa la información sobre las configuraciones y el orden de ensamble.
5	Reconocer Configuración	Se busca y establece la configuración en el software (parámetros).
6	Cargar Configuración	Se establecen los parámetros del sistema y configura el hardware.
7	Enviar orden para inicio de Ensamble	Se envía la orden de inicio del sistema a los componentes.
8	Recibir Partes (Microtubos y aletas)	Se reciben las partes del cuerpo aleteado del I.C. (Microtubos y Aletas).
9	Realizar Apilamiento	Se lleva a cabo el apilamiento intercalado de partes (Microtubos y Aletas).
10	Acomodar Partes	Se verifica la alineación de las partes (Microtubos y Aletas).
11	Verificar fin del apilamiento	Se verifican los valores de las VR en el apilamiento.
12	Recibir Sujetadores laterales	Se reciben los sujetadores laterales que rigidizan el cuerpo del I.C.
13	Colocar Sujetadores laterales	Se añaden los sujetadores laterales a los laterales del cuerpo del I.C.
14	Verificar Fin del Proceso	Se verifican nuevamente los valores de las VR en el cuerpo ensamblado.
15	Remover Intercambiador de Calor	Se retira el I.C. ensamblado y verificado.

Una vez se ha desarrollado la jerarquización y división de las funciones y subfunciones se procede a generar el diagrama de “Caja Transparente”, donde se muestran las interacciones que existen entre los diferentes flujos y su desarrollo a través de cada subfunción. En la Figura 25 se muestra la Caja Transparente para este primer caso de Diseño.

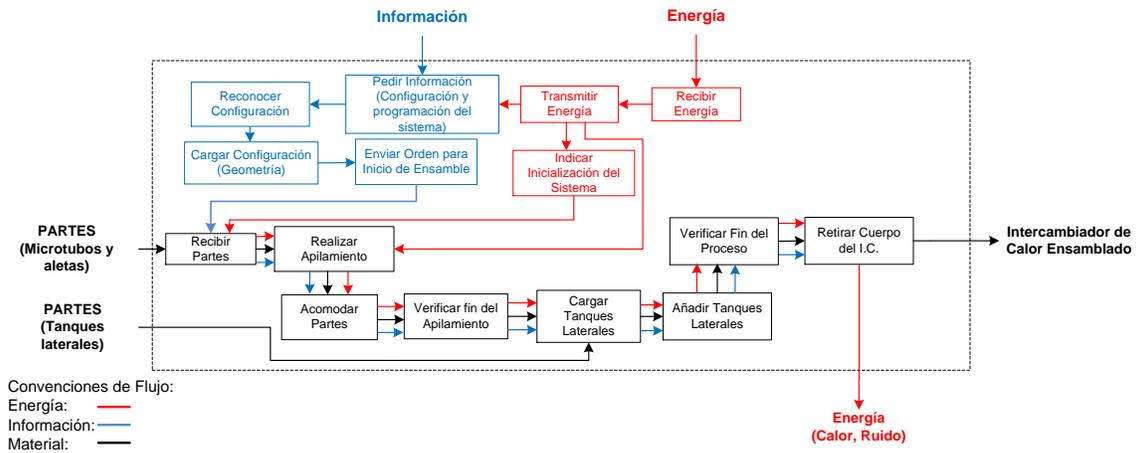


Figura 25: Caja Transparente para la Máquina Reconfigurable de Ensamblaje para Intercambiadores de Calor.

b. Análisis Funcional de Modularidad

Una vez ya se tienen las interacciones entre las diferentes funciones y subfunciones del sistema se procede a realizar el análisis funcional para modularidad. Este análisis permite establecer el tipo de arquitectura modular adecuada para cada función o subfunción dependiendo la relación de cada una de estas con las VR. En la Tabla 34 se muestra la relación Función-VR para el caso de aplicación.

Mediante esta relación se descartan los parámetros que no tienen relevancia en el proceso de reconfiguración y se identifican las subfunciones afectadas por las VR con el fin de establecer una diferenciación entre subfunciones de plataforma y subfunciones de reconfiguración.

Tabla 34: Matriz de Relación Función-VR

N	Subfunción	T.conf	N° pasos	A	B	C	D
1	Recibir Energía	0	0	0	0	0	0
2	Transmitir Energía	0	0	0	0	0	0
3	Indicar Iniciación del Sistema	0	0	0	0	0	0
4	Pedir Información	0	0	1	1	1	1
5	Reconocer Configuración	0	0	1	1	1	1
6	Cargar Configuración	0	0	1	1	1	1
7	Enviar orden para inicio de Ensamble	0	0	0	0	0	0
8	Recibir Partes (Microtubos y aletas)	0	0	0	0	0	1
9	Realizar Apilamiento	0	0	0	0	1	1
10	Acomodar Partes	0	0	0	0	1	1
11	Verificar fin del apilamiento	0	0	0	0	0	0

12	Cargar Sujeciones laterales	0	0	1	0	0	0
13	Colocar Sujeciones laterales	0	0	1	0	0	0
14	Verificar Fin del Proceso	0	0	0	0	0	0
15	Remover Intercambiador de Calor	0	0	0	1	0	0

Se observa que las subfunciones afectadas son: 8, 9, 10, 12, 13 y 15. En la Tabla 35 se muestra el análisis funcional de modularidad para el caso de aplicación luego de aplicar el algoritmo para clasificación de principios de arquitectura modular.

Tabla 35: Análisis funcional para modularidad del caso de diseño

N	Subfunción	P1	P2	P3	Grupo	Clasificación
1	Recibir Energía	1	0	1	2	Hardware de Plataforma
2	Transmitir Energía	1	0	1	2	Hardware de Plataforma
3	Indicar Iniciación del Sistema	0	-	-	1	Software de Plataforma
4	Pedir Información	0	-	-	1	Software de Plataforma
5	Reconocer Configuración	0	-	-	1	Software de Plataforma
6	Cargar Configuración	0	-	-	1	Software de Plataforma
7	Enviar orden para inicio de Ensamble	0	-	-	1	Software de Plataforma
8	Recibir Partes (Microtubos y aletas)	1	1	1	4	Variación Niv. Exigencia
9	Realizar Apilamiento	1	1	1	4	Variación Niv. Exigencia
10	Acomodar Partes	1	1	1	4	Variación Niv. Exigencia
11	Verificar fin del apilamiento	1	0	1	2	Hardware de Plataforma
12	Cargar tanques laterales	1	1	1	4	Variación Niv. Exigencia
13	Añadir tanques laterales	1	1	1	4	Variación Niv. Exigencia
14	Verificar Fin del Proceso	1	0	1	2	Hardware de Plataforma
15	Remover Intercambiador de Calor	1	1	1	2	Variación Niv. Exigencia

Debido a que la metodología propuesta considera únicamente la reconfiguración de hardware se analizan las subfunciones que requieren un principio de arquitectura diferente al principio de Extensión (Hardware). Es importante recordar que este principio implica que la subfunción sea satisfecha por un concepto o componente que se mantenga a lo largo del ciclo de vida del producto sin necesitar reconfiguración por parte del usuario. Este principio se puede considerar como aquel que rige cualquier diseño no reconfigurable, en el cual no se requiere un cambio de componente y se puede trabajar con cualquier nivel de exigencia de las VR.

A continuación se describe los flujos y parámetros específicos que afectan las subfunciones (Ver

Tabla 36).

Tabla 36: Establecimiento de Parámetros de variación para las subfunciones de reconfiguración

N	Subfunción	Parámetros de Variación (VR)
8	Recibir Partes	D (Ancho cuerpo aleteado)
9	Realizar Apilamiento	C y D (Alto y Ancho cuerpo aleteado)
10	Acomodar Partes	C y D (Alto y Ancho cuerpo aleteado)
12	Recibir Sujetadores Laterales	A (Alto tanques laterales)
13	Colocar Sujetadores Laterales	A (Alto tanques laterales)
15	Retirar Intercambiador de Calor	B (Ancho Intercambiador de Calor)

c. Síntesis conceptual de Alternativas de Solución para Modularidad

Se procede entonces a definir los conceptos de solución para cada una de las subfunciones, inicialmente se definen las alternativas de solución para las subfunciones afectadas por la reconfiguración (subfunciones 8, 9, 10, 12, 13 y 15). Cabe resaltar que las subfunciones 8, 12, 13 y 15 son susceptibles de satisfacerse como subfunciones de plataforma, es decir, mediante el principio de arquitectura modular de *Extensión*, debido a que poseen una baja criticidad. En el caso de que no sea posible deben ajustarse a los principios de arquitectura para variación en el nivel de exigencia (ajuste, apilamiento o escalonamiento). En las Tabla 37 y 38 se muestran los conceptos de solución propuestos para cada subfunción.

Tabla 37: Establecimiento de alternativas de solución para cada subfunción afectada por las VR

N	Subfunción	Concepto de Solución 1	Concepto de Solución 2	Concepto de Solución 3
8	Recibir Partes	Banda Transportadora	Sistema de Rieles	Bandeja
9	Realizar Apilamiento	Marco Móvil Horizontal	Distribuidor con marco móvil horizontal	Marco Móvil Vertical
10	Acomodar Partes	Sistema de actuadores lineales	Sistema actuador/ rodillos	Manual
12	Cargar Tanques Laterales	Banda Transportadora	Dispensador Horizontal	Dispensador Vertical
13	Añadir Tanques Laterales	Sistema de actuadores lineales	Brazo Robótico	Manual
15	Retirar Intercambiador de Calor	Banda Transportadora	Brazo Robótico	Manual

Una vez se cuenta con un campo amplio de soluciones a partir de diferentes principios de arquitectura modular se procede a establecer el principio de arquitectura modular más adecuado con el escenario de fabricación y las restricciones del sistema a partir de las características de las VR. Para esta actividad se desarrolló una interfaz para permitir observar gráficamente el comportamiento de los parámetros de selección establecidos y buscar mediante el método del error cuadrático medio el principio de reconfiguración que mejor se ajusta al caso de estudio.

En esta interfaz se puede observar que el principio de arquitectura modular más adecuado para llevar a cabo la reconfiguración del diseño propuesto es el principio de *Ajuste* (20.625), seguido del principio de *Apilamiento*(34.8) y por último *Escalonamiento*(38.48). En la Figura 26 se muestra el resultado del a interfaz y los índices de comparación (valores del error cuadrático medio).

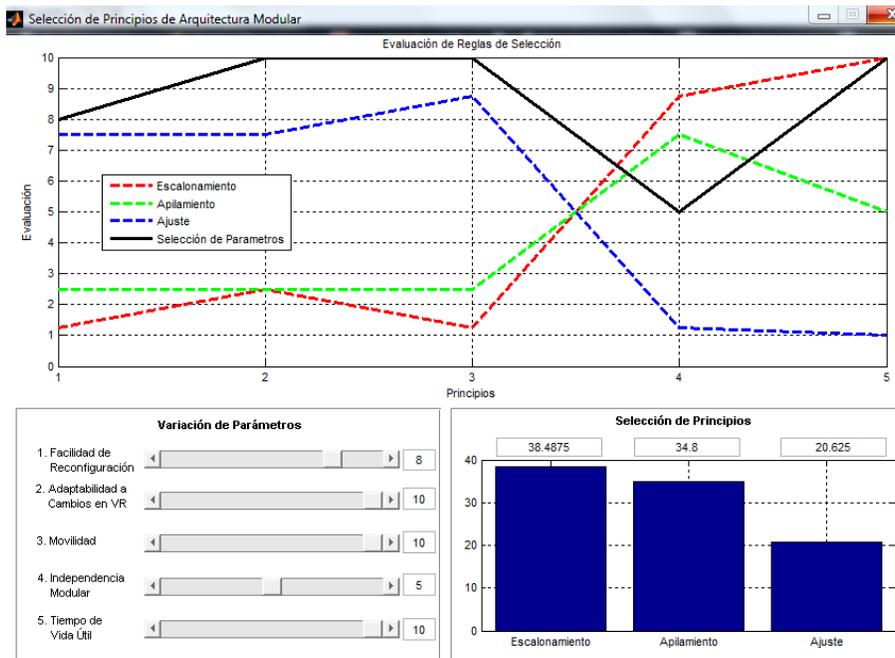


Figura 26: Visualización de Interfaz creada para desarrollar la selección de principios de arquitectura modular

Luego de definir las alternativas de solución se cruzan dichas alternativas de solución con los principios de arquitectura modular aplicables del grupo de variación de exigencia en el nivel de exigencia, se establecen posteriormente un

conjunto de alternativas modulares de solución para cada subfunción afectada por las VR, cada alternativa tendrá opciones que serán derivaciones del concepto de solución pero aplicando los principios de arquitectura modular. En la Los conceptos de solución generados en esta tarea deben cumplir con los cambios de VR del sistema en cuanto a compatibilidad funcional, en este caso se comprueba que todos pueden satisfacer esta condición ya que el rango de variación de las VR es pequeño.

Tabla 38 se muestra la combinación de los conceptos de solución con los principios de arquitectura modular. Los conceptos de solución generados en esta tarea deben cumplir con los cambios de VR del sistema en cuanto a compatibilidad funcional, en este caso se comprueba que todos pueden satisfacer esta condición ya que el rango de variación de las VR es pequeño.

