

República de Cuba



Tesis de Doctorado

MÉTODO PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL MECÁNICO BASADO EN LA TRAZABILIDAD DE LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

Alexis Alvarez Cabrales

Alexis Alvarez Cabrales

Método para el diseño conceptual mecánico basado en la trazabilidad de los requerimientos funcionales (Tesis de Doctorado). – La Habana : Editorial Universitaria, 2017. – e-ISBN 978-959-16-3479-5.

© **Autor:** Alexis Alvarez Cabrales.

Digitalización: Editorial Universitaria del Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba.

Calle 23 entre F y G, No. 564. El Vedado, La Habana, CP 10400, Cuba.

Email: eduniv@mes.edu.cu

Página web: <http://eduniv.mes.edu.cu>



Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”

Facultad de Ciencias Técnicas

Centro de Mecanización Agropecuaria



**MÉTODO PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL MECÁNICO BASADO EN LA TRAZABILIDAD DE
LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Técnicas Agropecuarias

ALEXIS ALVAREZ CABRALES

Mayabeque

2016

Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”

Facultad de Ciencias Técnicas

Centro de Mecanización Agropecuaria



**MÉTODO PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL MECÁNICO BASADO EN LA TRAZABILIDAD DE
LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Técnicas Agropecuarias

Autor: Ing. ALEXIS ALVAREZ CABRALES

Tutor: Prof. Tit., Ing. Roberto Pérez Rodríguez, Dr. C.
Prof. Tit., Ing. Benjamín Gabriel Gaskins Espinosa, Dr. C.
Prof. Tit., Ing. Carles Riba Romeva, Dr. C.

Mayabeque

2016

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, por haberme forjado y guiado con su sabiduría en la vida. A mi madre por velar mi sueño en todo momento. A mi abuela por haberme dedicado, hasta el último aliento, toda su vida. A mi hermano y hermana, por su confianza e inigualable estímulo. A mi sobrina y sobrinos, por estar atentos a este trabajo en todo instante. A mis tías y tíos, por su ayuda y preocupación. A Jenniffer, por toda la inspiración que me entrega. A Guadalupe, Victoria, Sandra y Nenona, por su apoyo constante.

A mis tutores, a Roberto Pérez Rodríguez, por haberme guiado con sabiduría y paciencia; dándome la oportunidad, desde mi etapa de estudios en la “Universidad de Holguín” (UHo), de compartir su conocimiento e intercambiar ideas, formándome como ingeniero y doctor; para él y su familia mi agradecimiento por su confianza y amistad; a Benjamín Gabriel Gaskins Espinosa excepcional amigo y compañero de trabajo en la “Universidad de Granma” (UdG), de quien he recibido constante ayuda e incondicional apoyo durante todos estos largos años; a Carles Riba Romeva, agradezco el tiempo cedido, a costa de su apretada agenda, durante mi estancia en la “Universitat Politècnica de Catalunya” (UPC); sus oportunos consejos, así como sus enseñanzas que en lo profesional y personal me permitieron concluir esta investigación.

A Manuel Camps Michelena y Víctor Sánchez-Girón Renedo, catedráticos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros (E.T.S.I.) Agrónomos de la “Universidad Politécnica de Madrid” (UPM), agradezco su contribución, apoyo incondicional y acertadas observaciones.

A Carlos García Betancourt y Juan Miguel Fajardo Rivero, especialistas de la Empresa de Logística Agropecuaria (ELA) “26 de Julio” Granma, por su colaboración incondicional.

A Oriol Aguilera Rubet, especialista del Centro de Desarrollo de la Maquinaria (CEDEMA) de Holguín, por su colaboración y oportunas sugerencias.

A Ana María Quesada Estrada, por sus enseñanzas en la investigación desde mi etapa de estudios universitarios.

A Alberto Revilla Piña, por haberme considerado siempre su amigo y alumno.

A Ivo Milán Medina, por sus consejos y su valiosa amistad.

A los profesores y trabajadores de la “Universidad de Granma” (UdG), por el apoyo, la amistad y la comprensión que me han brindado desde mi incorporación a la Facultad, en especial a Reyes, Lázaro, Pacheco, David, Bosch, Santiago, Yoan, Inhaudis, Rubén, Márquez, Maikel, Yuri, Ernesto, Vicente, Idolka, Yennis, Rosita, Barbara, Mayra, Yans, José, Iván, Alain, Melquíades, Carlos, Ramos, Jorge, Yosvel, Luis, Osvaldo, Hugo, Rodisnel, Yolanda, Antonio, Ramón, Kenia, Anier y Ruky.

A los profesores y trabajadores de la Facultad de Ingeniería de la “Universidad de Holguín”, por las enseñanzas, la comprensión, la amistad que me han brindado todos estos años y su inestimable ayuda, en especial a Luis Wilfredo Hernández, Rolando Simeón Monet, Arlys Michel Lastre Aleaga y Raúl Santana Milán.

A los profesores y trabajadores de la Facultad de Mecanización Agropecuaria y el Centro de Mecanización Agropecuaria de la “Universidad Agraria de La Habana”, por la acogida, el apoyo que me han brindado y su constante ayuda, en especial a Arturo Martínez Rodríguez, Astrid Fernández de Castro y Pedro A. Valdés Hernández.

A Michelle Álvarez Amargos, por asumir el reto de ser mi correctora y editora. A José Leyva, por su ayuda en las traducciones.

A mis amigos, con los que he compartido mis sueños y vivencias durante estos años de estudios, en especial a Silvia, Elizabeth, Orledis, Natalio y Gerardo; a otros que me une una entrañable amistad, a Jaime, Ernesto, Felipe, Beltrán, Joao, Amarilis, Yusimí, Yoandris, Danner, Danier, Abraham, Erick, Félix, Marín, León, Isbel, Héctor, Oilde, Soto, Damian, Edisner, Ríos, Juliá, Reynaldo y Enrique Zayas.

A todos, muchas gracias.

DEDICATORIA

A Jenniffer,

A mi madre,

A mis hermanos y sobrinos,

A mi abuela y mi padre (q.e.p.d.).

SÍNTESIS

Esta investigación tiene como objetivo implementar un método sistemático que facilite la toma de decisiones en la evaluación de conceptos, teniendo en cuenta la estructuración de las relaciones entre cada una de las sub-etapas del diseño conceptual y la estratificación y trazabilidad de los requerimientos funcionales. El estudio constituye un aporte al modelo clásico del proceso de diseño de Pahl y Beitz y define una nueva etapa denominada especificación cualitativa. El método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional y el método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas, desarrollados en el método propuesto, garantizan la captura y transformación evolutiva de la información concerniente a los requerimientos funcionales. Ambos están orientados a la síntesis y evaluación conceptual de variantes de solución. Para que los métodos antes citados puedan ser implementados, se definió un algoritmo computacional y emplear un conjunto de herramientas informáticas contenidas en el software CODISE-TZR, el cual fuera concebido para la formalización de la evaluación conceptual de las soluciones en el diseño mecánico. El análisis de tres casos de estudio, referidos al diseño conceptual de un molino de viento, un molino de cuchillas y un fogón eficiente para biomasa, demostraron la validez del método propuesto.

SUMMARY

The research is aimed to implement a systematic method in order to facilitate decision making during the evaluation of concepts, taking into account the structuring of relations between each sub-step of the conceptual design, as well as the stratification and traceability of the functional requirements. It constitutes a contribution to Pahl's and Beitz's classical model of design process and it defines a new stage termed qualitative specification. Both the accumulative method for the functional-structure traceability and the method for the guided synthesis of accumulative solutions, developed in the method being proposed, assure the capture and the evolutionary transformation of the information related to the functional requirements, concerned with synthesis and concept evaluation of solution variants. In order for the aforementioned methods can be implemented, has defined a computational algorithm and a collection of informatics tools contained in the software CODISE-TZR. The analysis of three cases under study, referred to the conceptual design of a windmill, a mill with blades and one efficient stove working with biomass, demonstrated the validity of the proposed methodology.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA LEGAL	ii
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
SÍNTESIS	vii
SUMMARY	viii
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA SISTEMÁTICA DEL PROCESO DE DISEÑO	10
1.1 Enfoques y modelos de diseño	10
1.1.1 Tipos de metodologías del proceso de diseño	11
1.1.2 Modelos descriptivos	12
1.1.3 Modelos prescriptivos	13
1.1.4 Comparación de los modelos prescriptivos de diseño	16
1.2 Ciclo básico del diseño	17
1.3 Caracterización de la información en el proceso de diseño	18
1.3.1 Tipos de conocimientos en cada etapa	19
1.3.2 Evolución de la información de lo abstracto a lo concreto	20
1.4 Necesidad de un diseño sistemático	21
1.4.1 Teoría de sistemas	22
1.4.2 Métodos de diseño	22
1.5 Trazabilidad en el diseño	23
1.6 Conclusiones del capítulo	25
2. FUNDAMENTOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO SISTEMÁTICO EN EL DISEÑO CONCEPTUAL	26
2.1 Estudios sistemáticos del diseño	26
2.2 Fundamentos del diseño sistemático	27
2.3 Procedimiento general del diseño sistemático	28
2.4 Modelo sistemático de Pahl y Beitz	29
2.4.1 Clarificación de la tarea (definición del producto)	30
2.4.2 Diseño conceptual	32
2.4.3 Diseño básico o de materialización	38
2.4.4 Diseño de detalle	38
2.5 Enfoque metodológico para la trazabilidad de los requerimientos funcionales	39
2.5.1 Método Kano para el análisis de requerimientos	39
2.5.2 Modelación para la representación matemática de la trazabilidad de los requerimientos funcionales	42
2.5.3 Métodos para la evaluación conceptual de soluciones	45
2.6 Conclusiones del capítulo	46
3. CONCEPCIÓN DEL MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE CONCEPTOS A PARTIR DE LA TRAZABILIDAD DE LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES	47
3.1 Base teórica para el desarrollo del método propuesto	47
3.2 Estructura del modelo	48
3.2.1 Estadios de la información en el modelo propuesto	51
3.3 Método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional	53
3.3.1 Estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales	55
3.3.2 La trazabilidad de los requerimientos funcionales en el diseño conceptual de productos mecánicos	63
3.4 Método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas	69
3.4.1 Estructuración de la síntesis de soluciones acumulativas	70
3.4.2 Determinación del tamaño teórico del campo de soluciones	71
3.4.3 Acotación y generación del campo de soluciones	71
3.5 Método para la evaluación conceptual de soluciones por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales	72
3.6 Herramientas computacionales para el proceso de síntesis conceptual de soluciones a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales	75
3.6.1 Algoritmo de las herramientas computacionales desarrolladas	75
3.6.2 Descripción de las herramientas informáticas desarrolladas	77
3.6.3 Implementación de las herramientas informáticas desarrolladas en el método propuesto	79
3.7 Conclusiones del capítulo	80
4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS RESULTADOS, CASOS DE ESTUDIO Y VALIDACIÓN PRÁCTICA	82
4.1 Caso de estudio del diseño conceptual de un molino de cuchillas	82
4.1.1 Captura y representación de los requerimientos funcionales del molino de cuchillas	82

4.1.2 Estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales del molino de cuchillas a través de la aplicación del método Kano.....	84
4.1.3 Estructuración de la síntesis guiada de soluciones acumulativas para el molino de cuchillas.	93
4.2 Evaluación conceptual de variantes de diseño y trazabilidad de los requerimientos funcionales del molino de cuchillas.....	96
4.3 Validación del método propuesto.....	98
4.4 Conclusiones del capítulo.....	99
CONCLUSIONES.....	101
RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS.....	113
ANEXOS	116

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Las empresas, en el actual contexto económico y financiero de alta competencia, se ven obligadas a ofrecer productos con una mejor calidad, variada funcionalidad y precios más favorables. Estos elementos conducen a la necesidad de disminuir sus tiempos de desarrollo de manera apreciable y efectiva. En la última década los avances tecnológicos en el área del desarrollo de productos han propiciado un aumento de los estudios relativos a los enfoques y metodologías de diseño, con el objetivo de responder a estas necesidades empresariales y proporcionar a los diseñadores herramientas para facilitar su creatividad.

En el proceso de desarrollo de productos, el diseño es una de las actividades que demanda un alto grado de análisis. A estos efectos se han creado numerosas herramientas para facilitar la toma de decisiones en dicha área. Una de las más utilizadas por en la actualidad son los sistemas de Diseño Asistido por Computadora (CAD); los cuales, según Nasr y Kamrani (2007), se definen como cualquier actividad del diseño que involucre el uso efectivo de la computadora para crear, modificar, analizar, optimizar y documentar un diseño de ingeniería. Sin embargo, estas herramientas, a menudo resultan inadecuadas o inconvenientes para su utilización en determinados aspectos, sobre todo, en aquellos relacionados con la información subjetiva y la evaluación de conceptos.

Los programas CAD se han concentrado, en su mayoría, en el proceso de captura y representación de las formas geométricas y en la incorporación, dentro de lo posible, de la información tecnológica utilizada para percibir las ideas abstraídas de la mente del diseñador y usarlas con propósitos de evaluación (Fucci, 2011; Um, 2015). En contraste, existen pocos soportes en estos sistemas que faciliten la toma de decisiones en las etapas primarias del proceso de diseño, tales como la captura y la modelación de la funcionalidad del producto (Cascini y Rotini, 2011). Esta debilidad de los actuales sistemas CAD y de la práctica de ingeniería se debe a que, en las fases primarias del ciclo de vida de los productos, los requerimientos y las restricciones son imprecisas e incompletas, haciéndose difícil su formalización y por tanto, su utilización en los medios CAD.

La investigación que se propone tiene como antecedentes las tesis doctorales de Grima (1993), Pinchefsky (1996), Stone (1997), Maury (2000), Sreedharan (2003), Momani (2005), Chaur (2004), León (2005), Moreira (2007), León (2009), Salazar (2012) y Helms (2013). Resulta oportuno destacar, a continuación, algunos de los logros e insuficiencias de estos trabajos.

En su proyecto, Grima (1993) se centra en la metodología para el diseño robusto, aportando un medio gráfico que resume la información disponible para elegir los valores óptimos de los factores de diseño. Sin embargo, el

proceso está estructurado en hojas de cálculo que carecen de integración con sistemas CAD.

Por su parte, Pinchefsky (1996) aporta una metodología que constituye la base para la modelación de la estructura funcional en el diseño conceptual. La propuesta facilita la captura, estructuración y análisis de la funcionalidad del concepto en desarrollo; no obstante, su aporte está limitado por la carencia de una interface automatizada de intercambio de datos con software de diseño y simulación.

Una significativa mejora al tratamiento de las estructuras funcionales es aportada por Stone (1997), quien expone una teoría para el diseño modular conceptual mecánico, basada en la descomposición funcional del problema a partir de establecer la función principal del producto y de descomponerla en sub-funciones, estableciendo los flujos de entrada y salida de energía, materiales y señales. Las estructuras funcionales y los principios de solución asociados son almacenados en bases de datos con descripciones detalladas de cada componente. Se aprecian como insuficiencias en este estudio, la falta de estandarización en los módulos, pues ocurren repeticiones de datos; así como la inexistencia de una formulación matemática para establecer las bases funcionales.

Maury (2000) propone, en la etapa de diseño conceptual, una modificación a la metodología de Pahl y Beitz (Pahl y Beitz, 1996). En su propuesta expone los métodos para la aplicación del enfoque sistemático, vinculando de forma simultánea los enfoques DFF (Diseño para la Función) y DFE (Diseño para el Ambiente). Al mismo tiempo, el autor define la especificación derivada, donde se identifican las funciones globales necesarias en el sistema, los grupos independientes de flujos y las relaciones entre las funciones, partiendo de la especificación inicial. La propuesta sugiere la arquitectura necesaria para el desarrollo de un software como sistema de asistencia al diseño conceptual, pero no implementa la herramienta informática.

Sreedharan (2003) comenta el proceso de diseño y las metodologías asociadas al mismo, destacando las debilidades de la etapa conceptual y las necesidades de análisis e implementación de habilidades por parte de los diseñadores para abstraerse e identificar parámetros críticos. La limitante de esta investigación radica en que solo se enfoca a la enseñanza del diseño conceptual en el entorno académico y no trasciende hacia su utilización en la industria.

Por otro lado, Momani (2005) establece una metodología para traducir las funciones en conceptos, mediante una herramienta computacional que vincula las funciones y el componente físico que las implementa; sus principales limitaciones se encuentran en que no está integrada a un sistema CAD, carece de un sistema para la toma de decisiones y no posee una métrica comparativa.

La investigación de Chaur (2004) está definida alrededor de la creatividad en la fase conceptual del diseño de productos y su orientación es hacia la aplicación de programas informáticos como herramientas de asistencia al ingeniero de diseño. Propone el modelo de un software para el proceso de generación de ideas creativas en la fase de conceptualización de nuevos productos y la limitante principal se encuentra en la complejidad de la automatización del proceso.

La propuesta de León (2005) se articula a partir de la falta de mecanismos sólidos y confiables para traducir las necesidades del usuario en características de diseño. En este sentido, implementa un estudio enfocado en la predicción de la percepción semántica de carácter estético alrededor de una propuesta de diseño. La limitación del estudio radica en la carencia de una aplicación informática para la modelación y captura de datos.

Moreira (2007) define un modelo computacional que soporta la concepción de nuevas soluciones para la fase de diseño conceptual; su propuesta no dispone de un método eficiente de evaluación de las funciones y alternativas del producto.

El trabajo de León (2009) se centra, dentro del proceso de diseño, en la fase conceptual como parámetro de partida de los nuevos productos. En este sentido, propone una redefinición de dicha fase y su manejo sistémico a través del modelo de diseño concurrente. El alcance de la propuesta solo se limita a la docencia.

Por otra parte Salazar (2012) en su investigación se concentra en la innovación tecnológica dentro del proceso de diseño y desarrollo de productos en pequeñas y medianas empresas. Si bien realiza un análisis de las metodologías de diseño y de su aplicación en el proceso de diseño y desarrollo de productos, su propuesta solo se limita a las pequeñas empresas que prestan servicios al sector automotriz.

Helms (2013) fundamenta su propuesta en la etapa conceptual del diseño, definiendo estructuras gramaticales gráficas para la representación del conocimiento en el desarrollo de productos. Entre sus aportes se encuentra un software como soporte para la gramática gráfica; pero este no es un sistema integrado a la simulación.

El diseño constituye una actividad que comienza con la definición de los requerimientos funcionales, representados por las especificaciones de diseño, y termina con la descripción del producto. Esta es evaluada con relación a sus requerimientos funcionales para determinar si el producto diseñado los satisface. Es un proceso iterativo que genera conceptos, configuraciones y diseños detallados (Wiesner *et al.*, 2015; Zeng y Gu, 1999).

La concepción de un determinado producto manifiesta una respuesta del diseñador a las necesidades definidas por un conjunto de requerimientos, a partir de la existencia de una necesidad empresarial o social (Armstrong, 2002). A diferencia de otras áreas de la ingeniería, el proceso de concepción de productos constituye un compromiso que responderá, en mayor o menor medida, a los diferentes requerimientos y tendrá comportamientos, en ocasiones, antagónicos o contradictorios (Guidat *et al.*, 1993). Al ser los requerimientos del usuario, funciones esperadas del producto, estas decidirán su naturaleza o tipo (Abdalla y Ebeid, 2010).