Tabla 38: Establecimiento de Principios de Arquitectura Modular compatibles con las alternativas de Solución obtenidas

N°	VRs Afectadas	Conceptos Sol.	Principios Arq. Modular			
			Ext.	Aj.	Ap.	Es.
8	D (Ancho cuerpo aleteado)	-Sistema de Rieles		✓		
		-Bandeja	✓		✓	
		-Banda Transportadora	✓			
9	C y D (Alto y Ancho cuerpo aleteado)	-Marco Móvil Horizontal		✓	✓	✓
		-Marco Móvil Vertical		✓	✓	✓
		-Distribuidor con marco horizontal		✓		
10	C y D (Alto y Ancho cuerpo aleteado)	-Sistema de actuadores lineales		✓		
		-Sistema actuador/rodillo		✓		
		-Manual	✓			
12	A (Alto Tanques laterales)	-Banda Transportadora	✓			
		-Dispensador Vertical	✓			
		-Dispensador Horizontal	✓			
13	A (Alto Tanques laterales)	-Sistema de Actuadores Lineales		✓		
		-Brazo Robótico	✓			
		-Manual	✓			
15	B (Ancho Intercambiador de Calor)	-Banda Transportadora	✓			
		-Brazo Robótico	✓			
		-Manual	✓			

A continuación se muestra las alternativas de solución combinadas con el principio modular de *Ajuste*, en el caso de que no hubiese sido posible obtener alternativas de solución bajo este principio se buscaría soluciones que funcionalmente cumplieran con el principio de *Apilamiento*, en el caso de que no fuese posible obtener alternativas con este principio se utilizaría el principio de *Escalonamiento*.

Tabla 39: Alternativas de solución modulares para las subfunciones afectadas por las VRs

Subfunción	Alternativas Modulares	Descripción de adaptación a VRs
8. Recibir Partes	Bandeja (Ext.)	Bandeja diseñada por el valor más grande del parámetro de reconfiguración.
	Banda Transportadora (Ext.)	Banda transportadora diseñada para el mayor valor de ancho del cuerpo aleteado.
9. Realizar Apilamiento	Marco Móvil Horiz. (Aj.)	Marco con posibilidad de ajustarse mediante deslizamiento de barras laterales.
	Marco Móvil Vert. (Aj.)	Marco con posibilidad de ajustarse mediante deslizamiento de barras laterales.
	Dispensador móvil con marco horizontal (Aj.)	Dispensador que se a ajuste variando el área de distribución y recorrido.
10. Acomodar partes	Sistema Actuadores Lineales (Aj.)	Ajuste de la carrera del actuador.
	Sistema actuador/rodillo Móvil (Aj.)	Ajuste del recorrido del rodillo sobre el cuerpo aleteado.
12. Cargar tanques laterales	Banda Transportadora (Ext.)	Banda transportadora diseñada para el mayor valor del alto de tanque lateral
	Dispensador Vertical (Ext.)	Apilamiento de tanques laterales en columnas con salida en la mesa de ensamble.
	Dispensador Horizontal (Ext.)	Apilamiento de tanques laterales en columnas con salida en la mesa de ensamble.
13. Colocar tanques laterales	Sistema de Actuadores Lineales (Aj.)	Ajuste de carrera del pistón para ajustarse al valor del ancho del cuerpo aleteado.
	Brazo Robótico (Ext.)	Brazo robótico programado para añadir tanque lateral al cuerpo aleteado.
15. Retirar Intercambiador de Calor	Retiro manual (Ext.)	El retiro se hace de forma manual por un operario.
	Banda Transportadora (Ext.)	Secciones de Banda transportadora que permitan apilarse y aumentar valores de VR.
	Brazo Robótico (Ext.)	Brazo robótico programado para retirar intercambiador de calor de la mesa de ensamble.

d. Síntesis Conceptual de Alternativas de Solución Globales

Una vez se han establecido alternativas de solución particulares para las subfunciones afectadas por las VR se procede a establecer las alternativas de solución generales o globales para satisfacer la problemática de diseño. La síntesis de estas alternativas se realiza mediante diagramas morfológicos. Se establecen por lo menos 3 alternativas de solución globales.

En la Tabla 40 se muestra el diagrama morfológico que se tiene para establecer las alternativas de solución globales. Véase que los conceptos de solución que satisfacen las subfunciones afectadas por las VR fueron seleccionados en la actividad anterior de esta metodología.

Tabla 40: Diagrama morfológico conceptos de solución

N	Subfunción	Concepto de Solución 1	Concepto de Solución 2	Concepto de Solución 3
1	Recibir Energía	Fuente de poder	Batería	-
2	Transmitir Energía	Fuente de poder	Transformador	-
3	Indicar Iniciación del Sistema	Indicador de Leds	Display Digital	-
4	Pedir Información	Interfaz Software	Interfaz Hardware-Software	-
5	Reconocer Configuración	Software	Manual	-
6	Cargar Configuración	Software	Manual	-
7	Enviar orden para inicio de Ensamble	Software	Manual	-
8	Recibir Partes	Banda Transportadora	Bandeja	Sistema de Rieles
9	Realizar Apilamiento	Marco móvil Vert.(Aj)	Marco Móvil Horiz. (Aj.)	Dispensador móvil/ Marco horiz. (Aj.)
10	Acomodar Partes	Actuador Lineal (Aj.)	Sistema Actuador/ Rodillo (Aj.)	
11	Verificar fin del apilamiento	Sensor Óptico	Sensor Fin de Carrera	-
12	Cargar Tanques Laterales	Banda Transportadora	Dispensador Vertical	Dispensador Horizontal
13	Colocar Tanques Laterales	Sistema de Actuadores Lineales	Brazo Robótico	-
14	Verificar Fin del Proceso	Sensor de Corriente	Manual	Sensor Óptico
15	Retirar I.C.	Manual	Banda Transportadora	Brazo Robótico

A continuación se muestra la generación de alternativas globales para solucionar el caso de diseño, se obtienen 3 alternativas de solución globales a partir de la integración de diferentes conceptos de solución para cada subfunción.

Tabla 41: Generación de alternativas de solución globales

N	Subfunción	Concepto de Solución 1	Concepto de Solución 2	Concepto de Solución 3
1	Recibir Energía	Fuente de poder	Batería	-
2	Transmitir Energía	Fuente de poder	Transformador	-
3	Indicar Iniciación del Sistema	Indicador de Leds	Display Digital	-
4	Pedir Información	Interfaz Software	Interfaz Hardware-Software	-
5	Reconocer Configuración	Software	Manual	-
6	Cargar Configuración	Software	Manual	-
7	Enviar orden para inicio de Ensamble	Software	Manual	-
8	Recibir Partes	Banda Transportadora	Bandeja	Sistema de Ruedas
9	Realizar Apilamiento	Marco móvil Vert.(Aj.)	Marco Móvil Horiz. (Aj.)	Dispensador móvil/ Marco horiz. (Aj.)
10	Acomodar Partes	Actuador Lineal (Aj.)	Sistema Actuador/Rodillo (Aj.)	
11	Verificar fin del apilamiento	Sensor Óptico	Sensor Fin de Carrera	-
12	Cargar Tanques Laterales	Banda Transportadora	Dispensador Vertical	Dispensador Horizontal
13	Colocar Tanques Laterales	Sistema de Actuadores Lineales	Brazo Robótico	-
14	Verificar Fin del Proceso	Sensor de Corriente	Manual	Sensor Óptico
15	Retirar I.C.	Manual	Banda Transportadora	Brazo Robótico

1
2
3

Diagrama Morfológico para generación de alternativas de solución globales:

A continuación se muestran esquemas 3D de las alternativas de solución globales propuestas a partir del análisis funcional, análisis de modularidad y selección del principio de arquitectura modular empleado. En la Tabla 42 se enlistan los componentes de cada alternativa de solución obtenida.

Tabla 42: Descripción de componentes que conforman cada alternativa de solución global.

N	Subfunción	Alternativa 1	Alternativa2	Alternativa3
1	Recibir Energía	Fuente de Poder	Fuente de Poder	Fuente de Poder
2	Transmitir Energía	Fuente de Poder	Fuente de Poder	Fuente de Poder
3	Indicar Iniciación del Sistema	Indicador de Leds	Display Digital	Display Digital
4	Pedir Información	Interfaz Software	Interfaz Software	Interfaz Software
5	Reconocer Configuración	Software	Software	Software
6	Cargar Configuración	Software	Software	Software
7	Enviar orden para inicio de Ensamble	Software	Software	Software
8	Recibir Partes	Bandeja	Bandeja	Sistema de Rieles
9	Realizar Apilamiento	Dispensador Móvil y Marco Horizontal (Aj.)	Marco regulable Horizontal (Aj.)	Marco regulable Vertical (Aj.)
10	Acomodar Partes	Sistema de Actuador/Rodillo	Actuador Lineal	Actuador Lineal
11	Verificar fin del apilamiento	Sensor Óptico	Sensor óptico	Sensor Óptico
12	Cargar Sujetadores Laterales	Dispensador Vertical	Dispensador Vertical	Dispensador Horizontal
13	Colocar Sujetadores Laterales	Sistema de actuadores lineales	Sistema de Actuadores lineales	Sistema de Actuadores lineales
14	Verificar Fin del Proceso	Sensor de Corriente	Sensor Óptico	Sensor Óptico
15	Retirar I.C.	Manual	Banda Transportadora	Banda Transportadora

Esquemas conceptuales de alternativas de solución globales: utilizando el software SolidWorks se generan los esquemas conceptuales mostrados a continuación. (Ver Figura 27).

Esquema Conceptual Alternativa 1

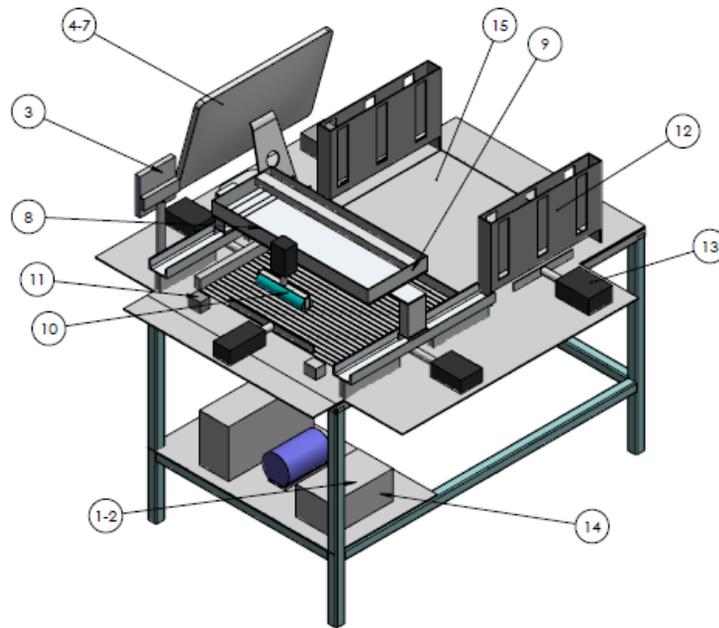


Figura 27: Esquema conceptual alternativa global de solución N° 1.

En la Tabla 43 se detallan los componentes que conforman la primera alternativa global de solución.

Tabla 43: Listado de componentes, alternativa de solución global N° 1

Ítem	Componente
1-2	Fuente de Poder
3	Indicador de Leds
4-7	Interfaz-Software
8	Bandeja
9	Dispensador Móvil con Marco Móvil Horizontal
10	Sistema actuador lineal/rodillo
11	Sensor Óptico
12	Dispensador Vertical

13	Sistema actuadores lineales
14	Sensor de Corriente
15	Retiro Manual

Esquema conceptual Alternativa 2

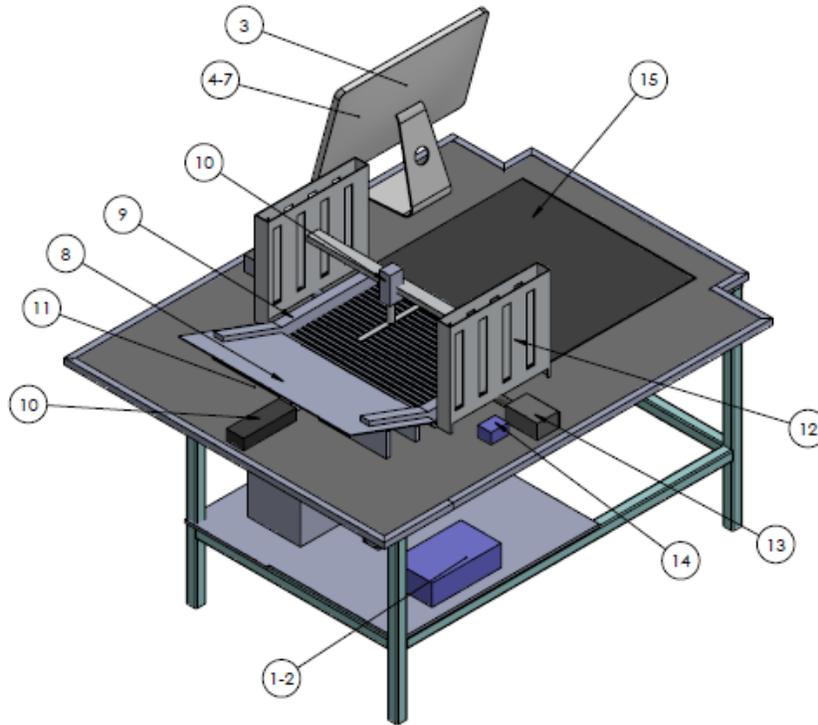


Figura 28: Esquema conceptual alternativa de solución global N° 2

En la Tabla 44 se detallan los componentes que conforman la primera alternativa global de solución.

Tabla 44: Listado de componentes, alternativa de solución global N°2

Ítem	Componente
1-2	Fuente de Poder
3	Display Digital
4-7	Interfaz-Software
8	Bandeja
9	Marco Móvil Horizontal
10	Sistema actuadores lineales
11	Sensor Óptico
12	Dispensador Vertical
13	Sistema actuadores lineales
14	Sensor Óptico

Alternativa 3

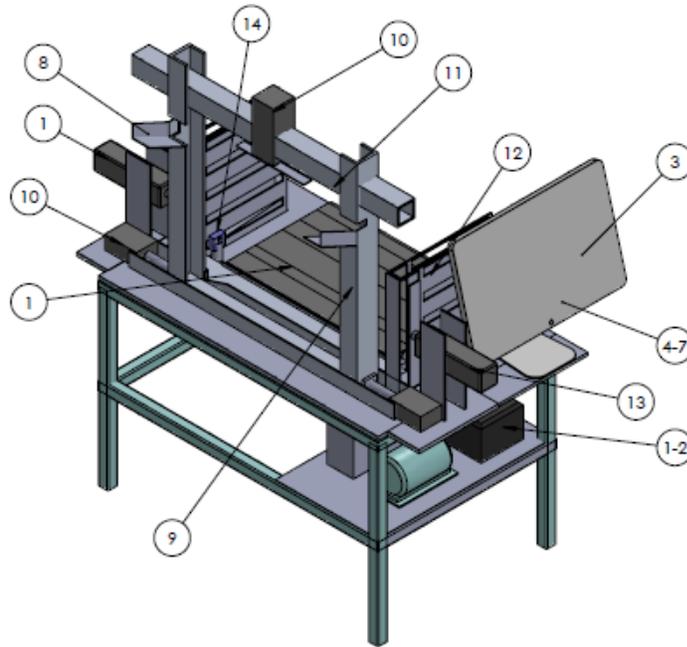


Figura 29: Esquema conceptual alternativa de solución global N° 3

En la Tabla 45 se detallan los componentes que conforman la primera alternativa global de solución.