A partir del hecho de que, en un diseño, los requerimientos funcionales experimentan restricciones, resulta difícil satisfacer idealmente todos los objetivos definidos por dicho conjunto. La búsqueda de un consenso en este tema es una actividad intrínseca de los diseñadores, llevada a cabo a través de la exposición de sus juicios, experiencias, arbitraje y, finalmente, de la toma de decisiones (Eagan *et al.*, 2001, 2002). Durante esta actividad, resulta importante entender cómo están conectados los requerimientos y las soluciones descritas. En este sentido, la trazabilidad de los mismos permite rastrearlos hasta su fuente de origen; verificando que cada elemento del sistema o componente esté vinculado a un requerimiento en específico (Wiesner *et al.*, 2015; Wynn *et al.*, 2011).

Resulta evidente la importancia de los requerimientos funcionales para poder desarrollar el diseño conceptual. Ellos, según Wang *et al.* (2011), son los encargados de definir la funcionalidad requerida por un producto y de poder establecer su trazabilidad. Asimismo, permiten seguir el proceso de evolución del producto en cada una de sus etapas, al trazar los vínculos entre un requerimiento y su(s) componente(s) definitorio(s) (Kirkman, 1998). Una buena trazabilidad se logra con la adecuada transformación de los requerimientos, desde la etapa de especificación a la funcional; lo cual se garantiza al agruparlos correctamente mediante su estratificación. Esta es el resultado de especificar requisitos más concretos basados en la jerarquización de la composición de los datos (Onabajo y Weber-Jahnke, 2008).

Se conoce por la experiencia, y también a partir de otros estudios, que durante las primeras etapas de la concepción de un producto, estas decisiones determinan aproximadamente el 70 % del costo del ciclo de vida del mismo (Asiedu y Gu, 1998). Dicha fase es crítica, dado que la creatividad y la sensibilidad de los diseñadores intervienen en la interpretación de las necesidades de los usuarios y en la representación del diseño a conceptualizar. La comprobación de la adecuada implementación de las necesidades de los usuarios en el diseño es crucial y forma parte de las siguientes etapas del proceso (Bordegoni, 2011).

La fase de diseño conceptual implica, entonces, estos riesgos y en ella el diseñador no dispone de todos los elementos necesarios para la selección de variantes idóneas (Avigada y Moshaiiov, 2010). Generalmente, las herramientas de validación y selección existen en las fases más avanzadas del proceso, donde el producto ya posee una definición más explícita y detallada. Por tanto, la etapa conceptual sugiere ciclos de estudio iterativos para la búsqueda de las definiciones o conceptos que satisfagan las necesidades y requerimientos establecidos (Sell *et al.*, 2008).

En las primeras fases del proceso de diseño, se hace evidente una contradicción existente: por una parte, los diseñadores deben tener pocas restricciones con el fin de ser creativos (Matthews *et al.*, 2002), y por otra, las restricciones les permiten garantizar que las decisiones tomadas cumplan con las exigencias del problema de diseño. Es por ello que esta investigación está dirigida a proponer la formalización de un método sistemático para facilitar la toma de decisiones en la selección de conceptos en la etapa conceptual del proceso de diseño.

La ayuda en la toma de decisiones implica el estudio de los siguientes aspectos:

- En lo relacionado con la selección de conceptos, se deben disponer o tener en cuenta todos los requerimientos del usuario, los cuales deben agruparse o categorizarse para su posterior análisis.
- Las vías para ofrecerle al diseñador el espacio completo de posibles conceptos a partir de la combinación de funciones versus principios de solución.
- La disposición de herramientas que faciliten la selección de conceptos, teniendo en cuenta la trazabilidad de los requerimientos funcionales.
- La formalización (en la etapa conceptual) de los aspectos anteriores en un método de diseño sistemático que ayude en la toma de decisiones.

En las metodologías sistemáticas de diseño clásicas (Archer (1971); Cross (2008); Hubka y Eder (2012); Pahl *et al.* (2007); Pugh (1991); Suh (2001)), sobre todo en la etapa de diseño conceptual, se aprecia como debilidad la existencia de ambigüedad e incertidumbre, tanto en la información que se va transmitiendo y concretando, como en la transmisión de información entre cada una de las sub-etapas que conforman la fase de diseño conceptual (Shao *et al.*, 2008; Shin *et al.*, 2011). Según Sarbacker y Ishii (1997), la ambigüedad y la incertidumbre están altamente relacionadas e influyen toda la actividad de desarrollo de productos, incluida la comercialización, diseño, ingeniería, prueba, y producción. La presencia de ambigüedad e incertidumbre en el desarrollo de productos genera riesgos, cargándolos de contratiempos, fallas y fracasos. A este análisis se le puede añadir la ausencia de una formalización que facilite la evaluación de conceptos a partir del razonamiento intensivo de los requerimientos funcionales.

En tal orden, las decisiones más importantes de las fases del proceso de diseño con un mayor efecto sobre el costo total, se toman durante la fase de diseño de ingeniería (Giachetti, 1997; Hambali *et al.*, 2011; Whitney, 1988). La etapa de diseño conceptual supone un 5 % del costo del producto. La etapa de diseño de detalle representa aproximadamente un 20 % del costo total. Sin embargo, las decisiones que se toman en esta última etapa representan el 70 % del costo total del producto. La etapa conceptual del proceso de diseño permite la reducción de hasta un 35 % del total de los costos, de ahí su especial importancia (Zimmer y Zablit, 2001) y, la conveniencia de reforzarla y de establecer estrategias que aseguren que las decisiones tomadas durante ella sean lo más acertadas posibles, y que supongan un mínimo de sobre costo durante el ciclo de vida (Ullman, 2010).

De lo antes explicado, se observa que las decisiones tomadas durante la fase de diseño conceptual son determinantes en el ciclo de vida del producto. En ella, la creatividad juega un papel importante para la generación de conceptos, resultando el desarrollo de demasiados, una solución costosa. La selección adecuada de aquel que permita satisfacer los requerimientos del usuario constituye, entonces, un aspecto de suma importancia en esta fase, por lo que será deseable disponer de métodos y herramientas para la selección de los mismos.

Como una de las características del proceso de diseño, puede citarse que, en las primeras fases del proceso de diseño, los datos son imprecisos y es difícil la utilización de herramientas informáticas. Los métodos asistidos por ordenadores, tales como la modelación de sólidos, la optimización, el análisis de mecanismos, etcétera, demandan una representación precisa de los objetos (Antonsson, 2001; Colombo y Mandorli, 2011). Las herramientas que son aplicadas en la industria a las etapas iniciales del diseño, están en sus fases nacientes. Las investigaciones desarrolladas en los últimos tiempos se centran activamente en dar soporte a estas etapas para solucionar dichos problemas. Los programas CAD continuamente son modificados, incorporándoseles soportes para las actividades de desarrollo de conceptos, análisis de requerimientos y toma de decisiones (Chandrasegaran *et al.*, 2013).

Las herramientas convencionales de análisis no se adaptan a un diseño incompleto (Sawada y Yan, 2001); por

tanto, los diseñadores deben adoptar un enfoque empírico del tipo ensayo-error a fin de determinar los valores de los parámetros de diseño.

Según Reyman (2001), las herramientas o métodos desarrollados en esta fase conceptual son poco explotados o difícilmente utilizables en los entornos industriales. La mayoría de las evaluaciones del producto (desempeño, robustez, costo y productividad) se realizan después de su definición. Esto conduce a que, en el diseño, se tenga que recurrir a iteraciones (Ullman, 2010). En este contexto son pocas las herramientas orientadas a la síntesis automática o semiautomática de conceptos (Yang y Zhang, 2000).

La transición del conocimiento de la etapa conceptual a la etapa preliminar es el paso del concepto al objeto. La selección del concepto, que será desarrollado en la próxima etapa, no es una operación trivial debido a que el conocimiento en esta fase es parcial y primario. Los parámetros de diseño no son fáciles de evaluar, sobre todo si son fuertemente interdependientes. Estas premisas orientan la selección de conceptos hacia un enfoque clásico, donde el diseñador realiza una selección *a priori*, basado en su experiencia (Chakrabarti *et al.*, 1992).

Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados que forman parte del análisis del estado de la ciencia en los modelos sistemáticos prescriptivos de diseño, se identifica como **problema científico de la investigación**: la insuficiente integración entre las sub-etapas que conforman el diseño conceptual en los enfoques sistemáticos, lo que dificulta a los diseñadores la evaluación y selección de conceptos. Entonces, esta investigación tiene por **objeto de estudio** a las metodologías sistemáticas del proceso de diseño mecánico.

El **campo de acción** de la investigación abarca la formalización e implementación, en una metodología sistemática, de un método para la integración de las sub-etapas del diseño conceptual de los productos mecánicos.

El trabajo plantea la siguiente **hipótesis**: Si se implementa un método sistemático que considere la estratificación y trazabilidad de los requerimientos funcionales, con el apoyo de programas de computación, es posible garantizar una adecuada transformación e integración de la información en las sub etapas del diseño conceptual y la generación de conceptos, con vistas a facilitar la toma de decisiones en su evaluación y contribuir a la mejora del diseño conceptual de productos mecánicos.

Así, la investigación tiene como **objetivo**: implementar un método sistemático que facilite, con la ayuda de programas informáticos, la toma de decisiones en la evaluación de conceptos, teniendo en cuenta la estructuración de las relaciones entre cada una de las sub-etapas del diseño conceptual, y la estratificación y trazabilidad de los requerimientos funcionales.

Se definieron como **tareas de la investigación** las siguientes:

- Caracterizar el proceso sistemático de diseño conceptual según los modelos clásicos prescriptivos de diseño, lo cual permitirá la definición de las sub-etapas en el diseño conceptual y de las deficiencias en cuanto a su integración.

- Desarrollar una estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales que permita su posterior utilización en la evaluación de conceptos.
- Elaborar la formalización de un método sistemático que facilite la toma de decisiones en la evaluación de conceptos, teniendo en cuenta la estructuración de las relaciones entre cada una de las sub-etapas del diseño conceptual y la estratificación y trazabilidad de los requerimientos funcionales.
- Elaborar prototipos de programas de computación que implementen el método sistemático propuesto.
- Validar el método desarrollado en empresas de diseño, con su aplicación a casos de estudio.

Las tendencias actuales del diseño de productos están estrechamente vinculadas a los aportes de las diferentes escuelas de Europa, Estados Unidos y Japón, destacándose de forma significativa el modelo prescriptivo de Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007), perteneciente a la escuela alemana, cuyos trabajos se enmarcan en un procedimiento algorítmico y sistemático de diseño. A este modelo de referencia, en la presente investigación, se le propone la formalización de un método sistemático que le facilite al diseñador la toma de decisiones en la evaluación de conceptos, teniendo en cuenta la estructuración de las relaciones entre las sub-etapas y la estratificación y trazabilidad de los requerimientos funcionales. Por tanto, se considera que la investigación desarrollada tiene **importancia y actualidad**.

La **novedad científica** del presente trabajo está dada en que se implementa un método sistemático que facilita, con la ayuda de programas informáticos, la toma de decisiones en la evaluación de conceptos, teniendo en cuenta la estructuración de las relaciones entre cada una de las sub-etapas del diseño conceptual, su estratificación y la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Esto constituye un aporte al modelo clásico del proceso de diseño de Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007). Para el desarrollo del estudio, se han definido dos nuevos métodos que permiten su estructuración y aplicación a partir de los siguientes elementos o componentes estructurales:

- Un enfoque metodológico para el tratamiento del diseño conceptual, el cual fundamenta la propuesta de un nuevo método sistemático que permite articular el proceso de trazabilidad desde los requerimientos de usuario hasta la evaluación de los conceptos.
- Un método para garantizar la trazabilidad de los requerimientos, el cual es denominado método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional. El mismo tiene por objetivo la captura, estructuración, estratificación y encapsulación de los requerimientos funcionales en la estructura funcional. También permite un estudio más exhaustivo y facilita al modelo la trazabilidad de los requerimientos de usuario.
- Un método para garantizar la síntesis guiada de soluciones acumulativas con el objetivo de conceptualizar la transformación de la información desde el nivel funcional hasta el nivel de soluciones conceptuales.

Se valora como **aporte práctico**:

- Una herramienta CAD para la síntesis y evaluación de la trazabilidad de los requerimientos funcionales en la etapa conceptual del proceso de diseño.

Los **métodos utilizados** en la investigación se exponen a continuación:

- **Método histórico-lógico:** este se aplica para establecer el estado del arte del tema de investigación como marco teórico referencial, permitiendo conocer qué se ha investigado sobre el asunto objeto de estudio y qué metodologías, métodos y modelos se abordaron en el fenómeno estudiado.
- **Método de inducción-deducción:** a partir del estudio de diferentes metodologías clásicas de diseño, establecen aspectos que son generales y métodos empíricos. Los mismos, constituyen puntos de partida para inferir o confirmar formulaciones teóricas de las cuales se deducen nuevas conclusiones lógicas, que son sometidas a prueba de acuerdo con las generalizaciones empíricas. Se aplica, además, para proponer una alternativa para la evaluación conceptual a partir de la trazabilidad de los requerimientos del usuario.
- **Método de análisis y síntesis:** se utiliza para identificar las características de los principales factores que influyen en el fenómeno estudiado, así como su interrelación. Se aplica para identificar las etapas que componen las diferentes metodologías clásicas de diseño, estableciendo la relación entre ellas y así poder definir los pasos que componen el modelo de trazabilidad en la etapa de especificación cualitativa y la estructuración de los requerimientos funcionales por niveles de cualidades.
- **Método de análisis de sistemas:** está fundamentado en la Teoría General de Sistemas. Se utiliza en el diseño de productos a partir de la idea de que estos pueden ser representados como sistemas para evaluar su funcionamiento, tomando en cuenta lo relacionado con su estructura, función, procesamiento, interacción y analogía. Se orienta hacia la búsqueda de reglas con un valor general, aplicables al desarrollo de cualquier producto y en cualquier nivel del proceso de diseño, las cuales permita identificar analíticamente aspectos esenciales en su composición y que en su dinámica, puedan ser objeto de generalización.
- **Método de modelación:** se crea un modelo (como instrumento de la investigación), de carácter material o teórico, el cual se utiliza para hacer una reproducción simplificada de la realidad. Este cumple una función heurística ya que permite descubrir y estudiar nuevas relaciones y cualidades del objeto de estudio. Se aplica al modelar diferentes casos en los que se utiliza el modelo de trazabilidad en la etapa de especificación cualitativa y estructuración de los requerimientos funcionales por niveles de cualidades, aspecto que se propone en esta investigación y el cual permite la comprobación de la validez del modelo y su estructuración de forma coherente, observando si será adecuado o no a partir de los resultados de la modelación.
- **Método de diseño sistemático:** este se aplica a partir del uso de modelos de diseño prescriptivos. Los mismos ofrecen un procedimiento algorítmico y sistemático a seguir, que es tomado como referencia para la evaluación conceptual a partir de la trazabilidad de los requerimientos de usuario. Siguiendo una estructura básica de análisis-síntesis-evaluación, la evaluación trata de persuadir u orientar a los diseñadores en las formas de realizar el diseño conceptual de los productos.
- **Método de evaluación conceptual:** se utiliza a partir de la determinación y análisis de los requerimientos funcionales, los cuales constituyen los parámetros iniciales en la definición conceptual del producto que satisface los requerimientos del usuario. Los mismos serán evaluados con la utilización del método Kano. Dicho método constituye una herramienta que le permite al diseñador la clarificación y estratificación de los requerimientos funcionales del usuario.

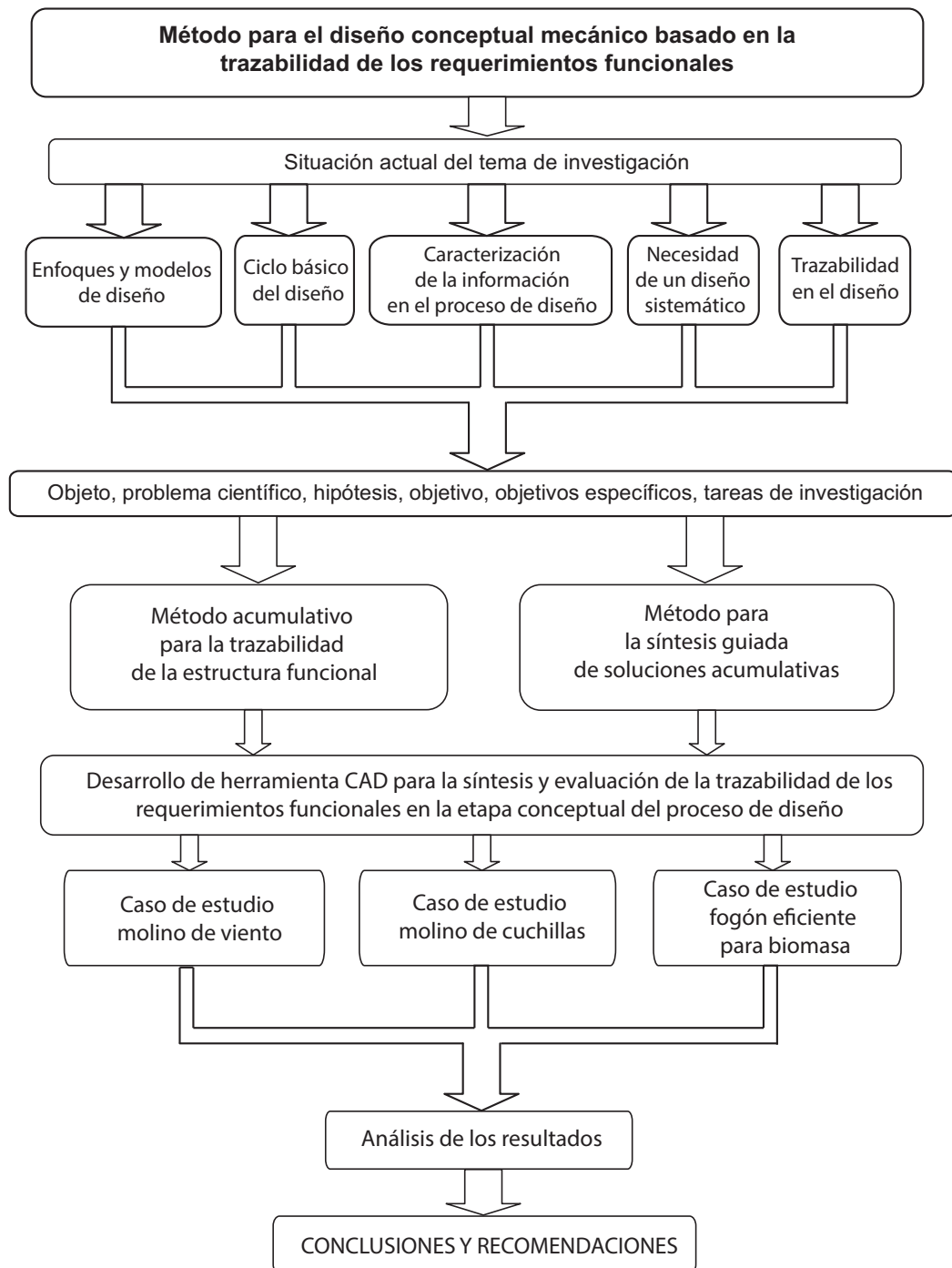


Figura 1. Esquema lógico estructural de la investigación.