Tabla 45: Listado de componentes, alternativa de solución global N°3

Ítem	Componente
1-2	Fuente de Poder
3	Display Digital
4-7	Interfaz-Software
8	Sistema de Rieles
9	Marco Móvil Vertical
10	Sistema actuadores lineales
11	Sensor Óptico
12	Dispensador Horizontal
13	Sistema actuadores lineales
14	Sensor Óptico

e. Evaluación de Alternativas de Solución Globales a partir de Criterios para el Ciclo de Vida

Se procede a evaluar los conceptos de solución a partir de los criterios del ciclo de vida propuestos en la metodología. Para obtenerlas valoraciones de cada criterio de evaluación se empleó una matriz de relación QFD-Criterios del Ciclo de Vida, dicha

ETAPA	Criterio Ciclo de Vida	Valoración
Fabricación/Compra	Disponibilidad de Proveedores	8,7%
	Complejidad del Proceso	8,4%
	Inversión Inicial	8,3%
Instalación	Movilidad del Sistema	6,9%
	Costo de Instalación	6,9%

consultar en el ANEXO 5. En la

Tabla 46 se muestran los valores obtenidos para los criterios de evaluación en el ciclo de vida.

Tabla 46: Valoración de Criterios para Evaluación en el Ciclo de Vida.

Uso	Confiabilidad	5,9%
	Seguridad	4,8%
	Complejidad de uso	6,2%
	Uso de Recursos	7,3%
Mantenimiento	Movilidad en Mantenimiento	5,9%
	Costo de Mantenimiento	4,1%
Actualización	Facilidad de Actualización	7,9%
	Reusabilidad del Sistema	8,2%
Disposición final	Facilidad de Reciclaje	4,6%
	Impacto sobre el ambiente	5,9%

La evaluación de estos criterios se realizó mediante el software Expert Choice®, para ello se propone una matriz de evaluación cualitativa y cuantitativa para cada criterio. Se utilizan los niveles Alto, Medio y Bajo con una calificación numérica respectiva. En el ANEXO 5 se muestran las matrices de valoración para cada criterio.

A continuación en la Figura 30 se muestra la representación gráfica de los valores de los diferentes criterios de evaluación para el ciclo de vida del producto.

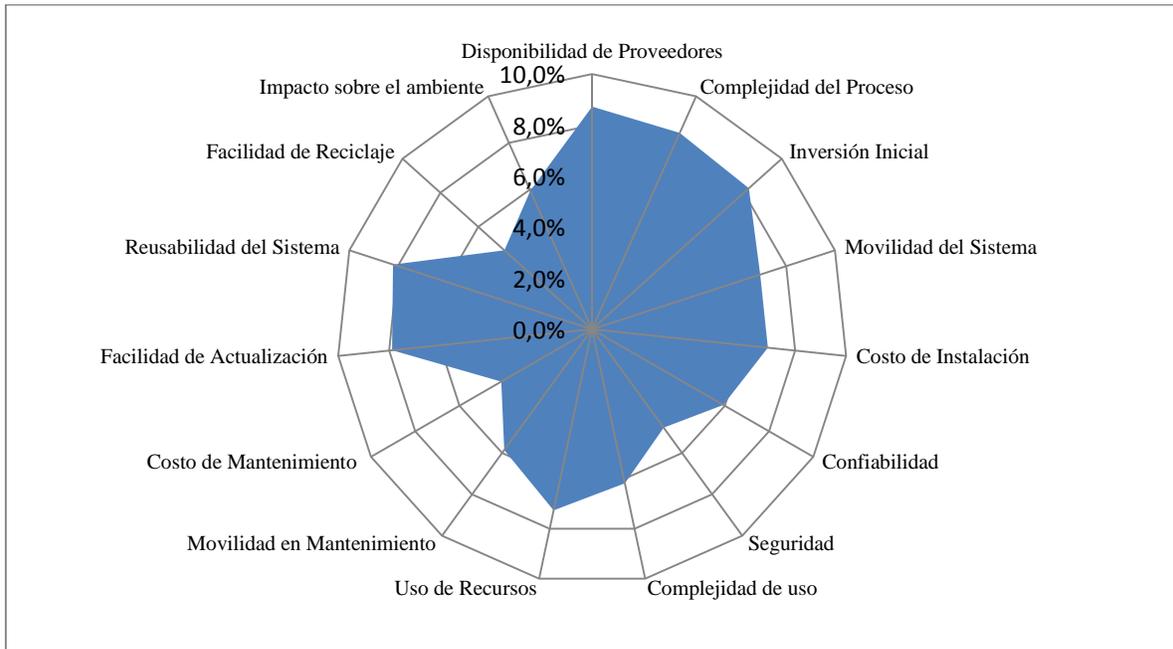


Figura 30: Representación gráfica de los criterios de evaluación para el ciclo de vida.

Luego de utilizar la valoración cualitativa desarrollada para el caso de aplicación en el desarrollo de la metodología AHP para selección de alternativas y los valores asignados por el diseñador se obtiene que la alternativa con mayor valoración bajo las condiciones de evaluación establecidas es la N° 2. A continuación se muestran los resultados arrojados por el software Expert Choice®.

En las Figuras 31 y 32 se muestran los resultados numéricos que arroja el software Expert Choice®. En el ANEXO 6 se muestra la interfaz del software y el árbol de criterios estructurado.

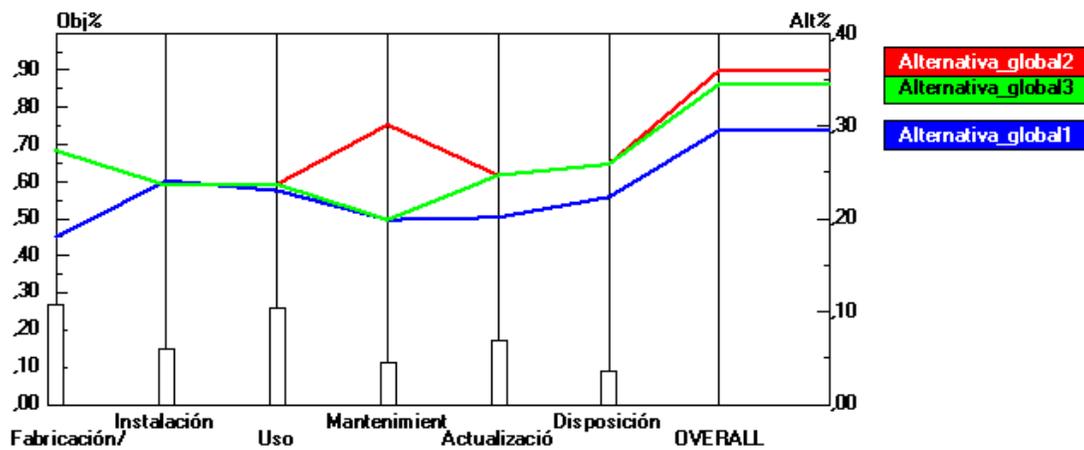
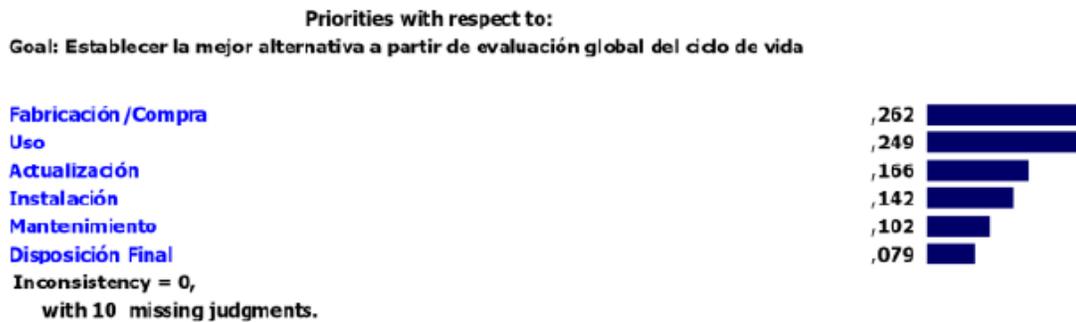


Figura 31: Resultados método AHP para evaluación y selección de alternativas de solución globales para el caso de diseño



Synthesis: Summary

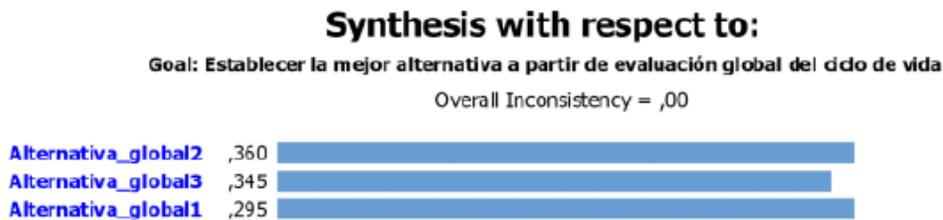


Figura 32: Resultados jerarquización de alternativas, software Expert Choice®

Se observa que la alternativa con mayor valoración es la alternativa global N°2, seguido de la alternativa global N° 3 y por último la alternativa global N°3.

Implementación Etapa 4: Diseño Preliminar de Módulos y Configuraciones

En esta cuarta y última etapa de la metodología propuesta se procede a definir los conjuntos de agrupaciones que permiten de una manera rentable satisfacer la reconfigurabilidad en torno a las variables de reconfiguración identificadas en la subetapa de *Especificación Derivada para Reconfiguración*. Ya se ha identificado que las VR son de tipo Geométrico, debido a que los intercambiadores varían en sus parámetros constructivos a partir de diferentes anchos y longitudes de apilamiento microtubos, placas o aletas.

a. Asignación de parámetros por configuración

Se procede a establecer las configuraciones para los conceptos de solución de las cinco subfunciones afectadas por las VR, en la Tabla 32 se mostró las configuraciones y los productos en cada una de ellas. A continuación se clasificarán las VR correspondientes a cada agrupación establecida.

Tabla 47: Establecimiento de parámetros en las configuraciones del sistema

Agrupaciones	Ref. Productos	A	B	C	D
1	12 al 18	12.166"	15", 18", 20", 21", 22", 24" y 26"	11.48"	13.268", 16.268", 18.268", 19.268", 20.268", 22.268" y 24.268"
2	1 al 6 y 19 al 25	12" y 13.843"	20", 21", 22", 23", 24", 26" y 18", 20", 21", 22", 23", 24", 26"	11.48"	18.268", 19.268", 20.268", 21.268", 22.268", 24.268" y 16.268", 18.268", 19.268", 20.268", 21.268", 22.268", 24.268"
3	7 al 11	12.372"	15", 20", 22", 24" y 26"	12.3"	13.268", 18.268", 20.268", 22.268" y 24.268"

b. Diseño esquemático de Módulos y Configuraciones

A continuación se desarrolla el diseño esquemático preliminar y básico de los conceptos de solución seleccionados.

i) Recibir partes (Microtubos, placas o aletas):

- Afectado por el parámetro: D (Ancho del cuerpo aleteado).
- Concepto de Solución para la subfunción: Bandeja
- Principio de Arquitectura del concepto de solución: Extensión

- Propuesta: debido a que se trata de un sistema de recibimiento de partes, y estas varían en el parámetro D (Ancho) se propone diseñar una bandeja que permita el recibimiento de todas las partes mediante el principio de extensión. En la Figura 33 se muestra una aproximación esquemática de la propuesta.