1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA SISTEMÁTICA DEL PROCESO DE DISEÑO

1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA SISTEMÁTICA DEL PROCESO DE DISEÑO

En este capítulo se abordarán los aspectos teóricos esenciales relacionados con la práctica del diseño sistemático en la ingeniería, los diferentes enfoques propuestos y las dificultades encontradas en el análisis de la bibliografía consultada. Se identifican los modelos más relevantes y sus procesos, así como las diferentes fases que contienen, hasta reconocer el área de estudio de la presente investigación, enmarcada en el diseño conceptual mecánico. Esto permite definir los elementos que propician fundamentar el desarrollo de un método sistemático para facilitar la toma de decisiones en la evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales.

1.1. Enfoques y modelos de diseño

Concebir un producto consiste en la transformación de una idea, en la definición de las características de un objeto que satisfagan esa imagen y en la determinación de sus modalidades de fabricación. El producto pasará por una serie de etapas que irán desde su concepción a nivel conceptual hasta su reciclaje una vez concluida su vida útil. El diseño, en tanto, es una actividad creativa e iterativa; es un proceso de transformación que provoca el cambio de estado de un producto. Según Mistree *et al.* (1990), el mismo comienza por un proceso de conversión de la información relacionada con las ideas y exigencias para un producto y termina en un conocimiento más exacto sobre el mismo.

Pugh (1991) define el término “diseño total” como aquella actividad sistemática desarrollada para satisfacer una necesidad, que cubre todas las etapas desde la identificación de la necesidad hasta la venta del producto. El diseño puede ser visto también como un proceso, tal como lo expresa Reymen (2001), quien expone que constituye una secuencia de actividades, necesarias para crear una o más representaciones de un producto.

El objetivo de un proceso de diseño es el de sintetizar los sistemas que realizarán las funciones y los desempeños deseados (Wood y Greer, 2001). Al respecto Suh (1990), Suh (2001) lo define como la interacción entre lo que queremos realizar y cómo lo vamos a realizar, es decir, la transformación de las exigencias funcionales en parámetros de diseño. Según Dym y Little (2002), el diseño en ingeniería es la generación y evaluación sistemática e inteligente de las especificaciones para artefactos, cuya forma y función alcanzan los objetivos establecidos y satisfacen las restricciones especificadas. Según Ullman (2010), es la evolución de la formulación de un problema, asistida por la toma de decisiones en la etapa preliminar, que parte de la información tecnológica y social, donde las representaciones abstractas evolucionan hacia un producto físico.

Wallace y Clarkson (1999) y Wallace (2004) lo definen en ingeniería como el proceso de convertir una idea o una necesidad del mercado en información detallada, a partir de la cual un producto o un sistema pueden ser contruidos y, a la vez, se satisfacen todos sus requerimientos de forma, seguridad y economía. Por su parte, Ferrer (2007), caracteriza a la Ingeniería de Diseño como la disciplina que crea y transforma ideas y conceptos en productos definidos que satisfacen los requerimientos del usuario: es la disciplina en la que se lleva a cabo el diseño de productos. El papel del ingeniero se centra en el análisis, la síntesis, la evaluación y la documentación de la solución.

Pahl *et al.* (2007) lo definen como una actividad que afecta a casi todas las áreas de la vida humana, utiliza leyes de la ciencia y define los requisitos para la realización física de la solución. Zamenopoulos (2011) comenta que esta actividad surge en respuesta a una situación problemática donde hay un deseo, una necesidad o una idea para construir un cambio, pero la manera precisa de realizar la construcción no está indicada.

A los efectos de la presente investigación, se asume como definición de diseño, el proceso de convertir una idea, un deseo o una necesidad del mercado en información detallada, a través de la cual un producto mecánico puede ser construido y satisfacer los requerimientos del usuario, a partir de sintetizar los sistemas que realizan las funciones y secuenciar las actividades que generan una o más representaciones del producto. En este proceso el papel del ingeniero se centra en el análisis, la síntesis, la evaluación sistemática y la documentación de la solución.

1.1.1. Tipos de metodologías del proceso de diseño

El marco teórico del diseño en ingeniería puede estudiarse a través de diversas metodologías (Ammar *et al.*, 2010a; Finger y Dixon, 1989; Lahonde *et al.*, 2010; Le Masson y Weil, 2013; Mc-Mahon, 2010; Tomiyama *et al.*, 2009), las cuales son el resultado del estudio de los métodos que tienen aplicación en estas actividades y que responden a dos cuestiones principales:

- a) Las metodologías descriptivas que intentan poner de manifiesto los métodos utilizados en el diseño a través de la observación del desempeño de los diseñadores.
- b) Las metodologías prescriptivas, a imagen de Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007), que proponen un enfoque más algorítmico y un procedimiento sistemático.

Con el objetivo de detallar brevemente las metodologías, los modelos y las teorías del diseño más utilizadas en la actualidad, se presenta una recopilación de estos elementos, extraída del análisis de la bibliografía consultada, que aporta un marco teórico a la investigación realizada.

Una recopilación de los diferentes métodos de diseño desarrollados a lo largo de 20 años, desde el 1962 hasta el 1982 fue realizáda por Cross (1984). Estas metodologías incluyen el estudio de la forma de trabajar y pensar del diseñador, el establecimiento de las estructuras adecuadas para representar el proceso de diseño, el desarrollo y aplicación de nuevos métodos y técnicas y, por último, la reflexión sobre la naturaleza y alcance del

conocimiento con el objetivo de aplicar dicha metodología a problemas de diseño. Posteriormente, Roozenburg y Eekels (1995), expresaron que toda metodología de diseño conlleva el estudio científico de los métodos que se aplican o pueden aplicarse al mismo (Van-Aken, 2004).

Cross (1984) identifica cuatro períodos del desarrollo de los métodos y técnicas del proceso de diseño (ver Anexo 1, Tabla 1.1). El primero está comprendido entre 1962 y 1967, y se apoya en métodos desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial. Uno de los primeros en utilizarse fue el conocido como Operational Research (OR), el cual fue creado en Inglaterra y marcaba un orden coherente y disciplinado en la toma de decisiones. A pesar que en este primer periodo se refleja un intento por aplicar nuevos métodos y técnicas en la estructuración y gestión de todo el proceso de diseño, este intento se puede afirmar que fracasó pues a pesar de las numerosas conferencias realizadas en el decenio para buscar puntos comunes entre el método científico y el diseño; al final no se obtuvo un claro consenso al respecto. El segundo período, comprendido entre 1967 y 1973, se describe como aquel en el cual se intenta entender la complejidad de estos problemas, debido al fracaso en los intentos previos de estructurar el proceso Rodríguez (2004).

Una nueva perspectiva sobre el tema, se observa cuando se trata de entender la forma en que los diseñadores abordan el proceso tradicional de diseño, para lo cual se recurre desde la utilización de entrevistas abiertas hasta el uso de laboratorios controlados. Este enfoque tuvo su máximo punto de interés a finales de la década de 1970, durante la tercera etapa.

Entre 1972 y 1982 se define el cuarto período en el que emerge una visión más filosófica del diseño, que busca comprender y asimilar las experiencias ganadas en los años anteriores.

Una quinta , que puede ser definida desde finales de la década de 1980 al 2000, donde se realizan trabajos encaminados al desarrollo de herramientas informáticas para el diseño. En ella los estudios se han centrado en áreas específicas del proceso, principalmente en el desarrollo e implementación de herramientas para el diseño de detalle y la manufactura. En la última década, se observa como tendencia, el estudio intensivo de métodos y herramientas para asistir a la toma de decisiones en la etapa de diseño conceptual. En el campo de la informática, a pesar del uso intensivo de los sistemas de diseño e ingeniería asistida por Computadora (CAD/CAE) como soporte del diseño, se aprecia un interés por desarrollar soportes CAD en la etapa conceptual del mismo, tema aún no resuelto en su totalidad.

1.1.2. Modelos descriptivos

Los modelos descriptivos del proceso de diseño enfatizan en la importancia de la generación de un concepto de solución primario en él. Esta solución inicial (conjetura) es sometida a una serie de etapas que incluyen el análisis, la evaluación, el refinamiento y, por último, su desarrollo. Algunas veces, el análisis y la evaluación muestran las dificultades principales en la conjetura inicial y esta tiene que ser abandonada, por lo que debe generarse un nuevo concepto de solución primario en el inicio del ciclo. El proceso es heurístico, es decir,

utiliza la experiencia previa, guías generales y reglas poco refinadas que manifiestan los deseos del diseñador de encontrar la solución correcta, pero no con una absoluta garantía de que la misma sea la adecuada (Cross, 2008).

Los modelos de diseño descriptivos son modelos derivados de los estudios de naturaleza esencialmente psicológica, donde se pretende explicar el proceso cognoscitivo presente en el diseño. Según Chakrabarti y Blessing (2014), su propósito es incluir la descripción de las prácticas que son usadas regularmente en el diseño. Estas deben ofrecer los conocimientos habituales contenidos en ellas, logrando su comprensión, explicación y predicción. Sin embargo, según Cabarrocas (1999), la experiencia demuestra que el desarrollo de sistemas siguiendo un método “natural” (intuitivo) lleva, muchas veces, a cometer omisiones en el diseño o a adoptar soluciones poco optimizadas para la aplicación especificada, las cuales se podrían haber previsto siguiendo una metodología más estructurada y ordenada.

1.1.3. Modelos prescriptivos

De la misma forma que existen modelos que intentan describir los procesos heurísticos que tienen lugar en el proceso de diseño, existen varios intentos de construir modelos prescriptivos de este. Los modelos prescriptivos tratan de persuadir u orientar a los diseñadores en las formas de realizar el proceso de diseño. Usualmente, estos métodos ofrecen un procedimiento algorítmico y sistemático a seguir y, a menudo, son considerados como un caso particular de las metodologías de diseño.

Para Chakrabarti y Blessing (2014), el propósito de los modelos prescriptivos es distinguir y ubicar las propiedades favorables, existentes o nuevas, de los tipos particulares de prácticas de diseño. Muchos de estos modelos han hecho énfasis en la necesidad de realizar trabajos analíticos en la etapa precedente a la generación de los conceptos de solución. La intención es tratar de asegurar que el problema de diseño sea totalmente comprendido, que sean tomados en cuenta los elementos más importantes y que se identifique el problema real (Cross, 2008). Estos modelos, por tanto, tienden a sugerir una estructura básica de análisis-síntesis-evaluación del proceso de diseño.

Un de los modelo prescriptivo más detallado resulta el desarrollado por Archer (1971). Este modelo incluye las interacciones del mundo exterior con el proceso de diseño, tales como las entradas de los requerimientos de los usuarios, la calificación y experiencia del diseñador, otras fuentes de información, etcétera. La salida es, por supuesto, la comunicación de la solución en específico.

Se han propuesto diversos modelos, pero muchos tienden a complicar la estructura general del proceso de diseño, pues se centran en los detalles más pequeños de las actividades que son necesarias en estos trabajos. Por otra parte, un modelo comprensible y adecuado, es el ofrecido por Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007). Estos autores fueron probablemente los primeros en proponer la adopción de un acercamiento sistemático hacia la actividad del diseño (Christophe, 2012). El enfoque sistemático es generalmente visto como una referencia estándar para

el diseño de ingeniería en general (Adams, 2015) y para la educación del diseño de ingeniería, en particular (Wallace y Blessing, 2000).

La presente investigación toma como referencia a los modelos prescriptivos, y en específico el de Pahl y Beitz. En la figura 1.1 se exponen las publicaciones más relevantes sobre dichos modelos que han sido analizadas en el desarrollo de esta investigación. Los autores más destacados son las Norma Británica (British Standard) BS (1989), Pugh (1991), VDI (Verein Deutscher Ingenieure) VDI-2221 (1987), VDI-2222 (1997), VDI-2225 (1997), Riba (2002), Maury (2000), Wallace y Clarkson (1999), Scaravetti (2004), Hubka *et al.* (1988), Hubka y Eder (1992), Ullman (1992), Ullman (2010), Dieter (2000), Pahl y Beitz (1996) y Pahl *et al.* (2007). En todos los casos antes citados, se realiza un estudio del proceso de diseño en fases o una segmentación del mismo a partir de las propuestas de cada uno de los autores. Este tipo de análisis permite una mejor comprensión del proceso y facilita la identificación de las similitudes y diferencias entre los diferentes enfoques propuestos por dichos autores.

Según el enfoque sistemático descrito por Pahl y Beitz (ver Anexo 2, Figura 2.1), el objetivo del diseño es ofrecer una metodología comprensiva para todas las fases de concepción y desarrollo de sistemas técnicos (Pahl *et al.*, 2007). Este modelo prescriptivo es quizás el más enseñado y, según Eder (2012), ha tenido una influencia significativa en el desarrollo de otros modelos de diseño, incluyendo las normativas de la Sociedad de Ingenieros Alemanes VDI-2221 (1987) y el proceso de diseño mecánico de Ullman (1992). Su traducción al idioma inglés y su vocabulario han sido adoptados como una referencia. El modelo de Pahl y Beitz constituyó un impacto visible tanto en la educación como en la investigación acerca del diseño (Wallace y Blessing, 2000).

Las directivas VDI-2221 (1987), propuestas por la Sociedad de Ingenieros Alemanes, sugieren un enfoque sistemático donde el proceso de diseño se divida en siete etapas, cada una de las cuales posee su propia estructura y pasos específicos. Las mismas describen todas las etapas del proceso de diseño, sin embargo no comentan los medios para la toma de decisiones.

En muchos de los procesos o modelos de diseño analizados y representados en la figura 1.1, después de la etapa de análisis y de interpretación de la idea de lo que se quiere obtener, las especificaciones funcionales son el punto de partida del diseño. Del análisis de dichos procesos, se deduce que la formalización funcional de la idea, en forma de listado de requerimientos, no sugiere las posibles soluciones.

El diseño básico y de detalle (denominado por algunos autores como diseño preliminar) permite la transformación de la función a la estructura. La etapa del diseño conceptual posibilita la generación de los conceptos de solución. Con posterioridad, el diseño básico establece la selección de arquitecturas de producto, formas, componentes, materiales y el pre-dimensionamiento del mecanismo. Por tanto, para diversos procesos, la generación y selección de los conceptos de solución que dan respuesta a las necesidades del usuario se obtienen en la etapa de diseño conceptual. En efecto, las herramientas disponibles para mejorar el proceso de

generación y selección de conceptos, teniendo en cuenta los diferentes requerimientos, aún se encuentra en una etapa primaria de desarrollo.

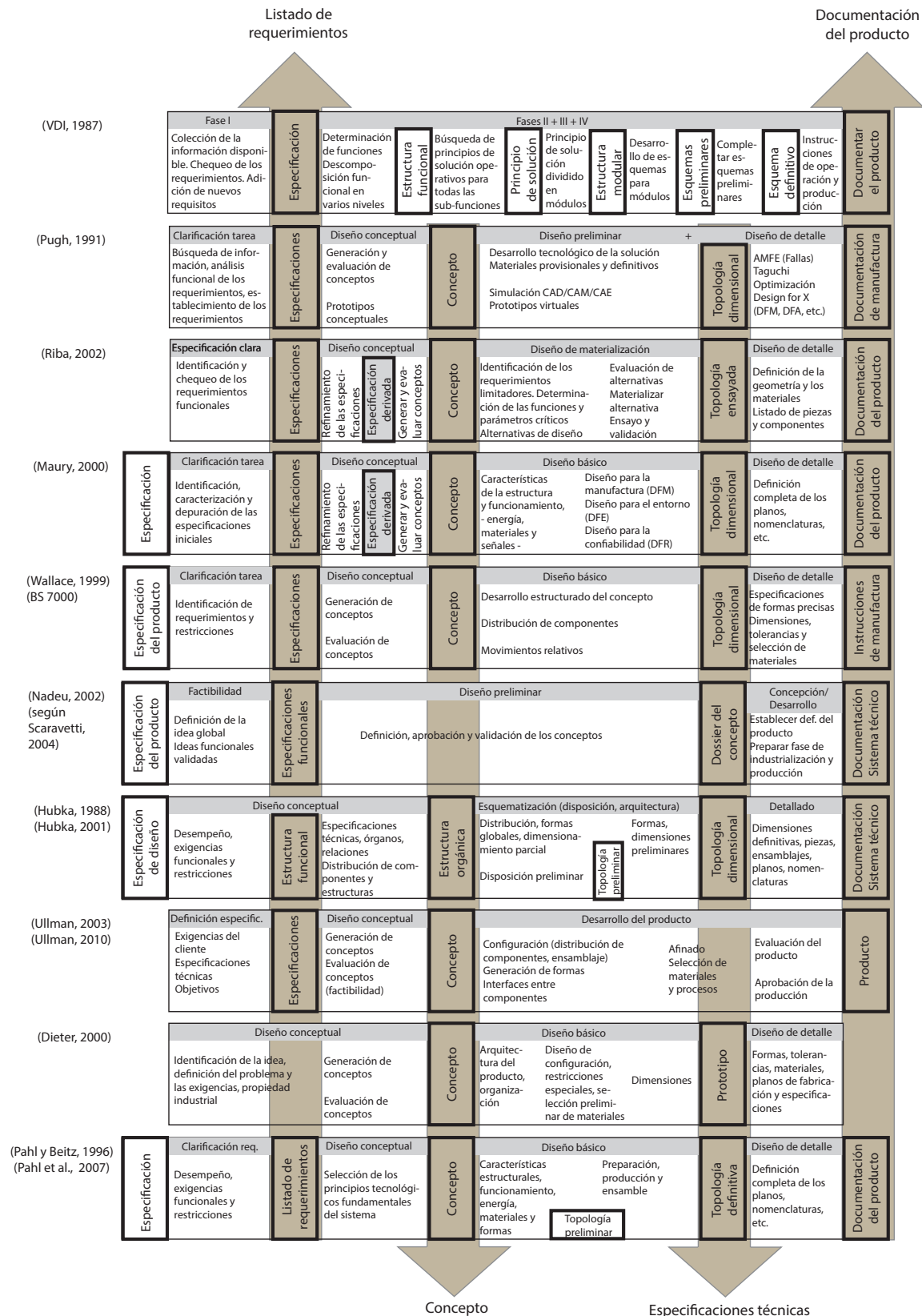


Figura 1.1. Modelos prescriptivos más relevantes para la investigación (adaptado de Scaravetti (2004)).

1.1.4. Comparación de los modelos prescriptivos de diseño

Los enfoques funcionales actuales se caracterizan por ejecutar los procesos de simulación, análisis y cálculos de validación después de la selección del concepto de solución. Si la solución no es válida, habrá que iterar hasta que se cumplan los requerimientos establecidos. En la medida en que se dispongan de criterios, métodos y herramientas que permitan una mejor evaluación de los conceptos, el proceso de iteración será cada vez menor, contribuyendo así a pasar de modelos secuenciales de diseño a modelos concurrentes.