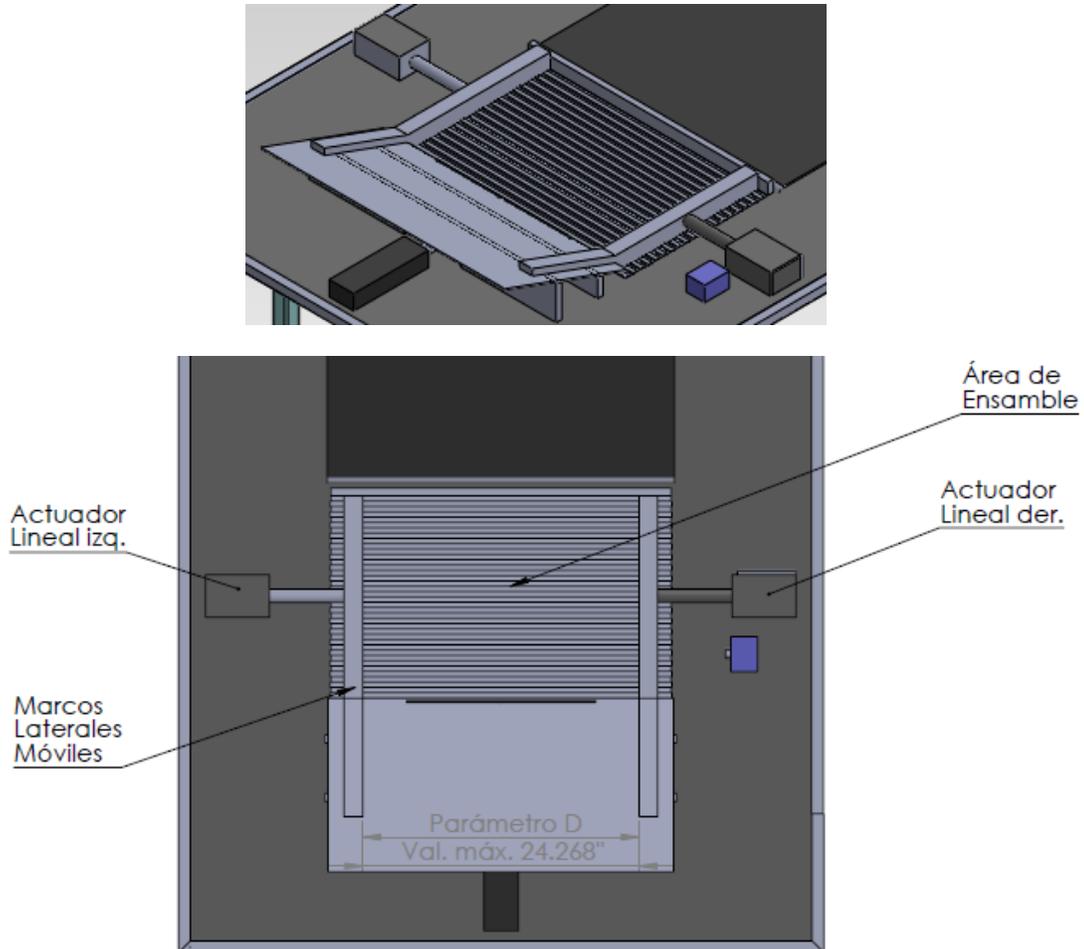


Figura 33: Esquema general de la función recibir partes y su adaptación a las VR del caso de diseño.

ii) Realizar Apilamiento:

- Afectado por el parámetro: C y D (Alto y Ancho del cuerpo aleteado).
- Concepto de Solución Seleccionado: Marco Móvil Horizontal
- Principio de Arquitectura del concepto de solución: Ajuste

- Propuesta: se propone un sistema de rieles con posibilidad de movimiento horizontal y vertical para permitir asegurar la variación de los parámetros D y C mediante un principio de Ajuste. (Ver Figura 34.)

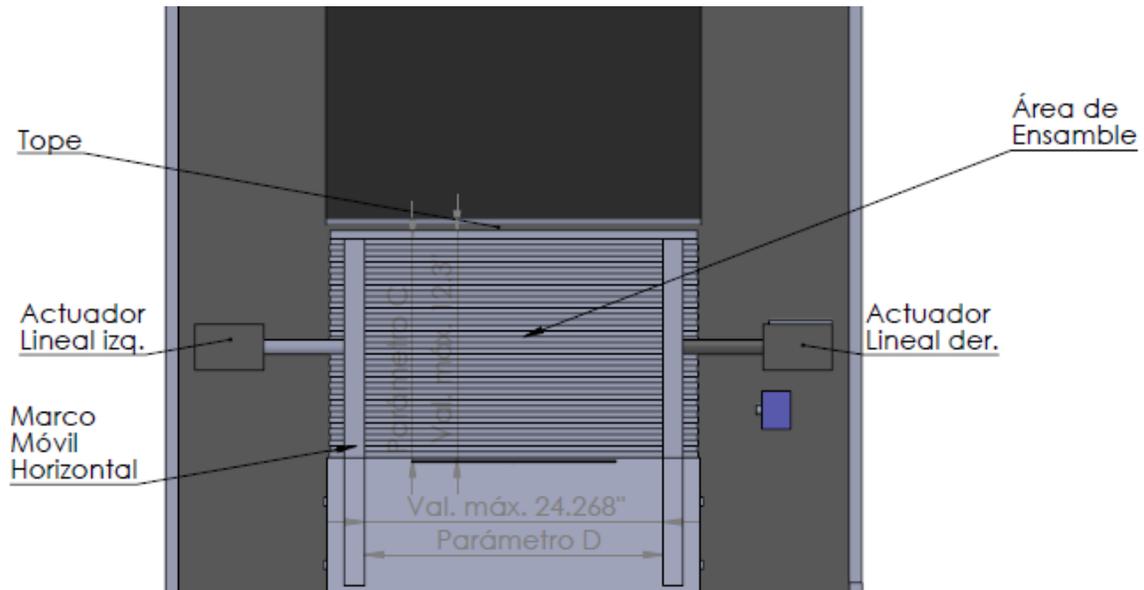
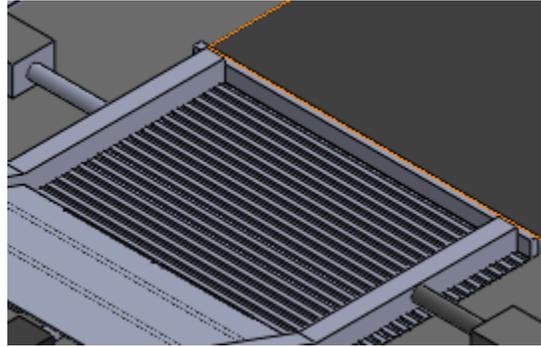


Figura 34: Esquema general de la función realizar apilamiento y su adaptación a las VR del caso de diseño.

iii) Acomodar Partes:

- Afectado por el parámetro: C y D (Alto y Ancho del cuerpo aleteado).
- Concepto de Solución Seleccionado: Sistema de actuadores lineales
- Principio de Arquitectura del concepto de solución: Ajuste
- Propuesta: se proponen un sistema compuesto por dos acomodadores lineales, uno transversal y otro perpendicular al cuerpo del intercambiador de calor. Los actuadores verticales puede extenderse a lo largo del

parámetro C y permiten variación del parámetro D ajustando su posición mediante la variación de su carrera. (Ver Figura 34.)

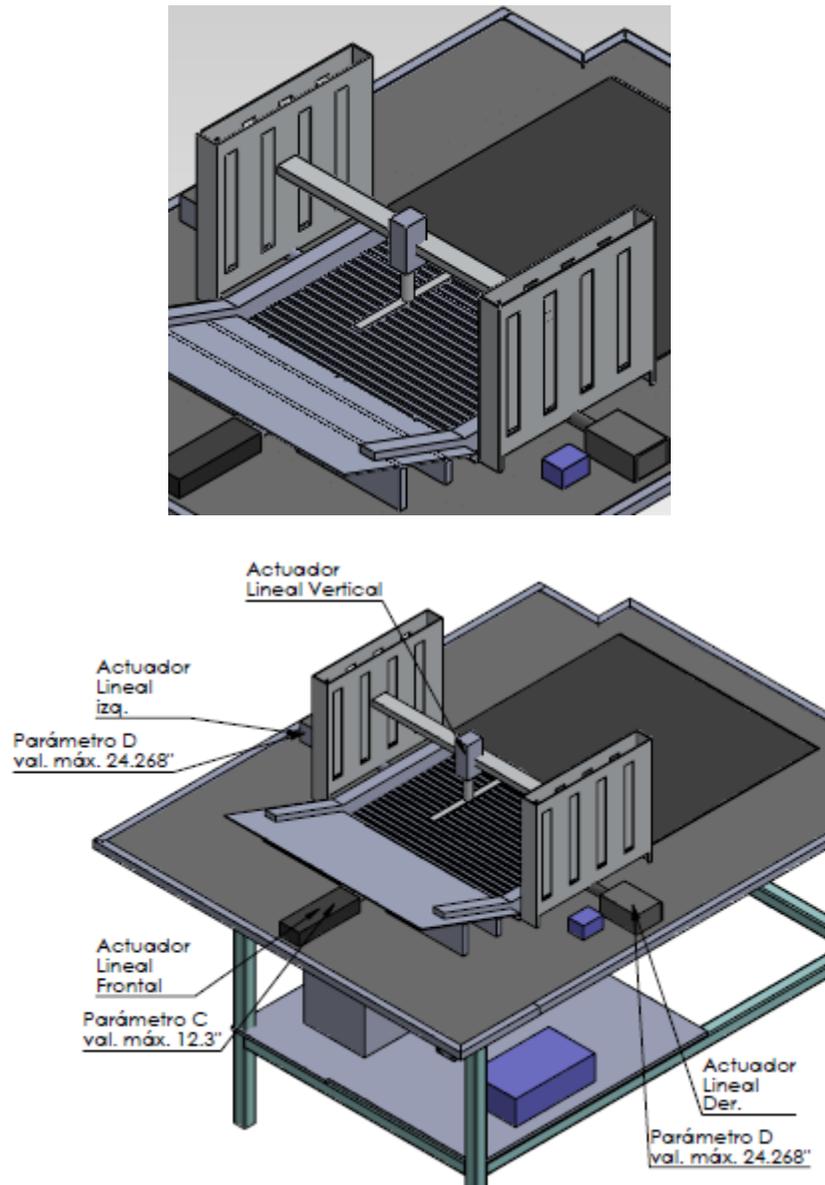


Figura 35: Esquema general de la función acomodar partes y su adaptación a las VR del caso de diseño.

iv) Recibir tanques laterales:

- Afectada por el parámetro: A (Alto del I.C).
- Concepto de Solución Seleccionado: Dispensador Vertical.
- Principio de Arquitectura del concepto de solución: Extensión
- Propuesta: se propone un sistema de dispensador que permita recibir verticalmente los sujetadores laterales. (Ver Figura 35).

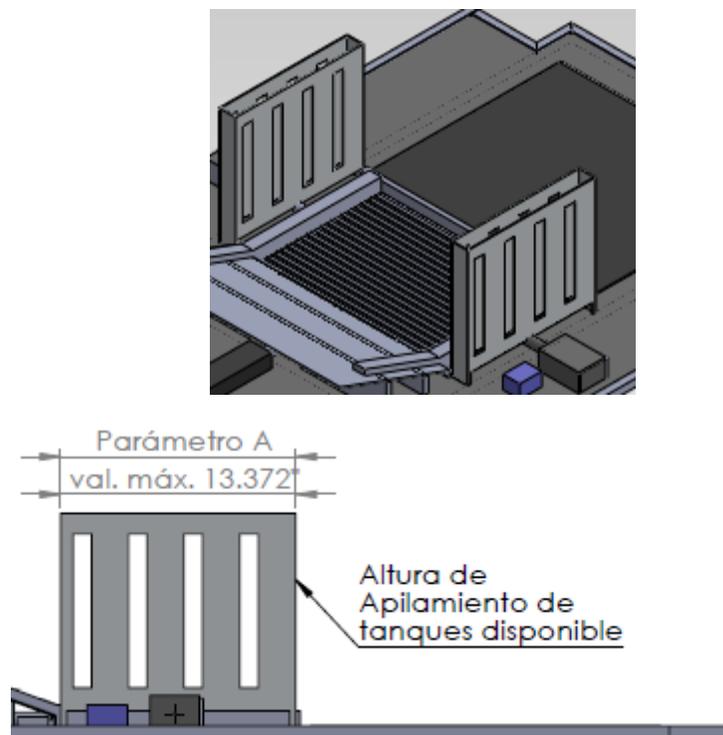


Figura 36: Esquema general de la función recibir tanques laterales y su adaptación a las VR del caso de diseño.

v) Colocar Sujetadores Laterales:

- Afectada por el parámetro: A (Alto del I.C).
- Concepto de Solución Seleccionado: Sistema de actuadores lineales
- Principio de Arquitectura del concepto de solución: Ajuste
- Propuesta: se propone un sistema de dispensador que permita recibir verticalmente los sujetadores laterales con posibilidad de movimiento

horizontal y vertical para permitir asegurar la variación de los parámetros D y C mediante un principio de Ajuste. (Ver Figura 37).

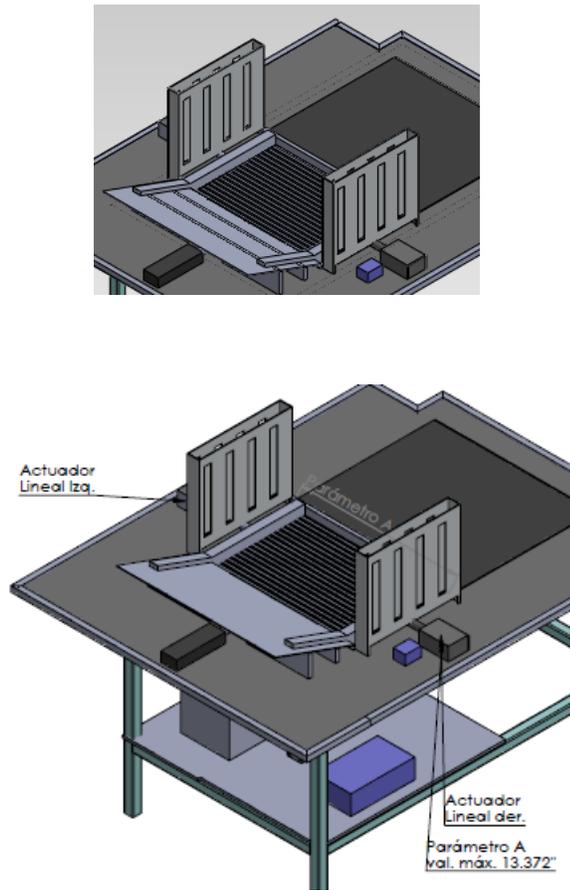


Figura 37: Esquema general de la función colocar tanques laterales y su adaptación a las VR del caso de diseño.

vi) Retirar Intercambiador de Calor:

- Afectada por el parámetro: B (Ancho del I.C).
- Concepto de Solución Seleccionado: Banda Transportadora
- Principio de Arquitectura del concepto de solución: Extensión
- Propuesta: se propone el concepto de solución de banda transportadora, dicha banda cumple el principio de extensión, por lo cual se debe diseñar para el mayor valor del parámetro B. (Ver Figura 38).