En la figura 1.1, se aprecia la no existencia, a excepción de los modelos de Riba (2002) y Maury (2000), de etapas intermedias entre la especificación o definición del problema, y la generación y selección de conceptos. Asimismo, se observa que existe un consenso en la definición de estas, pero no se han desarrollado métodos que permitan un esclarecimiento de la transición entre ellas y el proceso de diseño.

Al analizar las diferentes metodologías de diseño, tanto Shadmehri (2009) como Haik y Shahin (2011), señalan que si bien estas propuestas difieren en las categorías de las fases del proceso de diseño, la estructura del mismo es normalmente común.

Como se observa en la figura 1.1, se pueden identificar para todos los procesos, cinco estadios fundamentales del modelo prescriptivo. Estos son: (a) etapa de especificación del problema, presente en todos los modelos; (b) etapa de especificación del producto (o de requerimientos funcionales), presente en casi todos los modelos, a excepción de Dieter (2000) quien agrupa dichos requerimientos dentro de la etapa de diseño conceptual; (c) etapa de definición de los conceptos, definidos en la mayoría de los modelos (solo Nadeau, citado por Scaravetti (2004), los incluye dentro del diseño preliminar); (d) topología del producto, presente en casi todos los modelos, excepto Ullman (2010) que los ubica dentro del desarrollo del producto, y, por último, la etapa (e), documentación del producto, presente en todos los modelos.

Como elemento también característico de los modelos prescriptivos analizados, se observa la importancia que los autores le confieren a la etapa inicial del proceso de diseño, sobre todo hasta la definición de los conceptos de solución, de ahí que la mayoría de los autores propongan dos etapas previas a la definición del concepto: la etapa de especificación y la etapa del diseño conceptual. Como salida fundamental de la etapa de especificación se tiene el listado de requerimientos funcionales y, en el caso del diseño conceptual, la generación y selección de los conceptos de solución.

Entre las herramientas que más impacto han tenido en el proceso de diseño se encuentran las asistidas por computadoras. Los sistemas CAD han influido en los métodos de diseño, en las estructuras organizativas, en la división del trabajo (división entre ingenieros conceptuales e ingenieros estructurales), en la creatividad, etcétera (Pahl *et al.*, 2007). En la actualidad, las tareas rutinarias del proceso de diseño están siendo encomendadas a los sistemas computarizados, permitiendo que los diseñadores se concentren en otras actividades claves y en nuevos diseños. Estas tareas son soportadas por herramientas computarizadas que facilitan la toma de decisiones

y potencian la utilización del conocimiento y la experiencia del diseñador.

El desarrollo de estas herramientas computarizadas ha incrementado, también, la facilidad con que los datos son procesados y manipulados por el diseñador. Al mismo tiempo, dichos sistemas proporcionan un soporte al proceso de análisis, optimización y combinación de soluciones, pero no remplazarán nunca al diseñador. Por el contrario, las habilidades en la toma de decisiones del diseñador son más importantes, debido al aumento del número de soluciones posibles generadas y a la incorporación de información de otros especialistas. Este proceso de valoración implica un aumento del espectro de conocimientos a evaluar, de la utilización intensiva de la experiencia acumulada y, por tanto, del uso de metodologías o procedimientos sistémicos.

En ninguno de los modelos prescriptivos analizados se establecen las interacciones o vínculos entre cada una de las etapas y sub-etapas del diseño conceptual. No existen estudios que permitan la estratificación de los requerimientos funcionales, orientada a la evaluación de conceptos. La presente investigación se inclina hacia la definición de un modelo sistemático que permita la evaluación de los conceptos de solución, a partir de una caracterización y seguimiento de los requerimientos definidos en la primera etapa del proceso de diseño.

1.2. Ciclo básico del diseño

Como se expresó en el acápite anterior, se han dedicado numerosos estudios dirigidos a elaborar mapas o modelos del proceso de diseño. A pesar de las diferencias que presentan en su proyección (Figura 1.1), estos modelos prescriptivos se identifican de manera implícita y explícita con el ciclo básico de diseño (parte (A) de la Figura 1.2).

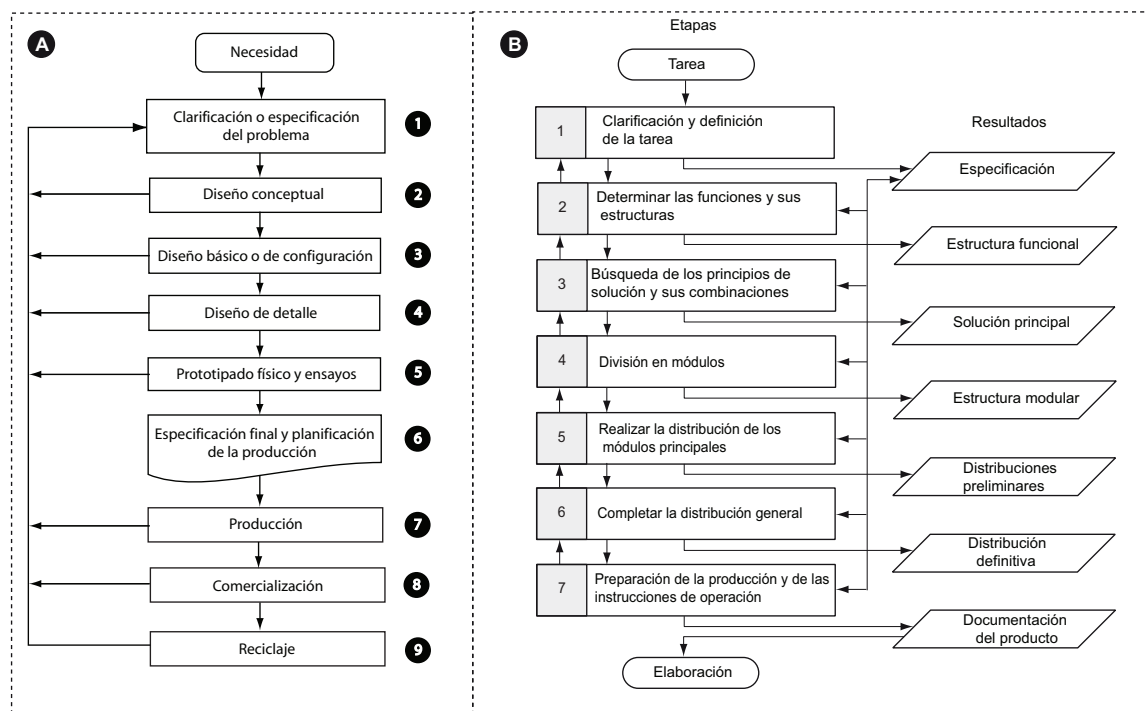


Figura 1.2. Ciclo básico del proceso de diseño y su enfoque sistemático (adaptado de (VDI-2221, 1987); (Ferrer, 2007); (Pahl *et al.*, 2007))

El ciclo básico genérico presenta diez etapas, estas son: (1) clarificación o especificación del problema, (2) diseño conceptual, (3) diseño básico o de configuración, (4) diseño de detalle, (5) prototipado físico y ensayos, (6) especificación final y planificación de la producción, (7) producción, (8) comercialización, (9) utilización y mantenimiento y (10) reciclaje. De las diferentes etapas que conforman el ciclo básico de diseño, en este capítulo se analizan con más detalles aquellas que resultan de mayor interés para la investigación: las etapas de clarificación o especificación del problema y el diseño conceptual.

La identificación de la necesidad es el proceso mediante el cual se reconoce la existencia de una necesidad del mercado, la sociedad o la empresa. Una vez definida esta, se pasa a la etapa de clarificación o especificación de la tarea. En la misma se caracteriza el desempeño que se requiere para un producto. El diseño conceptual es la etapa que continúa y tiene por objetivo la formulación de un conjunto de alternativas de solución, que normalmente se expresan a través de esquemas preliminares.

El nivel de definición que se obtiene en las soluciones ofrecidas por el diseño conceptual es integral, permitiendo comprender los principios involucrados en ellas. El paso final en el diseño conceptual lo constituye la selección de las alternativas. Una vez seleccionada una de las alternativas, se pasa a la etapa del diseño básico o de materialización. En el diseño básico se aborda la definición global de los módulos y conjuntos que integran la solución general desde el punto de vista funcional y estructural. Posteriormente, se efectúa el diseño de detalle donde se definen los elementos particulares de la solución escogida. Asimismo, se obtienen los planos con las especificaciones técnicas.

El prototipado físico y los ensayos constituyen la esencia de la siguiente etapa, donde se detectan y corrigen los detalles finales antes de entrar en la fase de producción, obteniéndose aquí la especificación final y la planificación. Como periodos últimos se encuentran la producción, comercialización y reciclaje. Se observa cómo la información es recurrente durante todo el proceso.

1.3. Caracterización de la información en el proceso de diseño

Debido a que el método sistemático que se propone en esta investigación está relacionado estrechamente, dentro del proceso de diseño, con la etapa de diseño conceptual y en ella la información aún resulta ambigua y difusa, se analizará la naturaleza de este tipo de información.

El diseño es una transformación de información (ideas, exigencias y restricciones) en descripciones estructurales (sistemas técnicos) que son capaces de cumplir con las demandas requeridas por el producto (Hubka y Eder, 2012). Un conjunto de datos, en un determinado contexto, constituye una información ya sea formal (estructurada) o informal, esta permite el proceso de conocimiento. Las decisiones están basadas en las informaciones y en el conocimiento que se disponga acerca de ellas.

Según Reymen (2001), el conocimiento de diseño puede ser: (a) un conocimiento implícito, obtenido a través de la experiencia adquirida (Hubka y Eder (2012), a lo que Maury (2000) denomina como conocimiento intuitivo

o tácito; y (b) un conocimiento explícito derivado de los métodos, modelos de diseño, estrategias o proyectos anteriores. El conocimiento, a la vez, puede ser: (a) independiente de los dominios de las actividades (es el caso de los procesos y enfoques de diseño); y (b) específico de un dominio o de una disciplina.

La investigación que se realiza se centra en los conocimientos implícitos y explícitos que definen un problema de diseño, es decir, relacionados con las características de un determinado producto en el ámbito técnico y expresados en la etapa de especificación como: (a) conocimientos básicos de diferentes áreas de la ingeniería; (b) conocimientos relativos a familias de productos: funciones, modos de utilización y operación, fabricación, materiales, etcétera; (c) conocimientos de las posibilidades de producción, aprovechamiento de materiales, etcétera; y (d) conocimientos de normas, reglamentos, etcétera.

En el próximo acápite se analizará el conocimiento presente en cada una de las etapas del proceso de diseño, el cual transita o evoluciona desde lo abstracto hacia lo concreto. Además, se definirá el tipo de sistema de documentación existente con el objetivo de posicionar el enfoque del presente estudio.

1.3.1. Tipos de conocimientos en cada etapa

Ullman (2010) describe el proceso de diseño como una “sucesión de estados”. Por su parte Vadcard, citado por Scaravetti (2004), lo define como “estados de representación del producto”. En las metodologías sistémicas, la información se va transformando a medida que transita por cada uno de los pasos y varía desde un carácter más subjetivo hasta uno más relacionado con la información de ingeniería. Es evidente que la generación de conceptos y su proceso de selección son influenciados de manera apreciable por el nivel de concreción de la información que se vaya obteniendo.

En la tabla 1.1 se muestran, en cada fase primaria del proceso de diseño, las diferentes representaciones que intervienen en el producto. Las celdas resaltadas indican el interés marcado de un espacio de representación durante una de las fases de este proceso. En el enfoque propuesto por esta investigación, se define una modelación de los espacios de representación relacionados con la idea, la función y el concepto en las dos primeras fases de diseño.

Tabla 1.1. Fases primarias del diseño y espacios de representación del producto (adaptado de Scaravetti (2004)).

		Fase 1. Caracterización de los requerimientos del usuario	Fase 2. Diseño con- ceptual	Fase 3. Definición preliminar del producto	Fase 4. Definición de- tallada del producto
Espacios de representación	Idea				
	Función				
	Concepto				
	Elementos				
	Arquitectura constructiva				
	Componentes				

1.3.2. Evolución de la información de lo abstracto a lo concreto

El nivel de imprecisión del conocimiento disminuye progresivamente durante el proceso de diseño (Giachetti *et al.*, 1997). Los niveles de imprecisión son mayores en el inicio, debido a la incertidumbre que se tiene (Figura 1.3). Según lo comentado por Sarbacker y Ishii (1997), la incertidumbre se traduce en una falta de información sobre ciertas variables pertinentes para el problema de diseño que pueden transformar el carácter estocástico de la variable o de la medición.

Una falta completa de información puede dar lugar a la aparición de incertidumbre que concierne a los resultados esperados en el diseño. Por su parte, la ambigüedad es una falta de comprensión o de claridad acerca de los parámetros críticos de un problema de decisión o sobre la naturaleza de las relaciones entre los parámetros. Esto se traduce en la incapacidad del diseñador de obtener un modelo adecuado del problema, o lo inapropiado de la toma de decisión (Sarbacker y Ishii, 1997).

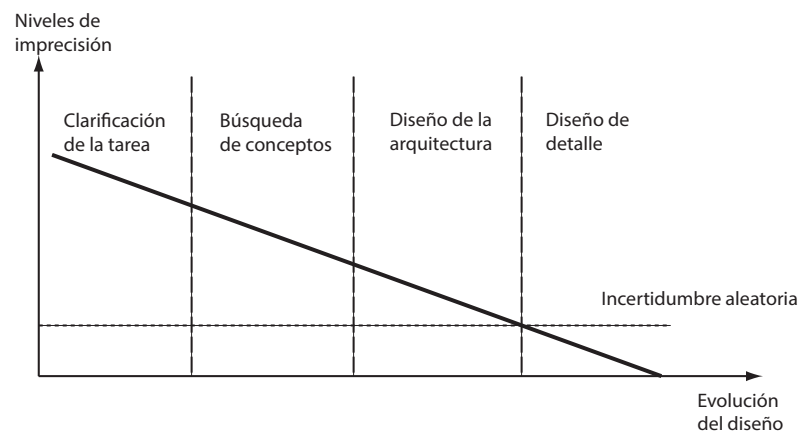


Figura 1.3. Evolución de los niveles de imprecisión en el proceso de diseño (adaptado de Giachetti *et al.* (1997)).

Una vez que se va avanzando, se progresa en el conocimiento y en el grado de madurez de la información. Según Ullman (2010), cualesquiera que sean las representaciones (semánticas, gráficas, analíticas, físicas), todas son utilizadas en el proceso de diseño del producto.

Salazar (2012) al comentar la teoría de Asimow, explica que todo acto de diseño no es más que un proceso que transforma un origen abstracto en una situación concreta. El paso de lo abstracto hacia lo concreto se puede representar mediante una espiral ascendente (Figura 1.4), donde cada ciclo se sitúa en un nivel superior de concreción. Estos ciclos forman una secuencia típica de operaciones, a la cual Asimow denomina proceso de diseño representativo de la estructura horizontal. Esta queda sustentada, a su vez, por una estructura vertical denominada morfología del proyecto, la cual consiste en el estudio de la estructura cronológica de la planeación del proyecto. La morfología del proyecto se halla dividida en fases y los pasos constitutivos básicos de cada fase están determinados por cuatro elementos: fuente de información, proceso, decisión y resultado. El resultado de un paso influye en el proceso del siguiente, estableciéndose una cadena que se constituye en una fase.

A partir de lo anteriormente analizado, la investigación se centra en la etapa de diseño conceptual, donde la

información es preferentemente de tipo semántica y con un alto grado de incertidumbre. El método sistemático que se propone ofrece una variante para la evaluación conceptual de alternativas de diseño, teniendo en cuenta los criterios o requerimientos de los usuarios de una manera más estructurada con respecto a cómo se realiza en los modelos prescriptivos estudiados.

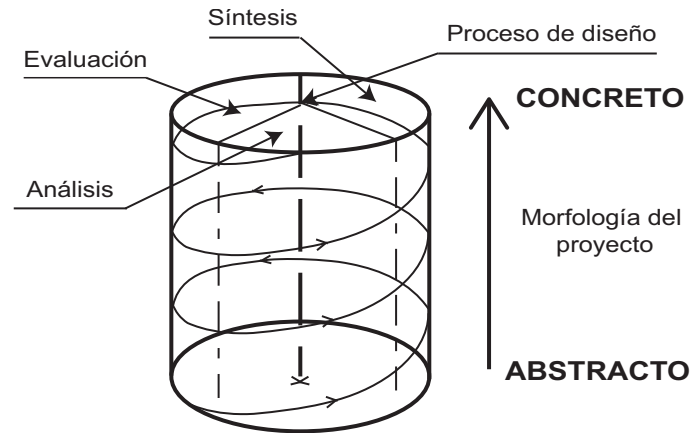


Figura 1.4. Paso de lo abstracto hacia lo concreto y morfología del proyecto en el proceso de diseño de Asimow (adaptado de Salazar (2012)).

1.4. Necesidad de un diseño sistemático

Una metodología de diseño constituye una secuencia lógica para el diseño de sistemas técnicos, partiendo de diversos tipos de conocimientos en diferentes dominios. Incluye los planes de acción que vinculan los disímiles pasos y las fases de diseño de acuerdo con el contenido y la organización de que se trate. También, integra las estrategias, las reglas y los principios para conseguir los objetivos generales y específicos del diseño (Pahl *et al.*, 2007).

La utilización adicional de los procedimientos sistemáticos resulta adecuada para incrementar la calidad de las soluciones de diseño, para potenciar la creatividad y, a la vez, para mejorar la evaluación objetiva de los resultados. El enfoque sistemático proporciona una manera eficaz de racionalizar los procesos de diseño y producción. En un diseño original, un enfoque ordenado y por pasos proporcionará soluciones que puedan ser utilizadas otra vez. Cuando un problema y sus tareas asociadas se estructuran, se hace más fácil reconocer las posibilidades de aplicación de soluciones establecidas en proyectos anteriores. La definición de la secuencia de pasos para establecer los principios de solución permite su selección y optimización en las etapas primarias del proceso.

Una metodología de diseño sistemática debe: (a) ser aplicable a cada tipo de actividad de diseño; (b) facilitar la búsqueda de las soluciones óptimas; (c) ser compatible con los conceptos, métodos y resultados de otras disciplinas; (d) facilitar la aplicación de las soluciones conocidas para las tareas relacionadas; (e) ser compatible con el procesamiento de datos asistidos por computadoras; y (f) reducir el volumen de trabajo y disminuir el tiempo de desarrollo.

1.4.1. Teoría de sistemas

En la actualidad, la utilización de los procedimientos y métodos de la teoría de sistemas a los procesos técnicos se ha incrementado de manera considerable. Un producto, en el orden tecnológico, se constituye con sistemas artificiales, concretos, muchas veces dinámicos, y compuestos por elementos ordenados e interrelacionados a través de sus propiedades. Un sistema, a su vez, está caracterizado por el hecho de poseer una frontera que lo delimita de sus vínculos con el entorno. Estas conexiones determinan el comportamiento externo del sistema, así que, es posible definir una función que exprese la relación entre entradas y salidas. Por ende, la magnitud de las variables del sistema es modificable.

A partir de la idea de que los productos pueden ser representados como sistemas, resulta obvia la aplicación de la teoría de sistemas al proceso de diseño, debido a que los objetivos de la teoría de sistemas corresponden de manera apreciable con las expectativas de un buen método de diseño.