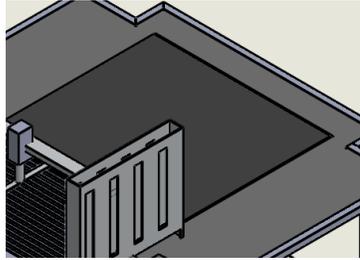


Figura 38: Esquema general de la función retirar Intercambiador y su adaptación a las VR del caso de diseño.

A continuación se describen los valores de los parámetros en cada configuración para cada concepto de solución seleccionado

Tabla 48: Configuraciones y parámetros para los conceptos de solución seleccionados

Config.	Par.	Recibir Partes Sistema de Rieles	Realizar Apilamiento Sistema de Rieles Verticales	Acomodar Partes Sistema de Actuadores Lineales	Recibir Tanques laterales Dispensador Horizontal	Colocar Tanques laterales Sistema de Actuadores Neumáticos	Retirar I.C
1	A	NA	NA	NA	13.372" Extensión val. Máx.	13.372" Extensión val. Máx.	26" Extensión val Máx.
	B	NA	NA	NA	NA	NA	
	C	NA	11.48"	11.48"	NA	NA	
	D	24.268" Extensión val. Máx.	13.268", hasta 24.268" Ajuste	13.268"- 24.268" Ajuste	NA	NA	
2	A	NA	NA	NA	13.372" Extensión val. Máx.	13.372" Extensión val. Máx.	26" Extensión val Máx.
	B	NA	NA	NA	NA	NA	
	C	NA	11.48"	11.48"	NA	NA	
	D	24.268" Extensión val. Máx.	18.268"- 24.268" y 16.268"- 24.268" Ajuste	18.268"- 24.268" y 16.268"- 24.268" Ajuste	NA	NA	

Config.	Par.	Recibir Partes Sistema de Rieles	Realizar Apilamiento Sistema de Rieles Verticales	Acomodar Partes Sistema de Actuadores Lineales	Recibir Tanques laterales Dispensador Horizontal	Colocar Tanques laterales Sistema de Actuadores Neumáticos	Retirar I.C
3	A	NA	NA	NA	13.372" Extensión val. Máx.	13.372" Extensión val. Máx.	26" Extensión val Máx.
	B	NA	NA	NA	NA	NA	
	C	NA	12.3"	12.3"	NA	NA	
	D	24.268" Extensión val. Máx.	15"-26" Ajuste	15"- 26" Ajuste	NA	NA	

4.2 FASES POSTERIORES A LA METODOLOGÍA

Una vez se ha completado la metodología propuesta, cuyo alcance permite desarrollar hasta una etapa básica preliminar el comportamiento físico y funcional del sistema, se procede a completar el diseño básico del sistema que comprende las interacciones entre componentes, dimensiones y valores exactos de los parámetros de ingeniería que determinan el comportamiento del sistema. Posteriormente el diseño de detalle que comprende los planos de ingeniería, dimensionamiento final, tolerancias, acabados etc.

En esta investigación no se desarrollan estas etapas posteriores debido a que la metodología abarca hasta un diseño básico preliminar, y sus aportes son principalmente en la especificación inicial para reconfiguración (Especificación Derivada para Reconfiguración) y diseño conceptual (Diseño Conceptual y de Modularidad). El diseño básico preliminar se propone como un primer acercamiento al diseño básico del sistema, de forma que sirva como conector con las dos etapas finales del diseño formal de ingeniería.

4.3 COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y LOS MÉTODOS TRADICIONALES DE DISEÑO QUE NO CONTEMPLAN RECONFIGURACIÓN

Tabla 49: Etapas de las metodologías tradicional y propuesta en la investigación

ETAPAS	METODOLOGÍA PROPUESTA	ETAPAS METODOLOGÍA DE DISEÑO TRADICIONAL
1	Especificación Inicial.	Especificación Inicial
2	Especificación Derivada para Reconfiguración.	-No existe-
3	Diseño Conceptual y Análisis de Modularidad.	Diseño Conceptual
4	Diseño Básico Preliminar de Módulos y Configuraciones.	Diseño Básico

Tabla 50: Comparación de actividades y enfoques entre la metodología tradicional de diseño y la metodología propuesta en la investigación

Etapa	Metodología Propuesta	Metodología Tradicional	DEFICIENCIAS Met. Tradicional
1	-Creación de Listado de Referencia (Requerimientos y Restricciones, enfoque hacia el ciclo de vida). -Análisis para Calidad QFD.	-Creación de Listado de Referencia (Requerimientos y Restricciones). -Análisis para Calidad QFD.	-
2	-Identificación y Categorización de VR. (Análisis de Parámetros de interés en la Familia de Productos). -Agrupación de VR mediante similaridad. Configuraciones Preliminares	No contempla	-No tiene en cuenta un acercamiento formal hacia los parámetros de interés en la familia de productos. -No considera la agrupación de VR.
3	-Construcción Funcional. -Análisis Funcional de Modularidad. -Análisis de criticidad. -Síntesis conceptual de soluciones para modularidad. -Síntesis de alternativas globales (Criterios de evaluación y del ciclo de vida).	-Construcción Funcional -Análisis Funcional -Síntesis conceptual de soluciones. -Evaluación de alternativas de solución	-No tiene en cuenta como afectan las VR las funciones y subfunciones del sistema. -No discrimina los componentes afectados por las VR. -No existe estandarización de los criterios de evaluación, no tiene en cuenta el principio de arquitectura modular ni el ciclo de vida.
4	-Asignación de Parámetros por Configuración. -Diseño Preliminar Esquemático de Conceptos de solución Seleccionados.	-Aproximación esquemática. -Interacciones del Sistema	-No existe una aproximación inicial al comportamiento físico del sistema para diferentes configuraciones y valores de VR.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

La investigación propuesta se dedicó establecer de manera formal a una metodología de diseño para sistemas (máquinas o sistemas), que permitiera adecuarse a requerimientos globales de diseño y a los parámetros de variación de una familia de productos determinada, agregando principios de arquitectura de modularidad y criterios de evaluación relevantes en el tema de reconfiguración. Este tipo de métodos no existen en la literatura de manera formal, considerando la gran cantidad de acercamientos que se han propuesto para el diseño de Sistemas Reconfigurables.

En el desarrollo de este trabajo de investigación se alcanzaron los objetivos inicialmente planteados en cuanto a:

El desarrollo de una metodología formal orientada a identificar y determinar las alternativas más adecuadas para establecer la arquitectura modular de un sistema, teniendo en cuenta aspectos de evaluación en el área de reconfiguración y del ciclo de vida del producto.

- Determinar el estado del arte en los distintos principios de diseño abarcados para el diseño de sistemas reconfigurables.
- Determinar y clasificar enfoques y acercamientos hacia el diseño de sistemas reconfigurables y su tendencias
- Validar la metodología propuesta sobre un caso de aplicación real, utilizando un portafolio de productos comercial.

1. Del estudio del estado del arte y fuentes más relevantes en el área de reconfiguración se puede concluir:

- La mayor parte de los enfoques de reconfiguración se centran en el desarrollo de máquina-herramienta, existiendo diversas metodologías para agregar reconfiguración y modularizar máquinas para realizar actividades de mecanizado.

- La modularización ha sido el criterio o principio de diseño con mayor concurrencia por parte de los autores que han desarrollado métodos y análisis de reconfiguración.
- No existe unificación en cuanto a los modelos planteados por diferentes autores para evaluar la reconfiguración de un sistema, debido a la ausencia de métodos enfocados a áreas distintas a las de máquina-herramienta reconfigurable, no existen modelos robustos o generales para desarrollar una actividad de diseño formal.

2. De la caracterización de los principios de arquitectura modular estudiados se puede concluir:

- Existen diferentes acercamientos en el área de modularidad, se identificaron dos tendencias principales: modularizar para abarcar distintos niveles de exigencia y modularizar para obtener variación funcional. Se pudieron redefinir los principios de arquitectura modular para enfocarlos en el establecimiento de conceptos de solución de componentes del sistema.
- Desde el punto de vista funcional se pudieron jerarquizar los diferentes principios de arquitectura modular y definir valores de evaluación cuantitativos para comparar y evaluar su desempeño como principio funcional.
- En cuanto al caso de variación del nivel de exigencia de las VR es fundamental jerarquizar las opciones para modularizar de acuerdo a los requerimientos del escenario de fabricación.

3. De la aplicación de la metodología se puede concluir:

- Es posible desarrollar métodos formales de ingeniería modificando y agregando etapas que ayuden a establecer y evaluar conceptos de modularización como alternativas de solución adecuadas, la complejidad y extensión del campo de soluciones puede convertirse en un problema si no se delimitan las alternativas planteadas a partir de algún criterio de ingeniería.
- Es preferible que la metodología sea desarrollada por un grupo interdisciplinario y apoyándose en software de evaluación para facilitar la labor de selección y asignación de valoraciones.

- Se desarrollaron actividades y métodos dentro de la metodología que permiten definir y desarrollar un proceso de diseño teniendo en cuenta criterios de reconfiguración y de modularidad para facilitar abarcar las variables de reconfiguración de la familia de productos.
- Los modelos tradicionales de diseño resultan ineficientes para diseñar teniendo en cuenta aspectos de reconfiguración, no consideran las variables de reconfiguración de la familia de productos, métodos de modularización ni desempeño del sistema respecto a criterios específicos de reconfiguración.

5.2 RECOMENDACIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Como recomendaciones finales para continuar con esta línea de investigación se propone abordar los siguientes temas:

- Desarrollo de Software reconfigurable, que permita la fácil adaptación de Hardware, configuraciones y parámetros de reconfiguración teniendo en cuenta el control y automatización del sistema.
- Formular metodologías específicas para la evaluación de la reconfiguración en general de cualquier sistema o máquina, teniendo en cuenta el número de componentes, configuraciones requeridas y tipos de demanda que rigen el cambio en las características del portafolio de productos.
- Desarrollar metodologías que permitan definir adecuadamente las interfases requeridas en sistemas y máquinas reconfigurables, teniendo en cuenta requerimientos funcionales y aspectos del ciclo de vida del producto.
- Ampliar sobre el estudio de principios de arquitectura modular, realizar caracterizaciones específicas sobre criterios funcionales y en cada etapa del ciclo de vida.
- Se deben consolidar criterios de evaluación generales y específicos para cada caso de diseño así como sus niveles con el fin de disminuir la subjetividad existente al momento de escoger el principio de arquitectura modular más adecuado.

CAPITULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi, M. (2009). Fuzzy multi-criteria decision model for evaluating reconfigurable machines. *Int. J. Production Economics*, 117: 1-15.
- Abele, E., Wörn, A., Fleischer, J., Wieser, J., Martin, P., & Klöpper, R. (2007). Mechanical module interfaces for reconfigurable machine tools. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 1: 421-428.
- Adolfsson, J., Olofsgard, P., Moore, P., Pu, J., & Wong, C. (2002). Design and simulation of component-based manufacturing machine systems. *Mechatronics*, 12, 1239-1258.
- Ahmed, D. M., & ElMaraghy, W. (2007). Investigating optimal capacity scalability scheduling in a reconfigurable manufacturing system. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 32: 557-562.
- Albus, J. (1993). A Reference Model Architecture for Intelligent Systems Design, http://www.ids.mel.nist.gov/documents/albus/Ref_Model_Arch345.pdf.
- Arai, T., Aiyama, Y., Sugi, M., & Ota, J. (2001). Holonic assembly system with plug and produce. *Compu. Indust.*, 46, 289-299.
- Asl, F., Ulsoy, A., & Koren, Y. (2000). Dynamic modeling and stability of the reconfiguration of manufacturing systems. *Proceedings of the Japan-USA symposium on Flexible Automation*. Ann Arbor, Michigan.
- Benhabib, B., Chan, K., & Dai, M. Q. (1991). A modular programmable fixturing system. *ASME J. Eng. Indust*, 113, 93-99.
- Bi, Z. M., Lang, S. Y., Sheng, W., & Wang, L. (2008). Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art. *International Journal of Production Research*, 46; 4, 967-992.
- Bi, Z., & Zhang, W. J. (2001). Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *Int. J. Prod. Res*, 39;13, 2867-2894.
- Bostelman, R., Jacoff, A., Proctor, F., Kramer, T., & Wavering, A. (2000). Cable-based reconfigurable machines for large scale manufacturing. *Proceedings of the 2000 Japan-Usa Symposium on Flexible Automation*. Michigan.
- Carnahan, D., Chung, D., & delaHostria, E. (2006). Improved responsiveness of reconfigurable manufacturing systems using a standards-based approach to asses manufacturing capacity. *Int. J. Flex. Manuf Syst*, 18: 209-223.
- Chen, I. (2001). Rapid responde manufacturing through reconfigurable robotic workcells. *J. Robotics Comptu. Integr. Manuf*, 17(3), 199-213.

- Chick, S., Olsen, T., Sethuraman, K., Stecke, K. E., & White, I. C. (2000). A descriptive multi-attribute model for reconfigurable machining system selection examining buyer-supplier relationship. *Int. J. Agile Manage Sys.*, 2(1), 33-48.
- Cooke, A., Shankar, N., Jones, L., Ewaldz, D., Haynes, L., Martínez, D., y otros. (1995). Advanced reconfigurable machine for flexible fabrication. *SPIR*, 2447, 102-114.
- Dieter, G. (2000). *Engineering design: a materials and processing approach*. Boston: McGraw-Hill college.
- ElMaraghy, H. A. (2006). Flexible and Reconfigurable manufacturing systems paradigms. *Int. J. Flex. Manuf. Syst.*, 17; 261-276.
- Erixon, G. (1998). *Modular function deployment- a method for product modularisation. Doctoral Thesis*. Stockholm: Royal Institute of Technology.
- Erol, N., Altintas, Y., & Ito, M. (2000). Open system architecture modular tool kit for motion and machining process control. *IEEE/ASME Trans. Mechatr*, 5(3), 281-291.
- Farias, P., Aca, J., Molina, A., Maury, H., & Riba, C. (2006). Evolución de los modelos del proceso de diseño. En C. Riba, & A. Molina, *Ingeniería Concurrente* (págs. 21-36). Barcelona, España: Ediciones UPC.
- Fassi, I., & Wiens, G. J. (2000). Multiaxis machining: PKMs and traditional machining centers. *J. Manuf. Process*, 2(1), 1-13.
- Faulkner, D., Levy, B., & Garner, T. (1999). Open-architecture platforms. *Circuits Assembly, January*, <http://www.cassembly.com>.
- Ferrer, I. (2007). Contribución Metodológica en Técnicas de Diseñar para Fabricación. Tesis de Doctorado. En D. d. Industrial. Girona.
- Fujii, S., Morita, H., Kakino, Y., Ihara, Y., Takata, Y., Murakami, D., y otros. (2000). Highly productive and reconfigurable manufacturing system. *Proc. Pacific. Conf. Manuf.*, 2, 970-980.
- Fukuda, T., & Takagawa, I. (2000). Desing and control of flexible transfer system. *Proceedings of the 3rd Word Congress on Intelligent Control and Automation June 28- July 2. Heifei, China*, 17-22.
- Galán, R., Racero, J., Eguia, I., & Canca, D. (2007). A methodology for facilitating reconfiguration in manufacturing: the move towards reconfigurable manufacturing systems. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 33, 345-353.
- Giusti, F., Santochi, M., & Arioti, A. (1994). A reconfigurable assembly cell for mechanical products. *Ann. CIRP*, 907-912.
- Hartel, M., & Lotter, B. (2006). Planung und Bewertung von Montagesystemen (Planning and evaluation of assembly systems). En B. Lotter, & H. Wiendahl, *Assembly in industrial production* (págs. 407-432). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.

- Heilala, J., & Voho, P. (2001). Modular reconfigurable flexible final assembly systems. *Assembly Automat*, 21(1), 20-28.
- Ho, J., & Ranky, P. (1997). Object oriented modeling and design of reconfigurable conveyors in flexible assembly systems. . *Int. J. Compu. Integr. Manuf.*, 10(5), 360-379.
- Hong, N., & Hong, S. (1998). Entity-based models for computer-aided design systems. *J. Comp. Civil Eng.*, 12(1), 30-41.
- Katz, R. (2007). Design principles of reconfigurable machines. *Int J. Adv. Technol* , 34, 430-439.
- Katz, R., Li, Z., & Pierrot, F. (2002). *Engineering Research Center for Reconfigurable Machining Systems: Conceptual Design of a High-speed Drilling Machine (HSDM) Based on PKM Module*. College of Engineering. The University of Michigan, Ann Arbor: ERC/RMS Report #7.
- Kaula, R. (1998). A modular approach toward flexible manufacturing. *Integr. Manuf. Sys.*, 9(2), 77-86.
- Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Prischow, G., Ulsoy, G., y otros. (1999). Reconfigurable Manufacturing Systems. *Keynote Papers, Annals of the CIRP Vol 482/2*, 526-540.
- Kota, S., & Chiou, S. (1992). Conceptual design of mechanisms based on computational synthesis and simulation of kinematic building blocks. *Res. Eng. Design*, 4, 75-87.
- Kuhnle, H. (2001). A state-time model to measure the reconfigurability of manufacturing areas- key to performance. *Integr. Manuf. Sys.* , 12(7), 493-499.
- Lee, G. (1997). Reconfigurability consideration design of components and manufacturing systems. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 13, 376-386.
- Leger, C. (1999). *Automated synthesis and optimization of robot configurations: an evolutionary approach*. *Phd Thesis*. Pittsburgh, PA, USA: Carnegie Mellon University.
- Levin, M. S. (2002). Towards combinatorial analysis, adaptation, and planning of human-computer systems. *Appl. Intell.*, 16(3), 235-247.
- Liles, D., & Huff, B. (1990). A computer based production scheduling architecture suitable for driving a reconfigurable manufacturing system. *Compu. Indust*, 19(1-4), -5.
- Maury, H. (2000). *Aportaciones Metodológicas al Diseño Conceptual: Aplicación a los sistemas continuos de manipulación y procesamiento primario de materiales a granel*. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya.
- Mehrabi, M. G., & Kannatey-Asibu, E. (2001). Mapping theory: a new approach to design of multi-sensor monitoring of reconfigurable machining system (RMS). *J. Manuf. Sys*, 20(5), 297-303.

- Mehrabi, M., Ulsoy, A. G., & Koren, Y. (2000). Reconfigurable manufacturing systems: Key to the future manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11,403-419.
- Mehrabi, M., Ulsoy, A., & Y.Koren. (2000a). Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. *Int. J. Manuf Technol. Manage*, 135-146.
- Mehrabi, M., Ulsoy, A., Koren, Y., & otros, &. (2002). Trends and Perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13/2, 135-146.
- Mellor, C. (2002). Quick-change artists: why tech must get ready for reconfigurable manufacturing. *Ontario Technol. January/February*, 12-15.
- Molina, A., Rodriguez, C., Ahuett, H., Cortés, J., M.Ramírez, Jiménez, G., y otros. (2005). Next-generation manufacturing systems: key research issues in developing and integrating reconfigurable and intelligent machines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18;7, 525-536.
- Moriwaki, T., & Nonobik, M. (1994). Object-oriented design support system for machine tools. *J. Intell. Manuf*, 5, 47-54.
- Pahl, G., Beitz, W., Wallace, K., Blessing, L., & Bauert, F. (1996). *Engineering design: a systematic approach*. London: Springer.
- Paredis, C. (1996). *An agent-based approach to the design of rapidly deployable fault tolerant manipulators. PhD thesis*. Pittsburgh, PA: Department of Electrical and Computer Engineering Carnegie Mellon University.
- Paredis, C., & Khosla, P. (1993). Serial link manipulators from task specifications. *Int. Robot. Res.* , 12(3), 274-287.
- Perremans, P. (1996). Feature-based description of modular fixturing elements: the key to an expert system for the automatic design of the physical fixture. *Adv. Eng. Software*, 25(1), 19-27.
- Pritschow, G., Altintas, Y., Jovane, F., Koren, Y., Mitsubishi, M., Takata, S., y otros. (2001). Open controller architecture - past, present and future. *Ann. Int. Inst. Prod. Eng. Res.(CIRP Ann)*, 50(2), 463-470.
- Pugh, S. (1991). *Total Design: integrated methods for successfull product engineering*. Wokingham: Addison-Wesley.
- Riba, C. (2002). *Diseño Concurrente*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Rogers, G. G., & Botacci, L. (1997). Modular production systems: a new manufacturing paradigm. *J. Intell. Manuf*, 8, 14-156.
- Shirinzadeh, B. (1993). Issues in the design of the reconfigurable fixture models for robotic assembly. *J. Manuf. Sys.*, 12(1), 1-14.

- Stone, R. B. (2000a). A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design studies*, 21, 5-31.
- Stone, R. B. (2000b). Using quantitative models to develop product architectures. *Design Studies*, 239-260.
- Sugi, M., Maeda, Y., Aiyama, Y., & Arai, T. (2001). Holonic robot system: a flexible assembly system with high reconfigurability. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automat. Seoul, Korea May 21-26*, 799-805.
- To, T. K., & Ho, J. K. (2001). A Genetic Algorithm for Configuring Reconfigurable Conveyor Components in a Flexible Assembly Line System. *Artículo no Publicado*, 1-15.
- Tsai, Y., & Wang, K. (1999). The development of modular-based design in considering technology complexity. *Eur. J. Oper. Res.*, 119, 692-703.
- Tseng, M., & Jiao, J. (1997). A variant approach to product definition by reconizing functional requirements patterns. *J. Eng. Design*, 18(4), 329-340.
- Tsukune, H., Tsukamoto, M., Matsushita, T., Tomita, F., Okada, K., Ogasawarara, T., y otros. (1993). Modular Manufacturing. *J. Intell. Manuf*, 4, 163-181.
- Ueda, K., Markus, A., Monoston, L., Kals, H., & T, A. (2001). Emergent synthesis methodologies for manufacturing. *Ann. CIRP*, 50(2), 535-551.
- Ullman, D. (1992). *The mechanical design process*. New York, London: McGraw-Hill.
- Watson, I. (1999). Case-based reasoning is a methodology not a technology. *Knowledge-Based Sys.*, 12, 303-308.
- Weston, R. (1999). Model-driven, component-based approach to reconfiguring manufacturing software systems. *Int. J. Oper. Prod. Manage*, 19(8), 834-855.
- Wiendahl, H., ElMaraghy, H., Nyhuis, P., Zah, M., Duffie, N., & Brieke, M. (2007). Changeable Manufacturing- Classification, Design and Operation. *Annals of the CIRP*, 56/2, 783-809.
- Wiendahl, H., ElMaraghy, H., Nyhuis, P., Zah, M., Wiendahl, H., Duffie, N., y otros. (2007). Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *Annals of the CIRP*, 56/2; 783-809.
- Zhao, X., Wang, K., & Luo, Z. (2000). A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part I, a framework. *Int. J. Prod. Res*, 38(10), 2273-2285.

ANEXOS

ANEXO 1: CARACTERIZACIÓN DE PRINCIPIOS DE ARQUITECTURA MODULAR

Debido a los enfoques de diversos autores y a la recurrencia de la modularización como principio fundamental de diseño en sistemas reconfigurables, se planteará una metodología centrada en la utilización de principios de arquitectura modular.

En este anexo se caracterizan de manera integral los principios de arquitectura modular propuestos por (Miller & Elgaard, 1999) con el fin de desarrollar y asignar criterios adecuados para la evaluación de soluciones desde el punto de vista funcional y así obtener una metodología de selección con mayor robustez y que satisfaga las necesidades de reconfiguración.

Se propone la utilización de 8 principios de arquitectura modular, dichos principios han sido redefinidos para adecuarse al comportamiento de funciones y subfunciones del sistema, de forma que puedan aplicarse a conceptos de solución y agregar reconfiguración al diseño.

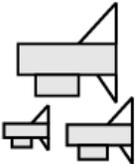
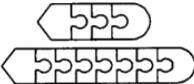
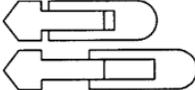
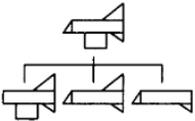
1.1 Descripción de Principios de Arquitectura Modular

A continuación se redefinen los principios de arquitectura modular a partir de las definiciones (Miller & Elgaard, 1999). Se describe el concepto general y las principales ventajas y limitantes de cada uno de ellos. Se ha procedido a dividir los principios estudiados en tres grupos principales: i) Principios para variación en niveles de exigencia de las VR, ii) Principios para variación funcional y iii) Principios de arquitectura modular mixtos.

1.1.1 Principios de Arquitectura Modular para Variación en niveles de exigencia de VR.

Esta serie de principios se emplean para permitir la variación en diferentes niveles de exigencia de las variables de ingeniería asociadas a la reconfiguración del sistema. En la Tabla 51 se enlistan los cuatro principios que conforman esta categoría.

Tabla 51: Descripción General de Principios para Variación en niveles de exigencia de VR. Tomado de (Riba, 2002). Conceptos redefinidos para aplicarlos a conceptos de solución de para alternativas.

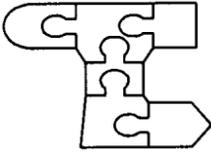
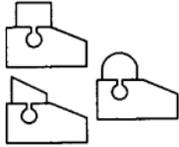
Tipos de Arquitectura Modular según (Miller & Elgaard, 1999)	
<p>Arquitectura 1</p> 	<p>Escalonamiento (Size Range)</p> <p>Concepto: Tipo de arquitectura en la cual un conjunto de módulos varía fundamentalmente un uno o más parámetros de carácter general, por lo general el tamaño. Los módulos realizan la misma función, y comparten el mismo principio físico, su diseño básico y los mismos procesos de fabricación.</p> <p>Ventajas: -Las variables de reconfigurabilidad se centran en los módulos, y debido a esto cada vez que sea necesario realizar cambios en el portafolio de productos, la reconfigurabilidad se centrará en dichos módulos.</p> <p>Limitaciones: -Si existen muchos productos y las VR varían por cada producto, la reconfigurabilidad del sistema se hace más compleja.</p>
<p>Arquitectura 2</p> 	<p>Apilamiento (Stack modularity)</p> <p>Concepto: Arquitectura en la cual los módulos se pueden apilar con el fin de aumentar el desempeño en cualquier parámetro o VR. Los módulos se conectan mediante interfases del mismo tipo.</p> <p>Ventajas: -Fácil Ensamble y Reconfiguración -Simplifica el diseño y facilita abarcar parámetros y VR que varían escalonadamente mediante pasos iguales.</p> <p>Limitaciones: -A medida que se aumenten las VR y el número de pasos se hace engorroso el apilamiento por exceso de módulos. -Los pasos entre VR por lo general son fijos.</p>
<p>Arquitectura 3</p> 	<p>Ajuste (Adjustment)</p> <p>Concepto: Tipo de arquitectura en la cual se utiliza un módulo con diferentes grados de adaptación para las VRs, permitiendo cubrir cambios en requerimientos y valores preestablecidos de las VR.</p> <p>Ventajas: -Permite agrupar varias configuraciones de fabricación en un mismo módulo. -Ofrece mayor facilidad de reconfiguración entre valores de parámetros y VR cercanas. -Reduce el número de operaciones de reconfiguración.</p> <p>Limitaciones: -La cantidad y valores de los parámetros y VR son fijas para cada módulo.</p>
<p>Arquitectura 4</p> 	<p>Extensión (Widening)</p> <p>Concepto: Tipo de arquitectura en la cual se genera un único módulo capaz de satisfacer todas las configuraciones y VR's del sistema. No existe una variación funcional significativa por lo cual el módulo puede satisfacer</p>

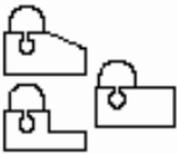
	<p>cualquier configuración considerada durante el diseño.</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -No requiere operaciones de reconfigurabilidad. <p>Limitaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Adecuado para altos volúmenes de fabricación, donde no existan variantes en las VR's. -Los módulos se consideran fijos y deben ser rediseñados cada vez que se alteren sus subfunciones y los parámetros asociados.
--	---

1.1.2 Principios de Arquitectura Modular para Variación Funcional

En la Tabla 52 se muestran tres principios de arquitectura modular agrupados en la categoría de Variación Funcional, en la cual los principios se utilizan para agregar funciones específicas dentro del sistema y en diferentes configuraciones.