En la figura 1.2 (B), se muestran los pasos de un enfoque sistémico. El primero de estos pasos es la búsqueda y obtención de información acerca del sistema en consideración, a través de herramientas de análisis del mercado, estudios de tendencias o de requerimientos conocidos. En general, este paso puede denominarse análisis del problema. El objetivo es la formulación clara del mismo (o del sub-problema) a resolver, el cual constituye el punto de partida para el desarrollo del sistema. En el segundo paso, o incluso a partir del primero, se puede definir un esquema general para formalizar los objetivos del sistema (formulación del problema).

Tales objetivos proporcionan criterios importantes para la subsiguiente evaluación de las variantes de solución y la selección de una, que permita satisfacer en mayor medida los requerimientos del usuario. Las diferentes variantes de solución son sintetizadas sobre la base de la información adquirida durante estos dos pasos.

Antes de evaluar las variantes, debe analizarse el desempeño de cada una de ellas, teniendo en cuenta sus propiedades y comportamiento. En la evaluación, se comparan los desempeños de cada variante *versus* los objetivos originales, y sobre esta base, se toma la decisión y se selecciona el sistema óptimo. Finalmente, la información es proporcionada en forma de planes de implementación. Como se observa, la secuencia de pasos no siempre es lineal y generalmente requiere de un proceso iterativo.

1.4.2. Métodos de diseño

Como método de diseño se conoce a cualquier procedimiento, técnica, ayuda o herramienta para diseñar. Representan un conjunto de actividades que el diseñador puede utilizar y combinar en un proceso de este tipo. Existe una gran cantidad de métodos que son tratados de manera regular en la literatura científica (Cross, 2008). Como tendencia, se aprecia el estudio intensivo de otros nuevos para brindar procedimientos racionales o sistemáticos al proceso de diseño.

Algunos de estos métodos están basados en nuevas investigaciones o son adaptaciones, a partir de investigaciones operacionales, de la teoría de la toma de decisiones, de las ciencias de la administración u otras

fuentes o resultan simplemente extensiones o formalizaciones de las técnicas habituales que los diseñadores siempre han utilizado. Dentro de los métodos de diseño, la presente investigación se centra en los de evaluación, específicamente en los racionales o sistemáticos. En la tabla 1.2, se exponen los métodos de evaluación y la etapa en la cual son utilizados.

Tabla 1.2. Métodos sistemáticos que se utilizan en la investigación.

Etapas en el proceso de diseño	Método relevante en esta etapa
Clarificación de los objetivos	Método Kano: Permite clarificar los objetivos y sub-objetivos, así como las relaciones entre ellos.
Establecimiento de la estructura funcional	Análisis funcional: Permite establecer las funciones requeridas y las fronteras del sistema.
Generación de alternativas	Evaluación por ponderación de pesos: Permite comparar (con criterios de peso) los valores útiles de las alternativas de diseño propuestas, sobre la base de oponer desenvolvimiento contra los objetivos. Analytic Hierarchy Process (AHP): método para la toma de decisiones que ayuda a establecer las prioridades en la elección de criterios. <u>DecisionMatrix</u> : Permite la selección de conceptos a partir de la importancia de las alternativas. Método de Pugh: permite la selección de conceptos a partir de la correlación de los criterios de evaluación y las alternativas de soluciones.

Como metodología sistemática, se asume en esta investigación la propuesta por Pahl *et al.* (2007), la cual es congruente con las normas VDI-2222 (1997) y VDI-2221 (1987), y define un enfoque apoyado en diversos métodos para el diseño conceptual de productos.

1.5. Trazabilidad en el diseño

El término trazabilidad está comúnmente relacionado con el desarrollo de productos informáticos. En este sentido, Chucholowski *et al.* (2014), al exponer una recopilación teórica de la expresión, cita a Winkler y Pilgrim (2010), quienes señalan que la capacidad de la trazabilidad para seguir la vida del componente de un software, ha posibilitado utilizarla como un atributo de su calidad. Para Chucholowski *et al.* (2014), durante el desarrollo del software, la definición, descripción, captura y seguimiento del camino hacia y desde el componente, está guiado por los requerimientos; debido a ello, la ingeniería de requerimientos ha sido la encargada de conducir las más amplias investigaciones relativas a la trazabilidad.

La trazabilidad es definida en el Glosario Estándar de la IEEE en Ingeniería de Software, según Radatz, *et al.* (1990), citados por Chucholowski *et al.* (2014) como:

1. “El grado para el cual una relación puede estar establecida entre dos o más productos del proceso de desarrollo, especialmente los productos que tienen un predecesor-sucesor, o una relación de controlador-subordinado entre uno y otro.
2. El grado para el cual, en un producto de desarrollo de software, cada elemento establece su razón para existir.”

Fuera del entorno de la Ingeniería de Software, la trazabilidad ha tenido poca atención por parte de los investigadores. En el caso del desarrollo de productos mecánicos existen dificultades en lograr la trazabilidad

de los productos a diseñar. En este sentido, Storga (2004) comenta que las principales dificultades se encuentran en la incompatibilidad de información entre las herramientas heterogéneas de diseño, los factores humanos y el proceso del diseño mismo, donde las personas intercambian la información del producto a desarrollar en un contexto de dominio público, a través de entornos corporativos carentes de las representaciones formales de los objetivos de diseño. Como consecuencia, la recopilación y decodificación de la información necesaria para el diseño del producto se dificulta y genera iteraciones innecesarias en su desarrollo.

La trazabilidad posibilita encontrar cómo y por qué, ciertas soluciones de diseño han sido escogidas. La misma requiere que alguna información adicional sea creada y mantenida como parte de los datos del diseño, donde los requerimientos pueden ser encontrados y probados, se puede examinar su progreso e impacto en el desarrollo del sistema, y se puede analizar su costo-beneficio (Alanen *et al.*, 2015; Wiesner *et al.*, 2015). Al comentar el ámbito relativo a la trazabilidad, autores como Ramesh *et al.* (1997), citados por Savino y Mazza (2012), argumentan que la trazabilidad facilita la comunicación entre los involucrados en un proyecto para aliviar algunos de estos problemas. Durante la fase de diseño, la trazabilidad se puede lograr mediante la vinculación de los elementos de diseño a los requerimientos de una manera bidireccional, a través de todas las etapas y perspectivas de diseño. La trazabilidad permite a los diseñadores realizar un seguimiento de lo que sucede cuando una solicitud de cambio se implementa. Esto permite que las implicaciones de un cambio de requerimiento, sean determinadas antes de que un rediseño del sistema se lleve a cabo. Además, la trazabilidad proporciona una cadena de responsabilidades dentro del proceso de desarrollo.

Para Kirkman (1998) y Sutinen *et al.* (2000), la trazabilidad de los requerimientos es el problema de trazar los vínculos entre un requerimiento y su(s) componente(s) definitorio(s), y viceversa, a partir de los componentes hacia los requerimientos; por tanto, se tiene que mantener la información de la trazabilidad de los requerimientos. Un requerimiento es trazable si se puede detectar:

- La fuente que sugirió el requerimiento.
- La razón por la que existe el requerimiento.
- La relación de otros requerimientos con dicha razón.
- Las formas en que el requerimiento se relaciona con otra información; dígame la función, sus estructuras, las partes (componentes), los análisis, los resultados de pruebas y los documentos de los usuarios.
- El proceso de toma de decisiones que da origen al requerimiento.
- El estado del requerimiento.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores, es importante destacar lo señalado por otros autores como Ouertani *et al.* (2011), quienes plantean que en el caso específico de la trazabilidad del producto, uno no solo debe centrarse en la lógica del diseño detrás del proceso de desarrollo, sino también en los componentes y en la materia prima utilizada para fabricar el producto. Por otra parte, la historia de todos los procesos implicados en el ciclo de desarrollo del producto y su entrega debe ser correctamente documentada.

La trazabilidad de los requerimientos puede ofrecer a los diseñadores varias rutas de decisión para el seguimiento del diseño, permitiéndoles usar la información para la toma de decisiones relativas a los objetivos de diseño, de manera ordenada, consultada y compartida. La modelación de la compleja relación entre los atributos geométricos y no geométricos del diseño, permite a los diseñadores reconocer la información implícita que puede haber sido ofrecida por otros participantes del diseño (Ozkaya y Akin, 2005).

Para autores como Delgoshaei *et al.* (2014), la trazabilidad de los requerimientos de diseño están conectados directamente a las soluciones de diseño. Su argumentación se centra en que la alternativa y el potencialmente mejor enfoque para satisfacer un requerimiento, consiste en determinar qué concepto de diseño (o grupo de conceptos de diseño) debería aplicarse para satisfacer un requerimiento. La aplicación de estos conceptos son las soluciones del diseño.

1.6. Conclusiones del capítulo

En todos los modelos de diseño prescriptivos estudiados existe una división del proceso en fases o etapas, que evoluciona de lo abstracto a lo concreto y proporciona una estrategia de resolución aplicable a cada fase. Este tipo de análisis permite una mejor comprensión y facilita la identificación de las similitudes y diferencias entre los diferentes enfoques sistemáticos de referencia. El estudio realizado a estos, permitió identificar las limitaciones que se expresan en las siguientes conclusiones:

- Se determinó, al caracterizar el proceso sistemático de diseño de productos mecánicos, que las metodologías sistemáticas, si bien establecen el conjunto de pasos a seguir con una serie de recomendaciones, carecen de una estructuración de las relaciones entre cada una de las sub-etapas que las conforman.
- No existe, en los modelos prescriptivos, una estructuración de la información que permita la transferencia entre las etapas del diseño conceptual y el básico, a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales.
- Se determinó que, en los modelos prescriptivos analizados, las interacciones que se producen en la etapa de diseño conceptual, no están debidamente estructuradas ni formalizadas. De esta forma, no se favorece una mejor utilización de la información contenida en los requerimientos funcionales, los cuales deberían estar orientados a la síntesis de soluciones y a la evaluación conceptual de variantes de solución.
- Se identificó, en el orden teórico, la necesidad de desarrollar métodos sistemáticos que permitan, en la etapa de diseño conceptual en primer lugar; articular las conexiones o relaciones entre las distintas sub-etapas y luego establecer formas que permitan la evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Así, se favorecería la toma de decisiones, sobre todo en la síntesis de soluciones y en el proceso de evaluación conceptual.

2. FUNDAMENTOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO SISTEMÁTICO EN EL DISEÑO CONCEPTUAL

2. FUNDAMENTOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO SISTEMÁTICO EN EL DISEÑO CONCEPTUAL

El presente capítulo expone los aspectos teóricos esenciales necesarios para la aplicación del método sistemático en el diseño conceptual mecánico. Se realiza una descripción del modelo sistemático del proceso de diseño que fundamenta la propuesta de un método para la evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales.

2.1. Estudios sistemáticos del diseño

A partir de la década de 1960-1970, el interés por el estudio del diseño de ingeniería creció no solamente en Alemania, sino en diversos países (ver Anexo 1, Tabla 1.1). Especialmente los alemanes realizaron esfuerzos en racionalizar el proceso de diseño, sugiriendo enfoques constituidos por fases con sus correspondientes métodos. Sin embargo, factores como la barrera lingüística restaron coherencia a los aportes realizados en este campo específico del conocimiento (Wallace y Blessing, 2000).

El auge de los enfoques sistemáticos provenientes de otras áreas geográficas han sido relativamente recientes y no siempre coincidentes. Es visible la diferencia sustancial propuesta por norteamericanos e ingleses, que resulta aún más obvia en la fase de diseño conceptual pues está orientada al producto y se le proporciona una alta prioridad a la generación del concepto a través de métodos para generar ideas. Estos puntos de vista son intuitivos respecto a la generación de conceptos, pero discursivos en relación al análisis de soluciones (Blessing, 1996).

Los enfoques de la escuela centroeuropea, especialmente en Alemania se centran alrededor de la generación sistemática de soluciones, utilizando varios niveles de abstracción, y pueden caracterizarse como orientados al problema. Al ser la generación del concepto un proceso discursivo, se sugieren métodos específicos para traducir el problema en conceptos a través de una concreción por pasos o etapas que involucren varios niveles de abstracción (funciones, principios físicos y de trabajo). El énfasis en los métodos sistemáticos para soportar la generación de conceptos es la principal fortaleza de este tipo de enfoques, donde el diseño conceptual es considerado como la etapa que más demanda investigaciones en el proceso de diseño (Hubka y Eder, 1984; Wallace y Blessing, 2000).

2.2. Fundamentos del diseño sistemático

El diseño sistemático se fundamenta en la aplicación metodológica de resolución a problemas generales del proceso de diseño. El proceso de resolución de problemas representa una permanente relación entre objetivos, planificación, ejecución y control, todos vinculados a la toma de decisiones.

Los sistemas de ingeniería, como metodología interdisciplinaria para la resolución de problemas asociados a sistemas artificiales, proporcionan una descripción general de este proceso. Por tanto, el enfoque sistemático divide cada sistema en fases o etapas, que evolucionan de lo abstracto a lo concreto y proporcionan una estrategia de resolución aplicable a cada fase: (1) análisis del problema, (2) definición del problema, (3) síntesis del sistema, (4) análisis del sistema, (5) evaluación y (6) decisión (VDI-2221, 1987).

El análisis del problema se fundamenta en que cada problema o tarea, inicialmente, confronta información referente a criterios conocidos o no en términos de soluciones. El alcance de esta confrontación depende del nivel de conocimiento e información dispuesta por el diseñador (Kopena *et al.*, 2004). Es frecuente la necesidad de obtener más información acerca del problema, por tanto, es necesario la búsqueda de más requerimientos, detalles o restricciones y posibles métodos de solución.

La definición del problema constituye una formulación más precisa de este, basada en un nivel más detallado de información, lo que facilita la búsqueda de soluciones. La esencia de la definición de la tarea y de los requerimientos es expresar, en un determinado lenguaje, las posibles soluciones.

La síntesis del sistema constituye una fase creativa del proceso, donde en el transcurso de la búsqueda de soluciones, se generan y combinan ideas o soluciones concretas. Lo más importante en esta fase es el desarrollo y reconocimiento de las posibles soluciones. En la fase referente al análisis del sistema, se analizan las propuestas con el objetivo de ganar en información para la toma de decisiones. En la fase de evaluación y decisión, las características de las soluciones analizadas son evaluadas con respecto a los requerimientos especificados, siendo un aspecto clave para la toma de decisiones.

El enfoque sistemático se completa cuando estas fases son utilizadas y combinadas de manera apropiada. Resulta importante hacer notar que el enfoque sistemático presupone la utilización cíclica y recurrente de las fases antes expuestas. Este proceso iterativo se muestra en la figura 2.1.

En cada una de las fases de este tipo de enfoque y en el ciclo completo, aparecen los procesos de búsqueda, recolección, procesamiento y transmisión de información. En el proceso de su conversión de una fase a otra, dicha información se enriquece, resultando su recolección y procesamiento esencial para la síntesis y el análisis. La descomposición del proceso de resolución de problemas en caminos paralelos ha sido probada con efectividad en análisis de problemas complejos. Consiste en la descomposición de un problema global en sub-problemas, en las etapas primarias del proceso. De esta forma, las soluciones pueden encontrarse más fácilmente puesto que las sub-soluciones se combinan para conformar una solución global.

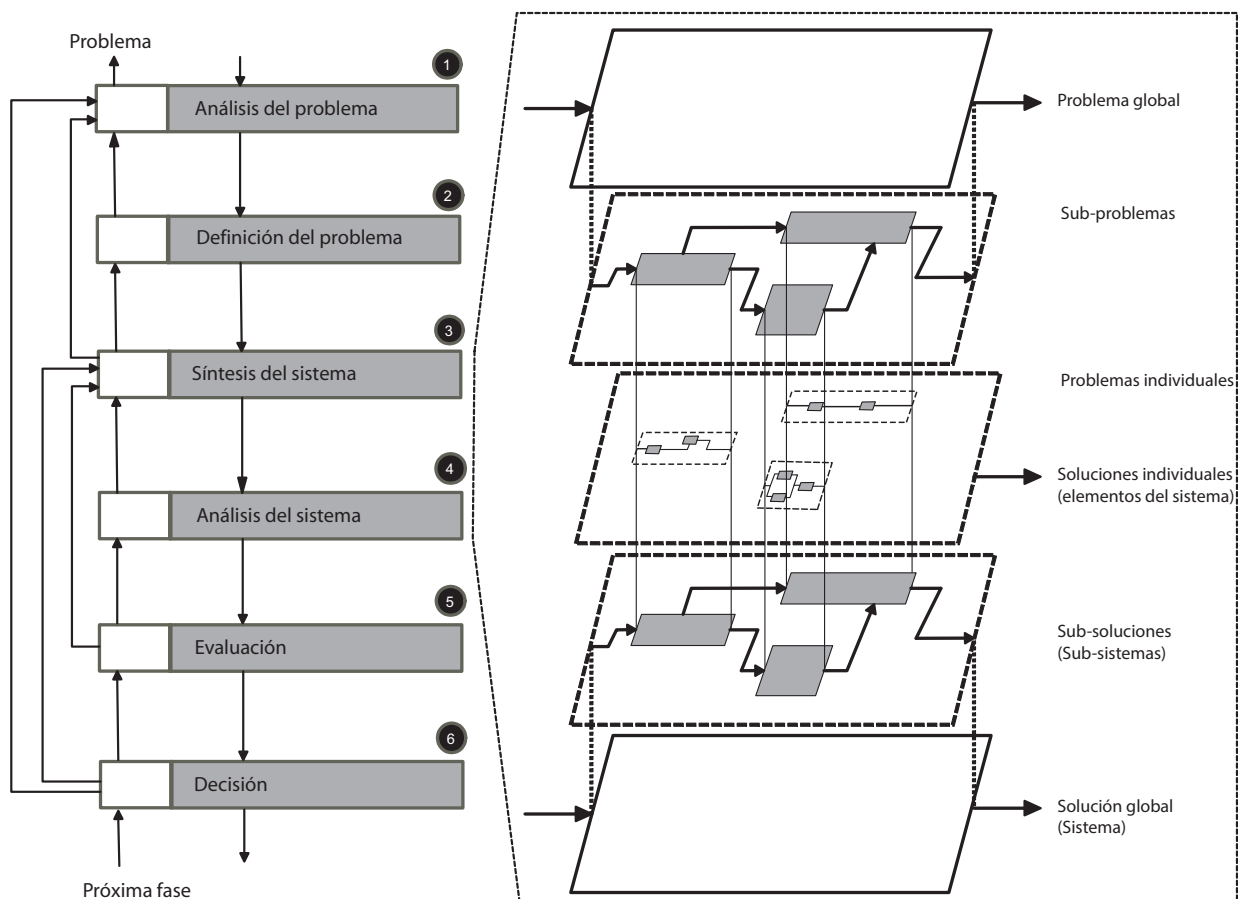


Figura 2.1. Enfoque sistemático de resolución de problemas (adaptado de VDI-2221 (1987)).

Esta estrategia representada en la figura 2.1 constituye uno de los aspectos medulares del enfoque sistemático. Tal estructuración proporciona el reconocimiento de los sub-problemas a través de la revelación de los patrones y sus relaciones, en la disciplina del procedimiento sistemático, del desarrollo de soluciones alternativas, de la adopción de soluciones familiares o comprobadas y de la introducción de una racionalización del proceso.

2.3. Procedimiento general del diseño sistemático

Según la VDI 2221 (1987), el proceso de diseño como parte de la creación de un producto, se sub-divide en etapas generales de trabajo, haciendo que el enfoque de diseño sea transparente, racional e independiente de una determinada rama de la industria.

El procedimiento general se divide en siete etapas que ofrecen como resultados siete salidas (ver Figura 1.2 (B)). En función del tipo de tarea técnica a desarrollar, así será el completamiento de cada una de las etapas propuestas y el grado de recursividad. En la práctica, las etapas individuales son a menudo combinadas en las fases de diseño, las que también depende del tipo de rama en que el mismo se ejecute.

La primera etapa es necesaria para clarificar y definir los requerimientos de la tarea. Incluye la recolección de la información disponible, determina dónde existen las posibles mejoras o los principales problemas, chequea y

suplementa requerimientos externos, y estructura la tarea desde el punto de vista del diseñador.

El resultado es un conjunto de especificaciones (lista de requerimientos) que puede establecerse independiente de cualquier solución. Este listado constituye un importante documento de trabajo que acompañará a las sub-siguientes etapas y que será constantemente revisado y actualizado. Debido a la importancia de la especificación, todas las modificaciones deben formalizarse sobre una base regular y estructurada.

La segunda etapa consiste en la determinación de las funciones: primero la función global y luego las sub-funciones más importantes que el producto diseñado deberá cumplir. La clasificación y combinación de estas sub-funciones en estructuras funcionales, fomenta una base para la búsqueda de soluciones a la función global. El resultado de esta etapa es una o varias estructuras funcionales y se presenta usualmente en forma de diagramas.

En la tercera etapa se realiza una búsqueda de los principios de solución para cada una de las principales sub-funciones de la etapa anterior, así como la combinación de los mismos con el fin de obtener las diferentes soluciones posibles. La salida de esta etapa lo constituye el principio de solución que se tomará como referencia para la siguiente.

La cuarta etapa define la división del principio de solución seleccionado en posibles módulos conceptuales, antes de comenzar el proceso de definir los módulos en términos más concretos. Se obtiene como resultado una estructura modular inicial que, en contraste con la estructura funcional del principio de solución, proporciona una indicación preliminar de la descomposición de la solución en grupos y elementos (sub-sistemas y elementos del sistema), así como las uniones o interfaces para su implementación.

La quinta etapa consiste en la definición primaria de los esquemas preliminares de los módulos principales y su resultado radica en un conjunto de bocetos preliminares que se dibujan y esquematizan, y darán paso a la sexta etapa donde los diseños anteriores son completados con información detallada acerca de los ensambles y de todos los componentes que conforman el producto.

En la séptima y última etapa, se obtienen todas las instrucciones de producción y operativas. Su resultado es un conjunto de documentos en forma de dibujos de detalles y de ensambles, un listado de piezas, las tecnologías de producción y otros documentos. Es meritorio aclarar que, en todas las etapas anteriores, se requiere de las actividades de selección, evaluación y optimización.

2.4. Modelo sistemático de Pahl y Beitz

El enfoque o modelo sistemático en el diseño en ingeniería fue desarrollado en la década de 1970 por los profesores alemanes Pahl y Beitz, con una larga tradición en la investigación. La primera versión de este enfoque fue publicada en idioma alemán en 1977 y luego traducida por primera vez al idioma inglés en 1984 (Pahl *et al.*, 2007). El punto de vista sistemático presupone que el método para la resolución de problemas de diseño es una variante del método general de resolución de problemas (ver apartado 1.4). En

su trabajo, el diseñador usualmente sigue un determinado camino o ruta, constituido por actividades o fases fundamentales: (a) formulación del problema y de los requerimientos; (b) búsqueda de soluciones alternativas; y (c) evaluación, documentación y comunicación de los resultados. Las metodologías de diseño soportan este proceso proporcionando métodos y conocimientos específicos. El modelo de Pahl y Beitz (ver Anexo 2, Figura 2.1) divide el proceso de diseño en cuatro fases o etapas: Clarificación de la tarea, Diseño conceptual, Diseño básico y Diseño de detalle. Asimismo, establece que las delimitaciones entre las fases son aproximadas y, por tanto, se hace necesario la iteración y la recursión.

2.4.1. Clarificación de la tarea (definición del producto)

Esta es una etapa fundamental del proceso de diseño que parte del enunciado inicial del producto y establece aquellas acciones destinadas a definirlo de forma completa y precisa. En general, el enunciado inicial hace referencia a una idea o a determinados aspectos sobre el producto, pero no tiene el nivel de concreción suficiente para permitir iniciar los trabajos de diseño con garantías de acierto (Riba, 2002). Esta etapa tiene el objetivo de establecer un conjunto de determinaciones completas y suficientes que se organizan en forma de documento de especificación.

El establecimiento de la especificación permite al equipo de diseño recorrer las posibilidades y límites del problema. En este primer momento, fundamental para el desarrollo posterior del diseño, es preciso informarse y documentarse sobre aspectos tales como: los modos de operación principales, aquellos ocasionales y accidentales del producto, el entorno donde se opera, los servicios del entorno, los aspectos de fabricación, los aspectos comerciales, aspectos legales, etcétera (León, 2009).

El resultado final de la especificación es un conjunto de requerimientos que el producto debe cumplir. En las metodologías sistemáticas revisadas, se observa que el concepto de requerimiento no es tratado exactamente de una manera común. La taxonomía y la clasificación del mismo es diferente, tal y como lo analizan Ferrer *et al.* (2006) y León (2005).

Los requerimientos son fundamentales en la configuración de un producto. En este sentido Wang *et al.* (2011), refieren que estos definen su funcionalidad y enfoca la atención en el comportamiento de tales características. Por su parte, las restricciones definen las funciones estructurales del producto.

En esta investigación se asume el término de requerimiento funcional (Suh, 1990, 2001), por ser el que más se adapta a los objetivos previstos, expresa lo que el producto tiene que cumplir independientemente de la solución de diseño adoptada.

A continuación, se muestra un análisis de los diferentes enfoques de diseño relacionados con la iteración que ocurre en el proceso de selección de conceptos desde la definición de las especificaciones, a fin de compararlos con la propuesta de esta investigación. La figura 2.2 permite apreciar los diferentes estadios de avance del proceso de estructuración y estratificación de los requerimientos, utilizando como base los autores

más relevantes consultados para la presente propuesta.

En la figura 2.2 (A), se muestra la evolución típica de los requerimientos funcionales de Pahl y Beitz, Pahl *et al.* (2007), que a su vez, resume los enfoques de los autores VDI-2221 (1987); Hubka *et al.* (1988); Pugh (1991); Wallace y Clarkson (1999); Dieter (2000); Hubka y Eder (2012); Nadeu (2002) y Ullman (2010), analizados todos en el acápite 1.1.3.

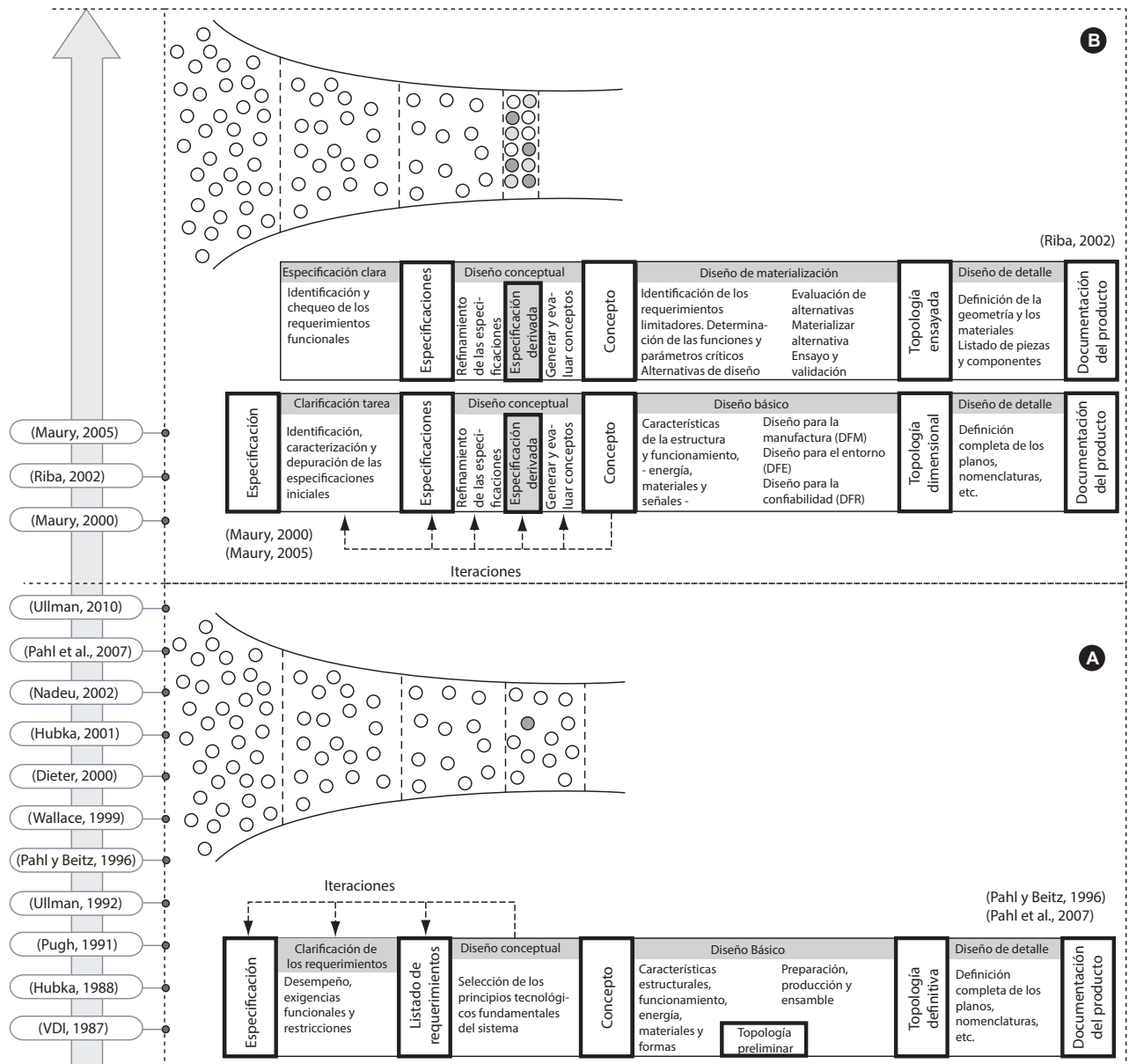


Figura 2.2. Estadios de avance de los requerimientos, según los autores más relevantes.

El análisis de los enfoques antes citados, ha permitido establecer que en ellos existe la estructuración clásica del diseño prescriptivo, donde ocurre un proceso iterativo desde la toma de decisiones hasta la selección del concepto. En esta figura se representa de forma gráfica la forma en que los requerimientos van evolucionando y cómo paulatinamente se van sintetizando hasta quedar representados en el concepto seleccionado. Como se observa, no existe un proceso de estructuración ni de estratificación ordenada de los requerimientos.

En la parte (B) de la figura 2.2, se muestran enfoques recientes en la evolución de los requerimientos (Maury, 2000; Maury y Riba, 2005; Riba, 2002), los cuales fueran desarrollados a partir de los autores reflejados en el cuadrante A. En este caso, a diferencia de los trabajos anteriores se introduce en el proceso de toma de decisiones una nueva etapa, denominada especificación derivada (Maury, 2000; Maury y Riba, 2005), cuyo objetivo es aportar una actividad preparatoria que funciona como medio de encadenamiento entre la especificación inicial y la síntesis funcional.

Esta “especificación derivada” permite, luego del refinamiento propio que ocurre en la etapa de diseño conceptual, un proceso de tamizado de los requerimientos, basado en los diferentes enfoques o herramientas que proporciona la Ingeniería Concurrente (Coll *et al.*, 2006; Kiran *et al.*, 2011; Maury *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2005; Riba *et al.*, 2006, 2004, 2005; Serrano *et al.*, 2006).

Dicha especificación tiene como ventaja el refinamiento y la clasificación de los requerimientos según el tipo de herramienta a utilizar, y como desventaja cabe señalar que no ofrece una clasificación de acuerdo a los niveles de cualidad de los requerimientos, lo que no permite una trazabilidad hasta la evaluación conceptual.

En los modelos sistemáticos, los requerimientos funcionales deben ser identificados, estructurados, estratificados y utilizados en todo el proceso de diseño. Esto implica la necesidad de capturarlos, formalizarlos y representarlos de manera adecuada. En las metodologías analizadas no se aprecian métodos sistemáticos que permitan este proceso orientado a garantizar la trazabilidad de los requerimientos hasta la evaluación de los conceptos.

2.4.2. Diseño conceptual

Esta etapa del proceso de diseño parte de la especificación del producto, origina diversas alternativas del principio de solución y, después de evaluarlas, elige la más conveniente. El resultado, dado como principio de solución evaluado y validado, no tiene una forma de presentación aceptada de forma general; usualmente consiste en dibujos a mano alzada que no tienen un elevado nivel de detalle. El diseño conceptual está muy directamente relacionado con la especificación y, a menudo, se debe renegociar algún requerimiento ya que las soluciones resultan demasiado complejas, costosas, pesadas o voluminosas; en algunos casos aparecen nuevas posibilidades (Bordegoni, 2011; Christophe *et al.*, 2010; Haik y Shahin, 2011; Kim y Xirouchakis, 2010; Riba, 2002; Sreedharan, 2003).

La etapa conceptual es, en general, la más innovadora y sus soluciones suelen llevar el germen de todo el desarrollo posterior. Por lo tanto, debe promoverse un ambiente propicio a la creatividad entre los miembros del equipo de diseño pero, al mismo tiempo, debe fomentarse un sentido crítico y riguroso en la evaluación de las soluciones (necesariamente poco definidas en esta etapa del diseño) pues, cualquier omisión, olvido o error de concepto ocasiona más adelante dificultades importantes en el proyecto.

El nivel de definición al término de la etapa conceptual debe ser suficiente para el desarrollo de la etapa básica, es decir, debe existir una claridad en relación con los conceptos y principios incluidos en la solución así como

en los esquemas, de manera que se puedan realizar las estimaciones técnicas y económicas necesarias (Maury, 2000).

La figura 2.3 ilustra de manera pormenorizada los pasos que sugieren los modelos sistemáticos para el diseño conceptual. El primero constituye una recomendación, pues los diseñadores durante la búsqueda de soluciones deberán centrarse en el proceso de abstracción con el objetivo de identificar la esencia del problema y de no tomar soluciones influenciadas por ideas convencionales. Entre las problemáticas más relevantes se pueden citar: mejorar funciones técnicas, reducir el peso, disminuir los costos y mejorar los métodos productivos. Todas ellas deberán ser satisfechas por la función global del producto (Pahl *et al.*, 2007).

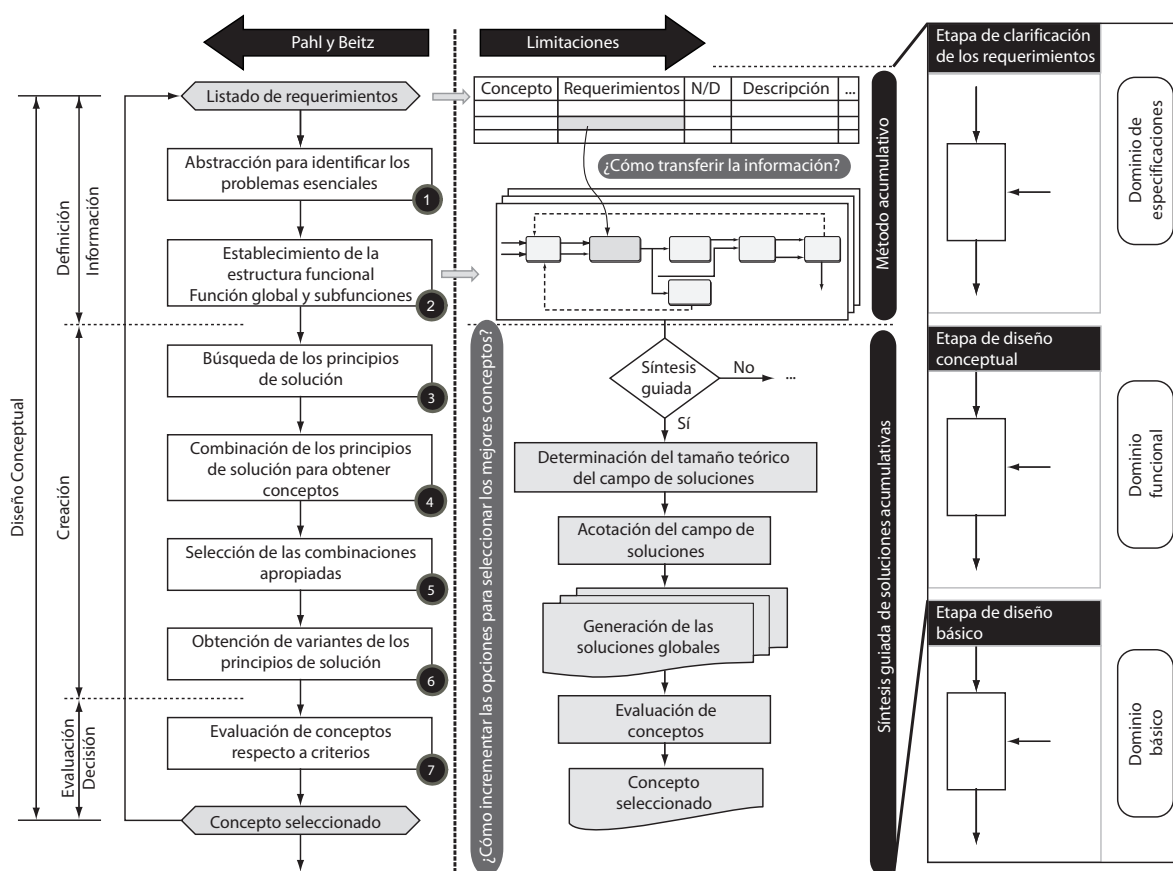


Figura 2.3. Etapas y limitaciones en el diseño conceptual (adaptado de (Pahl *et al.*, 2007))

El segundo paso, el establecimiento de la estructura funcional, también denominado modelación funcional, es el más importante dentro del diseño conceptual en los modelos sistemáticos de diseño.

Establecimiento de la estructuración funcional (modelación funcional)

La estructura funcional puede representarse a nivel de la función global del producto o sistema; o bien, dependiendo de su complejidad, puede subdividirse en partes que contienen sub-funciones de menor complejidad. Esta subdivisión presenta una gran importancia en el proceso de diseño conceptual y se orienta a tres objetivos: (a) proporcionar una estructura funcional más detallada y comprensible, a la vez que menos ambigua; (b) facilitar la búsqueda de los principios de solución para las sub-funciones, las cuales, mediante su

combinación, deben aportar los principios de solución para la función global; y (c) propiciar la creación de la estructura modular del producto.