Tabla 52: Descripción General Principios de Arquitectura Modular para Variación Funcional.

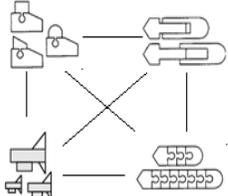
Tipos de Arquitectura Modular según (Miller & Elgaard, 1999)	
Arquitectura 5	Modularidad Seccional
	<p>Concepto: Arquitectura en la cual los módulos se pueden unir mediante interfases iguales en formas arbitrarias para conformar sistemas con diferente funcionalidad y nivel de exigencia.</p> <p>Ventajas: Posee pocas limitaciones estructurales y permite fácilmente la formación de secuencias, árboles y otras combinaciones.</p> <p>Limitaciones: Llega a ser complejo el manejo de gran cantidad de módulos si se requieren grandes variedades de funciones o escalones entre las variables de reconfiguración. El diseño es más complejo debido a que se debe permitir una amplia gama de configuraciones y configuraciones utilizando los recursos disponibles.</p>
Arquitectura 6	Componentes Permutados (ComponentSwappingModularity)
	<p>Concepto: En este tipo de arquitectura se propone la utilización de módulos que pueden ser ensamblados con el mismo componente base, con esto se logra crear mayores variantes de VR's (Diversidad de operaciones, funciones, etc.)</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Permite diversidad de funciones y operaciones -Ofrece reconfigurabilidad si se manejan interfases comunes, así como labores de mantenimiento y montaje. <p>Limitaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Cambios entre configuraciones pueden ser más complejos si no se estandarizan interfases. -Cada módulo debe ofrecer flexibilidad frente a cada VR que se contemple.
Arquitectura 7	Modularidad de Componentes Compartidos (Component-Sharing Modularity)

	<p>Concepto: Arquitectura en la cual un mismo módulo puede hacer parte de varios subsistemas dentro del sistema de fabricación. Los módulos se pueden emplear en distintos sistemas ofreciendo siempre la misma función.</p> <p>Ventajas: -Minimizan la Variedad Inútil y aumentan la estandarización de un proceso específico. -Permite la utilización de una misma función en diferentes etapas o configuraciones del sistema.</p> <p>Limitaciones: Baja variedad funcional.</p>
---	---

1.1.3. Principios de Arquitectura Modular Mixta

En esta última categoría se encuentran los principios que se obtienen a partir de la combinación de dos o más principios de arquitectura de los mencionados anteriormente, estos principios resultantes pueden alcanzar mayor reconfiguración y combinar tanto variación en los niveles de exigencia como variedad funcional.

Tabla 53: Descripción Principios de Arquitectura Modular Mixta

Arquitectura 8	Modularidad Mixta
	<p>Concepto: Tipo de arquitectura que contempla la combinación de dos o más de las arquitecturas anteriormente mencionadas, este tipo de arquitectura se considera como el más complejo posible. Ofrece las mayores posibilidades en cuanto a reconfiguración pero debe ser diseñado cuidadosamente para evitar excesos en operaciones, módulos y subutilización de los recursos disponibles.</p> <p>La modularidad mixta implica un grado de complejidad mayor, debido a esto se debe contar con un diseño avanzado en control y automatización.</p> <p>Entre los principios mixtos que se pueden generar se tiene:</p> <p>Ajuste-módulo Permutado: Diferentes módulos con funciones específicas y con capacidad de variar el nivel de exigencia de sus VR.</p> <p>Ajuste-módulo Compartido: Diferentes módulos con única función específica y con capacidad de variar el nivel de exigencia de sus VR.</p> <p>-Escalonamiento-Ajuste: Diferentes módulos con variaciones de nivel de exigencia particulares en rangos crecientes dependiendo los niveles.</p> <p>Escalonamiento-módulo Permutado: Diferentes módulos con variaciones funcionales y en diferentes niveles de exigencia.</p>

1.2 Caracterización por Criterios

Con el fin de comparar y diferenciar cada uno de los tipos de arquitectura modular abarcados en esta investigación se procede a caracterizar los principios teniendo en cuenta los siguientes criterios de interés y sus matrices de valoración para

establecer cuantitativamente el desempeño de cada principio de arquitectura modular respecto a cada criterio. Dichos criterios se han dividido en dos grupos: para variación en el nivel de exigencia y de variedad funcional. A continuación se describen los criterios y las valoraciones establecidas para cada uno de ellos en cada grupo.

Criterios para evaluación de principios de arquitectura para variación en el nivel de exigencia

1) Facilidad de Reconfiguración: Criterio asociado a la complejidad de cambio entre diferentes configuraciones del sistema, se centra en el tipo de variación de Variables de Reconfiguración que presenta el portafolio de productos dentro de un lanzamiento de productos. Esta variación puede presentarse en intervalos de diferentes tamaños y la variación puede ser continua o discreta.

2) Adaptabilidad a cambios en VR: se mide a partir de la facilidad para ajustarse a cambios en los valores de las Variables de Reconfiguración cuando se realiza la incursión de nuevos productos o se cambia el portafolio completo.

3) Movilidad: criterio que evalúa la facilidad para mover el sistema y su volumen a partir de la influencia de la variación de las VR sobre el tamaño del sistema.

4) Independencia Modular: criterio asociado a la centralización de la reconfiguración y la dependencia funcional del sistema respecto a los módulos. Una reconfiguración centralizada permite trabajar utilizando un volumen bajo de módulos pero está limitado a la disponibilidad de dichos módulos, un sistema con independencia modular permite operar a diferentes capacidades con un número mayor de módulos y garantiza una operación parcial ya que la disponibilidad de operación del sistema no depende de módulos específicos.

5)Tiempo de Vida Útil: criterio que evalúa la vida útil relativa del principio de arquitectura modular a partir de la utilización de los módulos, en este aspecto se evalúa la capacidad del principio de utilizarse en diferentes lanzamientos de portafolio de productos.

A continuación se muestran las valoraciones cualitativas y cuantitativas para los principios de arquitectura modular mencionados en esta categoría.

Valoración de criterios de evaluación y sus niveles para principios de arquitectura modular de variación en el nivel de exigencia

Tabla 54: Clasificación para el desempeño de los principios en facilidad de reconfiguración

Calificación	Nivel	Descripción
10	Muy Alta	El principio permite variación continua en intervalos grandes.
8	Alta	El principio permite variación continua en intervalos pequeños.
6	Media	El principio permite variación en pasos irregulares en intervalos de cualquier tamaño.
4	Baja	El principio permite variación en pasos regulares en intervalos grandes.
2	Muy Baja	El principio permite variación en pasos regulares en intervalos pequeños.

Tabla 55: Clasificación para el desempeño de los principios en adaptabilidad a cambios en valores de las variables de reconfiguración.

Calificación	Nivel	Descripción
10	Muy Alta	Valores de variación dentro del rango actual.
8	Alta	Valores con variación leve dentro del rango actual, se requieren modificaciones leves.
6	Media	Valores puntuales dentro del rango actual.
4	Baja	Valores puntuales con variación leve fuera del rango actual, se requieren modificaciones considerables.
2	Muy Baja	Valores de variación totalmente diferentes dentro del rango.

Tabla 56: Niveles de evaluación para Movilidad

Calificación	Nivel	Descripción
10	Muy Alta	El rango de la variable no afecta el tamaño del sistema. (Único Módulo)
8	Alta	El rango de la variable afecta de forma leve el tamaño del sistema (Único Módulo de tamaño considerable).
6	Media	El rango de la variable afecta parcialmente el tamaño del sistema (se requiere más de un módulo).
4	Baja	El rango de la variable afecta el tamaño del sistema (se requiere mas de un módulo).
2	Muy Baja	El rango de la variable afecta directamente el tamaño del sistema. Imposibilidad de usar un único módulo.

Tabla 57: Niveles de evaluación para Independencia Modular

Calificación	Nivel	Descripción
10	Muy Alta	Se requiere total independencia
8	Alta	Se requiere independencia de componentes específicos
6	Media	Se requiere una independencia parcial
4	Baja	Se requiere poca independencia
2	Muy Baja	No se requiere independencia, sistema estrictamente acoplado

Tabla 58: Niveles de evaluación para Vida Útil

Calificación	Nivel	Descripción
10	Alta	Vida útil igual a la de los componentes de plataforma
5	Media	Vida útil al menos de 2 lanzamientos de producto con modificaciones
1	Baja	Vida útil igual a el lanzamiento de producto

Criterios de Evaluación para principios de arquitectura modular para variación funcional.

1) Facilidad de Reconfiguración (variación funcional): Criterio asociado a la complejidad del procedimiento de cambio de una configuración a otra, tiene en cuenta el tipo de arquitectura del sistema (fija o aleatoria) y la complejidad de las funciones que se deben reconfigurar.

2) Variedad Funcional: criterio de evaluación relacionado con la capacidad del principio de ofrecer de una función dentro del sistema. Se aplica a los principios de arquitectura modular para variación funcional y de arquitectura mixta.

3) Independencia Modular (variación funcional): criterio asociado a la centralización de la reconfiguración y la dependencia funcional del sistema respecto a los módulos. Una reconfiguración centralizada permite trabajar utilizando un volumen bajo de módulos pero está limitado a la disponibilidad de dichos módulos, un sistema con independencia modular permite operar a diferentes capacidades con un número mayor de módulos y garantiza una operación parcial ya que la disponibilidad de operación del sistema no depende de módulos específicos.

Valoración de criterios de evaluación y sus niveles para principios de arquitectura modular de variación funcional.

Tabla 59: Niveles de evaluación facilidad de Reconfiguración en variación funcional

Calificación	Nivel	Descripción
10	Muy Alta	Arquitectura fija, función convencional
8	Alta	Arquitectura fija, funciones convencionales
6	Media	Arquitectura fija, funciones especializadas
4	Baja	Arquitectura no definida, funciones convencionales
2	Muy Baja	Arquitectura no definida, funciones especializadas

Tabla 60: Niveles de evaluación Variedad Funcional en variación funcional

Calificación	Nivel	Descripción
10	Muy Alta	El principio permite modularizar más de dos funciones con variación en los niveles de exigencia.
8	Alta	El principio permite modularizar mínimo dos funciones con variación en el nivel de exigencia.
6	Media	El principio permite modularizar mínimo dos funciones sin variación en el nivel de exigencia.
4	Baja	El principio permite exclusivamente modularizar una función con diferentes niveles de exigencia.
2	Muy Baja	El principio permite exclusivamente modularizar una función sin variación en el nivel de exigencia.

Tabla 61: Niveles de evaluación para independencia modular en variación funcional

Calificación	Nivel	Descripción
5	Muy Alta	Se requiere total independencia
3	Media	Se requiere una independencia parcial
1	Muy Baja	No se requiere independencia, sistema estrictamente acoplado.

Evaluación Relativa de Principios de Arquitectura Modular: a partir de los criterios de evaluación y de la descripción general de los principios de Arquitectura Modular estudiados a continuación se muestran los rangos de calificación entre los cuales varían cada uno de los principios de arquitectura en cada uno de los criterios. (Ver Tablas 62 y 63).

Tabla 62: Rangos cualitativos de criterios de evaluación para reconfiguración en principios de variación de exigencia en VR.

Criterios de Caracterización	Principios de variación de exigencia en VR		
	Escalonamiento	Apilamiento	Ajuste
Facilidad de Reconfiguración	Muy Baja-Baja	Muy Baja-Media	Media-Muy Alta
Adaptabilidad a cambios en VR	Muy Baja-Media	Muy Baja-Media	Media-Muy Alta
Movilidad	Muy Baja-Baja	Muy Baja-Media	Alta- Muy Alta
Independencia Modular	Alta-Muy Alta	Media-Muy Alta	Muy Baja-Baja
Tiempo de Vida Útil	Alta	Media	Media

Tabla 63: Rangos cualitativos de criterios de evaluación para reconfiguración en Principios de Variación Funcional.

Criterios de Caracterización	Principios de Variación Funcional		
	M. Permutados	M. Compartidos	Seccional
Facilidad de Reconfiguración	Muy Baja-Media	Muy Baja-Media	Muy Baja-Media
Variedad Funcional	Media-Alta	Muy Baja	Alta
Independencia Modular	Media-Alta	Alta	Baja-Media

ANEXO 2: VALORACIONES CRITERIOS PARA EL CICLO DE VIDA

A continuación se describen las valoraciones establecidas para la evaluación de los criterios para el ciclo de vida.

Disponibilidad de Proveedores de componentes

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Alto	Disp. Comercial, Local
6	Media	Disp. Comercial, Nacional.
3	Baja	Disp. Comercial, Internacional

Complejidad del Proceso

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Baja	Tecnologías comunes
6	Media	Tecnologías especiales
3	Alta	Tecnologías de punta

Inversión Inicial

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción Costo (USD)
9	Baja	<10 ⁴
6	Media	10 ⁴ -10 ⁵
3	Alta	10 ⁵ -10 ⁶

Movilidad del Sistema

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Alto	Movilidad Manual
6	Media	Movilidad Manual /asistida por herramientas.
3	Baja	Movilidad mediante equipo especializado.

Costo de Instalación

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
3	Alto	Personal Calificado/ uso herramientas especializadas/ tiempos medios-altos.
6	Media	Personal Calificado/Usó herramientas especializadas/ tiempos cortos.
9	Baja	Personal con baja capacitación/ uso herramientas comunes.

Confiabilidad

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Alto	Sistema automático
6	Media	Sistema semi-automático/asistido
3	Baja	Manual

Seguridad en la Operación

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Alto	No requiere uso de elementos de seguridad personal para su manipulación.
6	Media	Req. Elementos de seguridad personal para su manipulación.
3	Baja	Req. Elementos de seguridad personal para su manipulación y en el ambiente.

Complejidad de uso

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
3	Alto	Requiere capacitación avanzada, uso de software especial.
6	Media	Requiere capacitación, herramientas especializadas.
9	Baja	No requiere capacitación, herramientas comunes.

Uso de Recursos

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
3	Alto	Requiere consumibles, alto consumo energético
6	Media	Requiere consumibles, consumo energético
9	Baja	No requiere consumibles

Movilidad en Mantenimiento

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Alto	Movilidad Manual
6	Media	Movilidad Manual/Asistida
3	Baja	Movilidad mediante equipo especializado.

Costo de Mantenimiento

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
3	Alto	Tiempos > 3 días, personal y herramientas especializadas
6	Media	Tiempos entre 1 y 3 días, personal y herramientas comunes.
9	Baja	Tiempos < 1 día. Personal y herramientas comunes.

Facilidad de Actualización

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Alto	Uso de la mayor parte de los recursos sin modificaciones.
6	Media	Requiere modificaciones leves
3	Baja	Requiere modificaciones severas

Reusabilidad del Sistema

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Alto	Todo el sistema puede emplearse para un nuevo portafolio de producto.
6	Media	Puede emplearse parcialmente en un próximo portafolio de productos.
3	Baja	No se puede emplear en un próximo portafolio

Facilidad de Reciclaje

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
9	Alto	Requiere procesos convencionales
6	Media	Requiere procesos no convencionales
3	Baja	Requiere procesos avanzados con limitaciones

Impacto sobre el ambiente

Valoración Numérica	Valoración Cualitativa	Descripción
3	Alto	Produce contaminación, requiere tratamiento especial.
6	Media	Produce contaminación, fácil reciclaje.
9	Baja	No produce contaminación, se puede reutilizar.

ANEXO 3: ANÁLISIS QFD

3.1 Matriz 2 a 2

	Capa	Func	Facil	Cap	Mate	Mate	Alta	Bot	Cumj	Sisti	Prec	Baj	Bajo	Esq	Inte	Cab	Bue	Mác	Cur
Capaz de Reconfigurarse		5,0	1,0	4,0	3,0	3,0	2,0	2,0	1,0	3,0	3,0	3,0	1,0	7,0	5,0	5,0	8,0	3,0	1,0
Funcionamiento Semiautomático			3,0	3,0	2,0	4,0	3,0	2,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	5,0	5,0	8,0	8,0	5,0	1,0
Facil de Reconfigurar				5,0	6,0	3,0	3,0	3,0	1,0	3,0	2,0	3,0	2,0	6,0	8,0	6,0	7,0	4,0	1,0
Capaz de Ensamblar con Precisión					2,0	3,0	2,0	3,0	3,0	3,0	4,0	2,0	2,0	3,0	4,0	5,0	5,0	2,0	3,0
Materiales de Fabricación Resistentes a la Corrosión						3,0	1,0	2,0	4,0	3,0	3,0	3,0	2,0	5,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Materiales de Fabricación Resistentes							3,0	3,0	4,0	3,0	3,0	3,0	5,0	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0	3,0
Alta Vida Útil							2,0	3,0	1,0	2,0	2,0	3,0	4,0	3,0	5,0	5,0	3,0	3,0	3,0
Botón de Apagado en Caso de Emergencia									2,0	1,0	3,0	3,0	3,0	5,0	2,0	3,0	5,0	3,0	2,0
Cumplimiento Estándares Industriales de Seg. Ind.										1,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	5,0	4,0	1,0
Sistema de Alarma en caso de malfuncionamiento											3,0	2,0	2,0	5,0	3,0	5,0	4,0	2,0	3,0
Precio Asequible												3,0	2,0	3,0	3,0	5,0	3,0	2,0	2,0
Bajo Costo de Reconfiguración													3,0	5,0	3,0	3,0	6,0	2,0	2,0
Bajo Consumo de energía e insumos														7,0	5,0	5,0	4,0	1,0	3,0
Esquinas y Bordes Redondeados															3,0	4,0	3,0	5,0	9,0
Interfaz de Control Táctil																3,0	5,0	3,0	5,0
Cableado Organizado y Oculto																	3,0	2,0	5,0
Buen Acabado Superficial																		5,0	6,0
Máquina Compacta y de Bajo Peso																			5,0
Cumplimiento Legal Normas de Seguridad																			

3.2 Valoración criterios QFD

Priorities with respect to:

Goal: Establecer Jerarquía en Requerimientos



3.3 CARTA QFD

Máquina Reconfigurable de Ensamble para IC		Customer Importance	Cómo(s)?																			
			Reconfigurable	Grado de Automatización	Facilidad de Actualización	Repetitividad de Operaciones	Grado de Corrosión	Rigidez Estructural	Vida Útil	Botón de Apagado en caso de emergencia	Cumplimiento Normas de seguridad Industrial	Alarma en caso de malfuncionamiento	Costo de Equipo	Tiempo de Cambio de Configuración	Costo de Operación	Esquinas y Bordes Redondeados	Interfaz Táctil	Cableado Organizado y Oculto	Volumen de la Máquina	Peso de la Máquina	Cumplimiento Normas Ambientales	
Direction of Improvement																						
Qué(s)?	Funcionamiento	Capaz de Reconfigurarse	10.8	E	B	C				C				C	B	A			B	C		
		Semiautomática	7.3	C	E	C	D			B				C	D	C		B	A	A		
		Facil de Reconfigurar	11.7	E	C	E	B			A				C	E	D		C	C	C		
		Capaz de Ensamblar con Precisión	3.4	A	B		E							C	C							
	Materiales	Materiales de fabricación resistentes a la corrosión	3.0					E	D	E		B		D							B	
		Materiales de fabricación resistentes	2.3						E	E		C		D						C	B	
	Vida Útil	Alta vida útil	6.9	B	A	A		C	C	E	D		D	C				A	A	A	B	
	Seguridad	Botón de apagado en caso de emergencia	6.3							D	E	E	C	A							E	
		Cumplimiento normas de seguridad	8.4						B	E	E	E	C			D	A	C	B	C	E	
		Sistema de alarma en caso de malfuncionamiento	6.2						D	D	E	E	C								E	
	Costo	Precio Asequible	4.7	C	D	C	C		C	D		C	A	E	C	C	B	C	A	C	B	A
		Bajo costo de reconfiguración	5.9	C	D	D	A	A				B		B	E	E		B	C	A		
		Bajo consumo de energía e insumos	4.7	C	B	B				B		B		A	B	E		B	C	C	B	
	Apariencia	Esquinas y bordes redondeados	1.4					A				D	A			E					C	
		Interfaz de control táctil	1.9		C					A			C	A	A	A	E				A	
		Cableado organizado y oculto para el usuario	1.3							A		C	A					E	C		C	
	Buen acabado superficial		1.0					A				B	A									
	Peso y Volumen	Máquina compacta y de bajo peso	3.0	A	A	A	A		C	C		C		B	B	B		B	C	E	E	C
	Aspectos Legales	Cumplimiento Normas Ambientales	9.8					C	A	B				B		A				A	E	
	Weighted Importance			401.0	334.8	339.6	186.2	146.8	154.2	493.0	251.8	322.8	248.4	533.2	336.6	349.0	103.8	231.6	104.6	305.0	349.8	394.4
Relative Importance																						

ANEXO 4: ALGORITMO DE GENERACIÓN DEL DENDOGRAMA (CÓDIGO EN MATLAB)

X =

12	20	11,48	18,268	1	4
12	21	11,48	19,268	1	4
12	22	11,48	20,268	1	4
12	23	11,48	21,268	1	4
12	24	11,48	22,268	1	4
12	26	11,48	24,268	1	4
12,372	15	12,3	13,268	2	3
12,372	20	12,3	18,268	2	3
12,372	22	12,3	20,268	2	3
12,372	24	12,3	22,268	2	3
12,372	26	12,3	24,268	2	3
12,166	15	11,48	13,268	2	5
12,166	18	11,48	16,268	2	5
12,166	20	11,48	18,268	2	5
12,166	21	11,48	19,268	2	5
12,166	22	11,48	20,268	2	5
12,166	24	11,48	22,268	2	5
12,166	26	11,48	24,268	2	5
13,843	18	13,12	16,268	1	4
13,843	20	13,12	18,268	1	4
13,843	21	13,12	19,268	1	4
13,843	22	13,12	20,268	1	4
13,843	23	13,12	21,268	1	4
13,843	24	13,12	22,268	1	4
13,843	26	13,12	24,268	1	4

```
>> Y=pdist(X,'jaccard');
```

```
>> Z=linkage(Y);
```

```
>> dendrogram(Z);
```

```
>> c=cophenet(Z,Y)
```

```
c =
```

```
0.8520
```

```
>> [[1:25]',cluster(Z,3)]
```

```
ans =
```

```
1 2  
2 2  
3 2  
4 2  
5 2  
6 2  
7 3  
8 3  
9 3  
10 3  
11 3  
12 1  
13 1  
14 1  
15 1  
16 1  
17 1  
18 1  
19 2  
20 2  
21 2  
22 2  
23 2  
24 2  
25 2
```

ANEXO 5: VALORACIÓN DE CRITERIOS PARA EL CICLO DE VIDA A PARTIR DEL QFD

Tabla 64: Pesos por Criterios de Evaluación del Ciclo de vida del producto

ETAPA	Criterio Ciclo de Vida	Costo de equipo	Vida útil	Cumplimiento normas ambientales	Reconfigurable	Cumplimiento normas de seguridad	Peso de la máquina	Volumen de la máquina	Botón de apagado en caso de emergencia	Facilidad de Actualización	Tiempo de cambio de configuración	Grado de automatización	Costo de operación	Alarma en caso de malfuncionamiento	Interfaz táctil	Rigidez estructural	Repetitividad de operaciones	Cableado organizado y oculto	Esquinas y bordes redondeados	Grado de corrosión	TOTALES	PESOS RELATIVOS	
Fabricación/ Compra	Disponibilidad de Proveedores	533,2	493,0	401,0	394,4	349,8	349,0	339,6	336,6	334,8	322,8	305,0	251,8	248,4	231,6	185,2	154,2	146,8	104,6	103,8	434	8,7%	
	Complejidad del Proceso																					419,1	8,4%
	Inversión Inicial																					410,86	8,3%
Instalación	Movilidad del Sistema																					344,3	6,9%
	Costo de Instalación																					344,3	6,9%
Uso	Confiabilidad																					295,16	5,9%
	Seguridad																					237,24	4,8%
	Complejidad de uso																					307,08	6,2%
	Uso de Recursos																					361,05	7,3%
Mantenimiento	Movilidad en Mantenimiento																					291,26	5,9%
	Costo de Mantenimiento del Sistema																					204,4	4,1%
Actualización	Facilidad de Actualización																					391,85	7,9%
	Reusabilidad del Sistema																					407,9	8,2%
Disposición final	Facilidad de Reciclaje																					230	4,6%
	Impacto sobre el ambiente																					295,75	5,9%
Total																					4974,3	100%	

ANEXO 6: INTERFAZ DEL SOFTWARE EXPERT CHOICE PARA EVALUACIÓN EN EL CICLO DE VIDA Y ESTRUCTURA DEL ARBOL DE CRITERIOS.

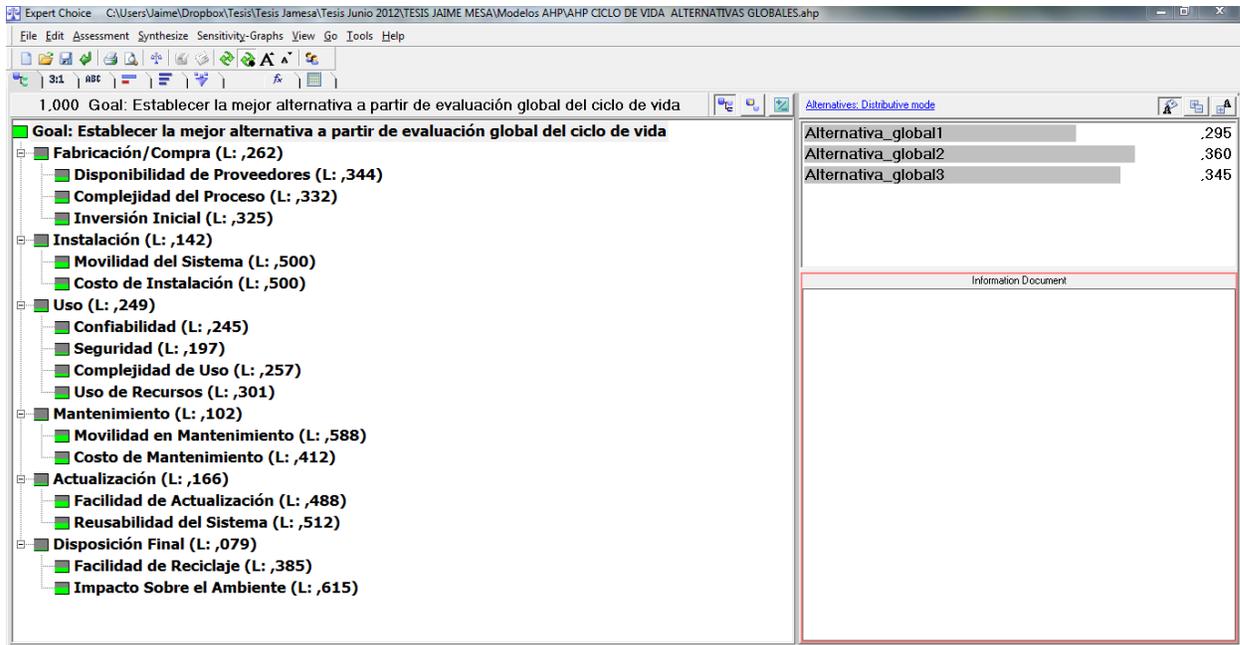


Figura 39: Interfaz del software Expert Choice, estructurad el árbol de criterios