En el proceso de descomposición funcional, la ausencia de una definición precisa de las sub-funciones es uno de los aspectos que influye en la efectividad de las metodologías prescriptivas de diseño tales como Pahl *et al.* (2007) y Ullman (2010). El desarrollo de un conjunto estándar de funciones y flujos (denominada base funcional) y un enfoque sistemático de modelación, ofrece una vía para minimizar el efecto de la incertidumbre (Grima, 1993; Momani, 2005; Pinchefskey, 1996; Ulrich y Eppinger, 1995).

Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007) proponen cinco funciones generalmente válidas y tres tipos de flujos. Como característica general, son definiciones con un alto grado de abstracción. Por su parte, Hundal (1990) formula seis clases de funciones con acciones más específicas en cada clase, sin llegar a ser este un listado exhaustivo de funciones mecánicas. Otro enfoque desarrollado por Koch Stone *et al.* (2000) utiliza 20 representaciones de funciones mecánicas. Malmqvist, *et al.* citados por Stone *et al.* (2000) comparan la metodología TRIZ con la metodología de Pahl y Beitz.

A partir de estas experiencias, Stone (1997); (Stone y Wood, 2000; Stone *et al.*, 1998, 2000) extiende el modelo de Hundal (1990) a ocho clases de funciones y, por primera vez, se define cada una de ellas. Este esquema propuesto incluye también las 30 funciones que dispone la metodología TRIZ.

El modelo propuesto en la presente investigación toma como referencia la base funcional definida por Stone (1997); (Bryant *et al.*, 2006a,b; Hirtz *et al.*, 2002; Hutcheson *et al.*, 2006; Stone y Wood, 2000; Stone *et al.*, 1998, 2000) y la adecua al contexto de la trazabilidad de los requerimientos de usuario desde su definición en la etapa de especificación hasta la evaluación de conceptos (ver Anexo 3, Figura 3.1).

El único requisito establecido para la creación de la base funcional es que las funciones globales y sub-funciones deberán expresarse en forma de verbos; luego, se representarán los flujos de dicha base funcional. De esta forma simple, se tiene la estructura funcional clásica de un producto que responde a las necesidades definidas por el usuario y transmitidas o reflejadas en los requerimientos funcionales.

Los dos elementos básicos que representan a los diferentes enfoques de la modelación funcional lo constituyen: los flujos y las funciones. La transformación de los requerimientos funcionales en funciones y la definición de los flujos asociados, constituye un proceso complejo de síntesis con una elevada dosis de subjetividad y heurística. Debido a esta característica, el estudio de la trazabilidad de los requerimientos, desde su definición hasta la evaluación conceptual, debe ser abordado en la construcción funcional.

Un componente esencial en este tipo de modelo lo constituyen los flujos, que representan las entidades de entrada y salida de una determinada función (Liu *et al.*, 2011; Richardson III *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2012; Stanković, 2011; Stanković *et al.*, 2009). Para su representación (flujos de material, energía e información), en el presente estudio se asume lo expuesto por Stone (1997); (Bryant *et al.*, 2006a,b; Hirtz *et al.*, 2002; Stone y Wood, 2000; Stone *et al.*, 1998, 2000; Summers *et al.*, 2001), que a su vez es una síntesis de trabajos similares

(ver Anexo 3, Figura 3.1).

En la construcción de las estructuras funcionales, es utilizado un conjunto de reglas gráficas gramaticales para descomponer la función global en sub-funciones de un nivel de jerarquía más bajo y más específicos. A diferencia de otros enfoques de utilización de reglas gráficas gramaticales en el proceso de diseño, descritas en los trabajos de Schmidt y Cagan (1995); Schmidt y Cagan (1997); Jin y Li (2007); Helms *et al.* (2009) y Helms (2013), en la presente investigación se utiliza un enfoque modificado, pues se le incorpora la trazabilidad cualitativa de los requerimientos funcionales. La estructura funcional definitiva dependerá, en gran medida, de la experiencia e intención del diseñador o equipo de diseñadores.

En la revisión de los modelos sistemáticos, no se evidencia el tratamiento o la derivación de los requerimientos funcionales hasta la obtención de una estructuración funcional de forma jerarquizada y estratificada que permita su trazabilidad.

Síntesis conceptual de soluciones

La fase de diseño conceptual tiene por objetivo la generación de las soluciones que deberán satisfacer los requerimientos funcionales del problema (especificaciones) y, posteriormente, constituirán la base para el diseño básico y de detalle (Cabarrocas, 1999; Cabarrocas y Riba, 1997; Chaur, 2004).

La generación de las soluciones se ha basado en dos tipos de herramientas: los métodos de síntesis de soluciones y los modelos de representación del producto. El desarrollo de estas herramientas se dificulta por el hecho de que la manipulación de la información funcional del sistema es mucho más abstracta que la información geométrica propia de las fases de diseño básico y de detalle, como ha sido analizado con anterioridad. Por ello, uno de los pasos previos a la clasificación de los métodos de síntesis funcional de soluciones es el establecimiento de un criterio de clasificación.

En este sentido, se considera que los métodos de síntesis pueden quedar definidos por los factores: (a) campo de aplicación; (b) extensión del campo de soluciones; (c) grado de intervención requerido por parte del diseñador; y (d) facilidad de interpretación de los resultados (Cabarrocas, 1999; Cabarrocas y Riba, 1997; Chakrabarti y Bligh, 1994; Ehrich y Haymaker, 2012; Maury, 2000; Maury y Riba, 2005; Moreira, 2007).

Los tres primeros factores corresponden al proceso de síntesis, mientras que el cuarto depende de los modelos de representación del sistema. El modelo propuesto en esta investigación toma como referencia el tercero de estos factores, pues los demás están más relacionados con la práctica industrial. Según este criterio, los métodos de síntesis funcional de soluciones se han clasificado en: (a) métodos basados en la síntesis guiada de soluciones, donde el diseñador toma parte activa del proceso (Maury, 2000; Maury y Riba, 2005; Withanage *et al.*, 2010); y (b) métodos basados en la síntesis automática de soluciones (Chakrabarti y Bligh, 1996; Moreira, 2007). El primer grupo de métodos será el criterio asumido en esta investigación.

Naturaleza del conocimiento en la síntesis guiada de soluciones

La síntesis de soluciones en la etapa conceptual constituye uno de los aspectos más difíciles de sistematizar y

analizar, pues constituyen áreas del conocimiento aún en fases primarias de desarrollo investigativo. La síntesis conceptual guiada de soluciones es la actividad que se desarrolla posterior a la construcción funcional y su objetivo es la generación o formulación de las soluciones de acuerdo a las especificaciones iniciales. Desde la óptica de los modelos prescriptivos, las soluciones se pueden obtener a partir de la combinación sistemática de los conceptos elementales asociados a las funciones básicas de la estructura funcional.

El tipo de conocimiento requerido para la síntesis de soluciones puede definirse de dos tipos: (a) conocimiento formal y (b) conocimiento heurístico (Ammar *et al.*, 2010a,b; Goel *et al.*, 2014; Maury, 2000; Maury y Riba, 2005; Stone *et al.*, 2000). Dicha clasificación tiene la posibilidad de ser aplicada en la mayoría de los problemas que aborda este estudio.

Los elementos que constituyen el conocimiento formal están determinados por el grupo de conceptos referidos a aquellos elementos o componentes que ejecutan una o varias funciones básicas dentro de la función global. La base de especificaciones técnicas se refiere al conjunto de estimaciones acerca del desempeño de las soluciones a escala conceptual, siendo esto una acción propia de los sistemas complejos de ingeniería (Maury, 2000; Maury y Riba, 2005).

El conocimiento heurístico se refiere a los diferentes criterios y reglas propios del campo de conocimiento de un producto determinado. Este tipo de conocimiento es utilizado con el fin de acotar el campo de soluciones para el caso de sistemas complejos (Ammar *et al.*, 2010a,b; Goel *et al.*, 2014; Stone *et al.*, 2000).

Soporte a la generación de conceptos

Los enfoques sistemáticos de diseño proponen diferentes métodos de soporte a la generación de conceptos. Los más extendidos son los propuestos por Pahl *et al.* (2007), Ölvander *et al.* (2009); así como Ulrich y Eppinger (1995). Estos autores utilizan el método de la caja negra para descomponer la función global en sub-funciones. Las mismas pueden ser ordenadas en una estructura funcional y los principios de cada una de ellas pueden presentarse a través de árboles de funciones.

Se han propuesto diferentes métodos y herramientas, basados en matrices, para soportar el proceso de diseño. Son utilizados típicamente para visualizar las relaciones entre las propiedades de un producto y sus actividades, siendo un ejemplo el método matricial Quality Function Deployment (QFD) donde los requerimientos funcionales son mapeados *versus* las características de ingeniería (Erginel, 2010; Hauser y Clausing, 1988; Kwong *et al.*, 2010; Pahl *et al.*, 2007). Otros métodos matriciales incluyen la matriz de incidencia y la matriz de diseño, a partir de las propuestas del diseño axiomático de Suh (Cai *et al.*, 2010; Cao y Fu, 2011; Jianxin y Ming, 2011; Li *et al.*, 2010). Estos también se han combinado con los métodos de optimización (Ölvander *et al.*, 2009).

La matriz morfológica es un método que se basa en la búsqueda sistemática de la solución a un determinado problema a partir de abordar todas las combinaciones posibles en una matriz. El hecho de que puede revelar soluciones no usuales, es una de las bases para facilitar el proceso creativo, aspecto similar a lo propuesto por

el TRIZ. La matriz morfológica se crea descomponiendo la función principal en sub-funciones y listándolas en el eje vertical de la matriz. Por su parte, los posibles principios de solución para cada sub-función se listan en el eje horizontal y los diferentes conceptos se obtienen a partir de la combinación sistemática (Ölvander *et al.*, 2009).

Esta matriz es una forma de estructurar la generación de conceptos y de facilitar la creatividad. Su mayor dificultad radica en que el número de posibles soluciones, en ocasiones, es difícil de abordar por los diseñadores y no posee una forma de representar la trazabilidad de los requerimientos funcionales para su utilización en la evaluación de conceptos.

Evaluación conceptual de variantes de diseño

Siguiendo el enfoque sistemático de Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007) adoptado en esta investigación, en el presente paso se evalúan las propuestas de solución obtenidas en el apartado anterior. En este caso, la evaluación conceptual significa determinar la proximidad de cada solución, en relación a un objetivo definido, con la particularidad de que en esta tesis se añade, al proceso de evaluación, la trazabilidad de los requerimientos funcionales.

Con el objetivo de minimizar esta contradicción, la teoría clásica VDI-2225 (1997) propone una secuencia de pasos que guían el proceso de evaluación conceptual:

Paso 1: Identificar el criterio de evaluación. Es el primer paso de cualquier sistema de evaluación. El mismo se obtiene a partir del análisis de los requerimientos funcionales y de las restricciones generales establecidas.

Paso 2: Ponderación del criterio de evaluación. Para establecer el criterio de evaluación, se debe valorar su respectiva contribución (asignar peso) al valor global de la solución y qué criterios relativamente sin importancia pueden ser eliminados antes de que la evaluación comience. Un factor de peso o de ponderación es un número positivo real que indica la importancia relativa de un criterio de evaluación en particular.

Paso 3: Asignación de valores y compilación de resultados. A cada variante se le asigna un valor en consideración con la escala seleccionada y su evaluación posee un alto valor subjetivo. Se compilan, para cada variante, los valores asignados.

Paso 4: Comparación y selección de conceptos. Se comparan los conceptos a partir de la evaluación anterior y se decide la selección apropiada.

Uno de los problemas asociados a la síntesis guiada y no guiada de soluciones es que se generan muchas variantes que, si bien amplían el campo de soluciones del problema, hacen el proceso de evaluación de conceptos un paso tedioso. Por tanto, existe una contradicción entre la bondad que ofrece una síntesis guiada de soluciones en una metodología sistemática al facilitar un campo de soluciones amplio a un determinado problema y lo complejo que puede convertirse para el diseñador el proceso de evaluación de los conceptos que se generan.

Como complemento a lo expresado se señala que, en la metodología prescriptiva de Pahl y Beitz y en las restantes metodologías sistemáticas analizadas, no existe un proceso de trazabilidad que permita, en la

evaluación conceptual, disponer de información sobre la influencia de los requerimientos funcionales en la toma de decisiones.

2.4.3. Diseño básico o de materialización

Una vez elegido un principio de solución, debe materializarse el producto por medio de un conjunto organizado de piezas, componentes, enlaces, uniones y otros elementos que se harán realidad a través de los materiales, las formas, las dimensiones, los acabados superficiales y otras determinaciones. Al final de esta etapa se proporciona los planos de conjunto del producto o sistema, que muestran cómo se articulan las diferentes partes, para formar el conjunto montado, donde las piezas y los elementos corresponden con la versión final materializada.

El diseño de materialización también desarrolla las soluciones alternativas sobre aquellas constructivas para, después de evaluarlas, escoger una. Resulta adecuado acompañar los planos de conjunto con una memoria anexa contentiva de los aspectos más relevantes de los trabajos realizados, las hipótesis de partida, los cálculos y las simulaciones, así como referencias de los resultados de los prototipos y ensayos ejecutados.

Los trabajos de diseño básico son los que más se acercan a las actividades tradicionales de los departamentos de diseño. En ellas, profesionales que dominan las nuevas técnicas de modelización y simulación (CAD/CAE), así como las de prototipado y ensayo, desarrollan las piezas, elementos y conjuntos que compondrán el producto. Estas actividades son típicamente iterativas y se dirigen hacia la optimización, en función de los recursos humanos, materiales y de tiempo disponibles. En las fases de simulación y evaluación de las soluciones, conviene desarrollar prototipos funcionales y realizar ensayos de durabilidad. Esta etapa no es de interés para la investigación, pues el presente estudio solo se limita a la parte conceptual del proceso de diseño.

2.4.4. Diseño de detalle

Es la última etapa del proceso de diseño que, partiendo de la definición proporcionada por los planos de conjunto y la memoria anexa, tiene por objeto el despliegue de todos los documentos necesarios para la fabricación del producto. Los resultados son los planos de las piezas y conjuntos específicos, la documentación de los componentes de mercado incorporados y la relación de piezas y conjuntos (o módulos); todos ellos con su denominación, número de referencia, número de piezas, material y otras especificaciones técnicas (acabados, procesos y ensayos de recepción) o especificaciones de gestión (normas de aplicación, suministradores y contratistas).

Se puede argumentar que la realización de prototipos funcionales obliga desde la etapa anterior al despliegue de planos de detalle. Pero, incluso en este caso, habrá que incorporar en el diseño definitivo los cambios y modificaciones derivados del ensayo. Este tipo de diseño no debe limitarse al despliegue del diseño de materialización, sino que tiene funciones propias como la de comprobación de las funciones y la de depuración de las soluciones para simplificar, eliminar o refundir elementos. A menudo, las buenas soluciones se originan

en etapas anteriores, pero su articulación efectiva suele tener lugar durante el diseño de detalle.

Normalmente se producen muchas interacciones entre las etapas de diseño de materialización y de diseño de detalle, lo que no representa ningún problema añadido, pues las personas que suelen desarrollarlas son las mismas. Si bien es cierto que la partición del diseño en estas dos etapas es más de orden conceptual que práctico, hay que señalar que es improductivo realizar otras tareas de diseño de detalle antes de validar un producto con las pruebas de durabilidad. Esta etapa, al igual que la de diseño básico o la de materialización, no resulta de interés para la investigación.

2.5. Enfoque metodológico para la trazabilidad de los requerimientos funcionales

El proceso de diseño se basa en la transformación de la información: su entrada y salida del proceso la genera, aunque esta última en otro estadio. A través de un proceso complejo, los diseñadores transforman la información de origen en otra que describe un producto que cumple con las necesidades detalladas con antelación. Este proceso involucra la recolección, creación, selección, transformación, evaluación y comunicación de una enorme cantidad de datos (Kopena *et al.*, 2004).

La información considerada de manera usual en el proceso de diseño, está ampliamente orientada al producto. Ella describe el producto final y, en ocasiones, algunos de los estadios intermedios por los cuales transita. Sin embargo, el proceso a través del cual se logra el diseño final y sus diferentes etapas, se encuentra fundamentalmente implícito en el mismo proceso de diseño. Para capturarlo y representarlo, se han realizado diversas investigaciones que han originado métodos tales como son: el método IBIS, el DRL, el PHI, el QOC, el DHT, el FBS, entre otros (Ferrer *et al.*, 2006; Kaner y Karni, 2007; Ma *et al.*, 2013; Mejía y Molina, 2006; Pérez *et al.*, 2006; Rodríguez, 2006; Vila y Contero, 2006; Wiegeraad, 1999). En la práctica se ha investigado poco en los aspectos relacionados con la captura y descripción de la toma de decisiones en el proceso de diseño (Ullman, 2010). Muchos de los enfoques en esta área prescriben solamente el formato en que la información debe ser capturada, pero no cómo debe procederse a analizarla en detalle y a estructurarla (Chaur, 2004).

En el caso del modelo propuesto para la ayuda en la toma de decisiones en la evaluación conceptual del diseño a partir de la trazabilidad de los requerimientos del usuario, es necesaria una formalización del ciclo básico de la toma de decisiones.

2.5.1. Método Kano para el análisis de requerimientos

El método Kano, (Kano *et al.*, 1984), desarrollado hacia fines de la década de 1970 por el académico japonés de la universidad de Tokio Noriaki Kano, se utiliza generalmente para estudios de benchmarking y marketing (Berger *et al.*, 1993; Ullman, 2010; Zhu *et al.*, 2010). Este método mide la relación entre la funcionalidad de los productos especificada en un sentido amplio, y la satisfacción que esta funcionalidad le brinda a los usuarios (Zultner y Mazur, 2006). Según León (2005), la funcionalidad es una medida del grado en que un producto

cumple con sus propósitos utilitarios en una cierta dimensión. Pugna *et al.* (2009), y Zultner y Mazur (2006), comentan que el método de Kano establece para cada requerimiento del usuario, la relación entre satisfacción y funcionalidad, lo cual permite discriminar y clasificar los requerimientos.

Kano utilizó dos dimensiones para evaluar la calidad: (1) el grado de rendimiento de un producto y (2) el grado de satisfacción del usuario que lo utiliza. Aplicaba así el concepto de calidad utilizado hasta entonces, que juzgaba a la calidad de los productos sobre una sola escala: de “bueno” a “malo”. Trabajando sobre un plano cartesiano de funcionalidad-satisfacción, Kano definió tres tipos de calidad: calidad obligatoria, calidad unidimensional (o de rendimiento) y calidad atractiva. Partiendo del supuesto de que existe la posibilidad de tornar en visibles las características invisibles de la calidad de un producto, entonces, cuando esto sucediera, emergerían, por lo general, un conjunto amplio de requerimientos (León, 2005).

La figura 2.4 ayuda a comprender esta agrupación. En la misma, se identifican tres tipos ideales de atributos en función de la relación entre funcionalidad y satisfacción. Según comentan León (2005), Yacuzzi y Martín (2002) y Sauerwein *et al.* (1996), en su método, Kano distingue tres tipos de requerimientos del producto que, al estar presentes, influyen en la satisfacción del usuario de diferentes formas; estos son:

- Requerimientos obligatorios: son aquellos que aumentan la satisfacción en relación directa con la funcionalidad; pero, superado cierto umbral, dejan de producir un incremento importante en la satisfacción de las necesidades. Si estos requerimientos no se cumplen, entonces el usuario estará sumamente disconforme.
- Requerimientos unidimensionales: se caracterizan porque la satisfacción que producen aumenta de modo aproximadamente proporcional al nivel de funcionalidad y satisfacción de las necesidades. Los requerimientos unidimensionales están explícitamente demandados por el usuario.
- Requerimientos atractivos: son aquellos que por debajo de cierto umbral de funcionalidad, mantienen un nivel de satisfacción relativamente bajo y constante; pero, una vez superado ese umbral, producen un aumento significativo de la satisfacción de las necesidades.

En la figura 2.4 el eje vertical representa el grado de satisfacción de los usuarios. En el punto superior, los usuarios están muy satisfechos; en el punto inferior, están muy insatisfechos o incluso disgustados; en el centro, donde los dos ejes se cruzan, los consumidores están indiferentes o son neutrales. El eje horizontal representa el grado en el cual se satisface la calidad; hacia la izquierda, se muestra que las necesidades de los consumidores no han sido satisfechas (o está ausente); a la derecha las necesidades de los consumidores están totalmente satisfechas o completamente implementadas (Papadam, 2005).

El método Kano permite extraer aquellas necesidades que resultan posibles de determinar a partir de un análisis directo o que no son mencionadas. Esta herramienta posibilita clasificar las demandas de los usuarios de acuerdo al grado de relevancia en su satisfacción. Se aplica a través de un cuestionario donde, para cada requerimiento en

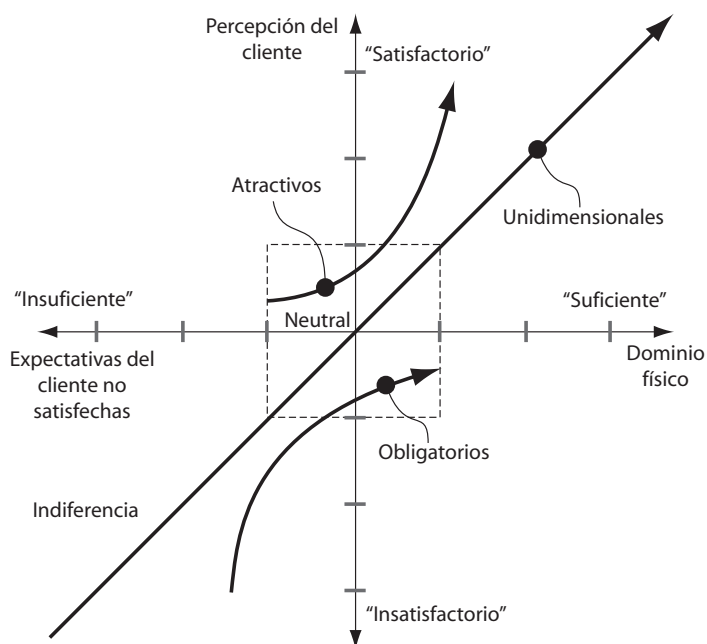


Figura 2.4. Representación gráfica del método Kano (adaptado de (Zultner y Mazur, 2006)).

análisis, se evalúa la opinión de los usuarios en el caso de que esté presente y no esté presente el requerimiento para determinar el grado de satisfacción o insatisfacción que genera el atributo. Con las respuestas es posible determinar la ubicación relativa de cada requisito dentro de la gráfica de calidad (Viñas *et al.*, 2006).

La determinación de los requerimientos del usuario en el método Kano consta de cuatro pasos: (a) identificación de los requerimientos del producto, (b) construcción del cuestionario Kano, (c) administración de la entrevista al usuario, y (d) evaluación e interpretación (Figura 2.5). En relación con el criterio de selección de los usuarios a entrevistar y el tamaño de la muestra, autores como Griffin y Hauser (1993) plantean que la entrevista de 20 a 30 usuarios, pertenecientes a un segmento social homogéneo, permite determinar alrededor de un 90 a un 95 % de todos los posibles requerimientos de usuarios.

Un análisis más detallado del estado del arte relativo al uso del método Kano aparece en los trabajos de Rashid (2010), Rashid *et al.* (2010), Rashid *et al.* (2011), quienes destacan su utilización en el análisis de requerimientos del usuario para el diseño de productos. El referido método es ejemplificado a través de los trabajos de autores como Lee *et al.* (2008), que lo vincula al análisis del ciclo de vida del producto; Chen y Chuang (2008), que lo integra al diseño robusto de Suh (2001); Chen *et al.* (2010), que lo relaciona con el método TRIZ; Yuan y Guan (2199) lo vinculan con el AHP; y otros autores, como Raharjo (2199); Raharjo *et al.* (2010) y Chaudha *et al.* (2011), lo asocian con los estudios de QFD aplicados al diseño de productos. En ninguno de los casos mencionados se evidencia el uso del método Kano en la estructuración y análisis de la trazabilidad de los requerimientos en la etapa conceptual de diseños en ingeniería.

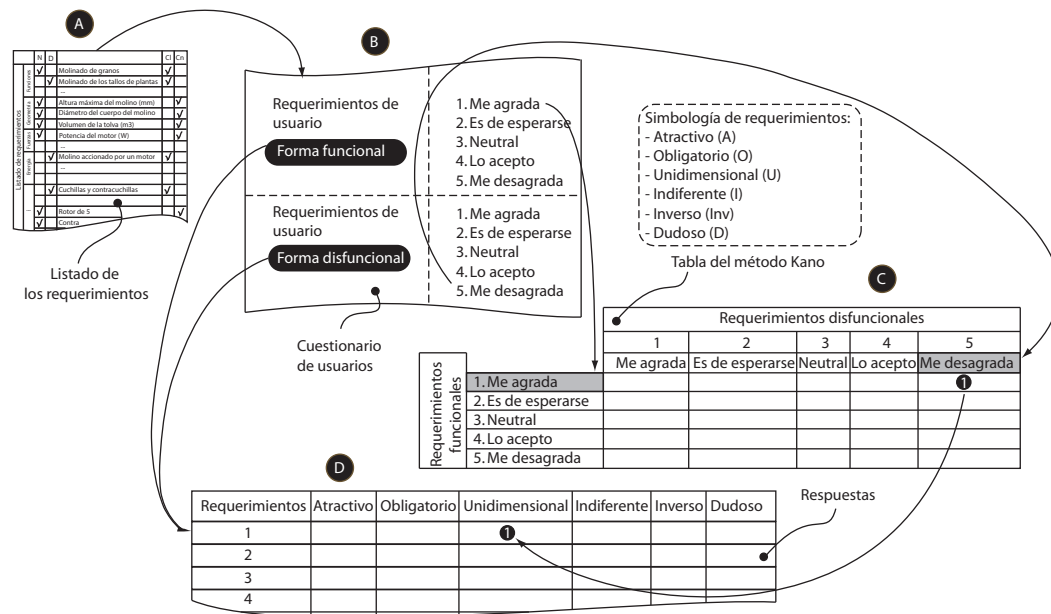


Figura 2.5. Determinación de requerimientos por el método Kano.

2.5.2. Modelación para la representación matemática de la trazabilidad de los requerimientos funcionales

En una teoría de diseño se hace necesaria la existencia de un lenguaje para definir el proceso de diseño. El desarrollo del mismo comienza por encontrar una definición estricta y una robusta representación de los términos y definiciones presentes en dicho proceso, sin ir a los detalles específicos de cada etapa. Además, debido a que el diseño es un proceso dinámico desde lo conceptual hasta lo específico, sus soluciones evolucionan y cambian en el tiempo. Los esquemas de representación deben ser capaces de soportar los cambios que se producen continuamente (Rihtarsic *et al.*, 2012; Zeng y Gu, 1999).

Muchos de los trabajos existentes se han centrado en los modelos de los datos del producto para soportar el desarrollo de sistemas de información de productos y de los sistemas CAD (He y Feng, 2013; Li *et al.*, 2012; Rihtarsic *et al.*, 2012; Zeng y Gu, 1999). Sin embargo un problema emerge: ¿cómo desarrollar una forma para realizar el proceso de trazabilidad de los requerimientos funcionales del producto desde su definición hasta la evaluación de conceptos?

Las especificaciones de diseño constituyen la formulación de los requerimientos funcionales, definidas estas como un conjunto de descripciones o desempeños deseados del producto. Si denotamos por E^T las especificaciones técnicas del producto y por D^P el desempeño del producto, entonces un determinado producto (P) puede expresarse como lo indica la ecuación (2.1):

$$P = E^T \cup D^P \quad (2.1)$$

Y las especificaciones de diseño o requerimientos funcionales (R^F) como lo indica la ecuación (2.2);

$$R^F = \delta(P, [P]) \quad (2.2)$$

dónde: P es el producto y [P] representa las restricciones del mismo. Las soluciones de diseño se representan a través de S^D y son descritas usualmente por los conceptos, configuraciones o dibujos de un producto, en función de la etapa del proceso de diseño.

Independientemente de las diferentes etapas del proceso de diseño, según diversas escuelas o teorías, el proceso de solución tiene características básicas. Cada etapa del proceso concluye con dos actividades clásicas, la síntesis y la evaluación (Figura 1.2 del Capítulo 1). En este proceso, la síntesis permite la generación de un conjunto de soluciones de diseño basadas en los requerimientos funcionales. Este proceso de transformación de la síntesis, denotado por T^S es posible definirlo según las ecuaciones (2.3) o (2.4):

$$T^S : R^F \rightarrow S^D \quad (2.3)$$

$$S^D = T^S(R^F) \quad (2.4)$$

El proceso de transformación según (2.3), se soporta en un conocimiento abstracto y en muchos casos plausible. Las soluciones de diseño, por su parte, no siempre se determinan de una manera invariable debido a la naturaleza de la información. Por tanto, el proceso de evaluación se utiliza para evaluar las soluciones de diseño candidatas *versus* los requerimientos de diseño. Si denotamos este proceso de transformación de la evaluación como (T^E), se puede llegar a la ecuación (2.5) o (2.6).

$$T^E : S^D \rightarrow P \quad (2.5)$$

$$P = T^E(S^D) \quad (2.6)$$

Desde el punto de vista lógico, se puede describir si las soluciones de diseño de un producto satisfacen los requerimientos funcionales prescritos. Para ello, se le asigna un valor, con un comportamiento booleano cuando se puede evaluar el requerimiento funcional, al predicado de la ecuación (2.2), según se expresa en (2.7).

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{cuando los } R^F \text{ se satisfacen,} \\ 0 & \text{cuando los } R^F \text{ no se satisfacen,} \\ -1 & \text{cuando los } R^F \text{ no se pueden evaluar.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Los valores de 1 y 0 representan el tipo de dato booleano verdadero o falso, respectivamente; el -1 es un dato indeterminado que corresponde a un requerimiento funcional que no puede ser evaluado. El objetivo del proceso de diseño es generar las soluciones de diseño de forma tal que se cumpla la ecuación (2.8).

$$R^F = (\delta(P, [P])) = 1 \quad (2.8)$$

Esta ecuación transforma la resolución del proceso de diseño en un proceso de búsqueda de soluciones donde los predicados de todos los requerimientos funcionales sean 1. A partir del hecho de que un producto determinado está predefinido de cierta forma para un problema de diseño, el verdadero valor del predicado de la ecuación (2.8) depende solamente de P . Por tanto:

$$\delta^*(P) = \delta(P, [P]), \text{ cuando } \delta(P, [P]) = 1 \quad (2.9)$$

$$R^F = \delta^*(P) = \delta^*(T^E(S^D)) \quad (2.10)$$

Los dos procesos analizados pueden ser vistos como dos operadores, los operadores de síntesis y los de evaluación que actúan en el espacio de soluciones de los problemas de diseño. El operador de síntesis trata de expandir el espacio de búsqueda, mientras que el operador de evaluación trata de contraer dicho espacio. La interacción de ambos operadores se muestra en la figura 2.6.

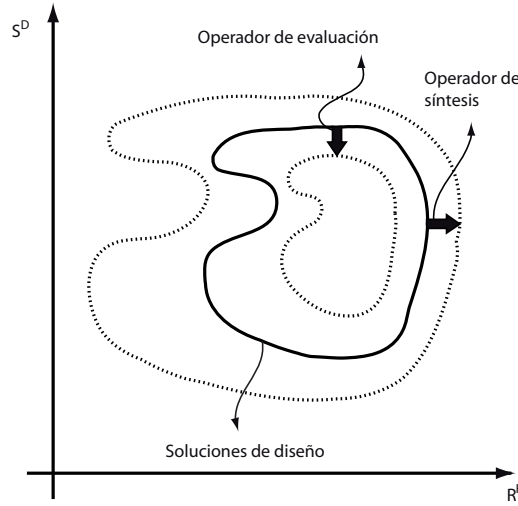


Figura 2.6. Espacio de búsqueda de soluciones (adaptado de (Zeng y Gu, 1999))

Sustituyendo, entonces, la ecuación (2.10) en la (2.3), se obtiene:

$$S^D = T^S(\delta^*(T^E(S^D))) \quad (2.11)$$

$$S^D = T^S \cdot \delta^* \cdot T^E \cdot (S^D) \quad (2.12)$$

Estas ecuaciones recursivas (2.11) y (2.12) expresan el proceso de diseño. Las soluciones de diseño tentativas se generan primeramente utilizando el conocimiento relativo a la síntesis de soluciones, las cuales se emplean para la búsqueda de otras soluciones. Este proceso se repite hasta que se satisfagan todos los requerimientos funcionales.

2.5.3. Métodos para la evaluación conceptual de soluciones

La elección del concepto más adecuado es vital para encaminar el proceso de lanzamiento del producto. Dicha elección es una de las cuestiones más críticas y difíciles que tiene que tomar el diseñador. Una elección inadecuada del concepto raramente puede ser compensada en posteriores fases del proceso e incrementa, a su vez, el costo pues obliga a un rediseño. En la actualidad existen diferentes métodos de selección y evaluación de conceptos que permiten reducir el riesgo de fracaso del proceso (Pahl *et al.*, 2007; Pugh, 1991).

Los métodos más utilizados en la selección de conceptos son: (1) Analytic Hierarachy Process (AHP), (2) Fuzzy Method, (3) Método de Pahl y Beitz, (4) QFD, (5) Decision Matrix y (6) Método de Pugh. Los mismos están estructurados a partir de un grupo de pasos comunes, entre los cuales se destacan el listar los conceptos a evaluar, elegir los criterios de selección, valorar el grado de cumplimiento de cada concepto respecto a cada criterio de selección y, finalmente, determinar, mediante un algoritmo de selección, el concepto que satisface, en mayor medida, los requerimientos del usuario.

El Analytic Hierarchy Process (AHP) fue desarrollado en la década de 1970. Es un método para la toma de decisiones que ayuda a establecer las prioridades en la elección de criterios, cuando en estos confluyen aspectos cualitativos y cuantitativos que deben ser considerados en la decisión. El mismo se caracteriza por utilizar, tanto para la priorización de criterios como para la determinación de la relación criterios contra conceptos, una comparación punto a punto. En el caso de los criterios, se comparan uno a uno; y en el caso de la relación entre criterios y conceptos, se analiza qué concepto cumple mejor con cada criterio. Los resultados proveen una justificación clara y razonada sobre el criterio seleccionado (Haas y Meixner, 2011; Justel *et al.*, 2007; Saaty, 2008).

El Fuzzy Method es una herramienta que se aplica en campos como el control de sistemas, el tratamiento de señales, los sistemas de información inteligente, etcétera. Para aplicar esta metodología, inicialmente se introducen valoraciones cualitativas, es decir, valoraciones imprecisas o ambiguas, que posteriormente se traducen en valoraciones cuantitativas o numéricas. En este método se valora el grado de importancia o peso de cada criterio, utilizando las categorías que corresponden a las valoraciones cualitativas de las funciones de pertenencia. A dichas valoraciones se les conoce como números de Fuzzy. En cuanto a la interrelación de criterios y conceptos, la valoración se realiza por medio de las categorías y de las valoraciones cualitativas de las funciones de pertenencia en función de su grado de cumplimiento (Justel *et al.*, 2007; Otto, 2009).

El método de Pahl y Beitz establece que los criterios de evaluación deben ser unidades de medida y define objetivos para cada una de ellas. De esta forma resulta más sencillo valorar el grado de cumplimiento de la relación entre criterio y concepto. La selección se realiza a partir de una suma ponderada (Pahl *et al.*, 2007).

El QFD es un procedimiento sistemático para asegurar la calidad a través de cada fase de desarrollo del producto, desde el diseño hasta la producción. El QFD se concentra en maximizar la satisfacción del usuario (calidad

positiva) y eliminar la insatisfacción (calidad negativa), brindando un valor positivo a través de la búsqueda e identificación tanto de las necesidades explícitas como de las implícitas, y de su traducción en acciones y diseños que serán comunicados a través de cada área dentro de la cadena de valor hasta llegar al usuario final (Bolt y Mazur, 1999; Ferrer, 2007).

Una matriz de decisión (Decision Matrix) resulta, básicamente, un grupo de columnas, donde una presenta una lista de alternativas para ser evaluadas a partir de una lista de criterios, presentes en otra columna, a los cuáles se les asigna un peso que depende de su importancia en la decisión final (Mullur *et al.*, 2003; Tague, 2005).

El Método de Pugh permite la selección de conceptos, en los cuales, a partir de una matriz, se correlacionan los criterios de evaluación y las alternativas de soluciones. Usualmente, las opciones de evaluación son establecidas a partir de un criterio de referencia, donde se asigna un símbolo para “mejor que”, otro para “neutral” y otro para “peor que” en relación con el criterio de referencia. Estos símbolos, en la matriz, se combinan y definen una puntuación para cada opción evaluada (Frey *et al.*, 2007; Pugh, 1991).

2.6. Conclusiones del capítulo

En todos los modelos de diseño prescriptivos estudiados existe una división del proceso en fases o etapas, que evoluciona de lo abstracto a lo concreto y proporciona una estrategia de resolución aplicable a cada fase. Este tipo de análisis permite una mejor comprensión del proceso de deiseño y facilita la identificación de las similitudes y diferencias entre los diferentes enfoques sistemáticos de referencia. El estudio realizado a estos, permitió fundamentar la propuesta de método sistemático para la evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales, identificando las limitaciones que se expresan en las siguientes conclusiones:

- Se determinó, al caracterizar el proceso sistemático de diseño de productos mecánicos, que las metodologías sistemáticas, si bien establecen el conjunto de pasos a seguir con una serie de recomendaciones, carecen de una estructuración en las relaciones entre cada una de las sub-etapas que las conforman.
- No existe, en los modelos prescriptivos, una estructuración de la información que permita su transferencia entre las etapas de diseño conceptual y básico, a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales.
- Se determinó que, en los modelos prescriptivos analizados, las interacciones que se producen en la etapa de diseño conceptual no están debidamente estructuradas ni formalizadas. De esa manera no se favorece una mejor utilización de la información contenida en los requerimientos funcionales, orientado a la síntesis de soluciones y a la evaluación conceptual de las variantes de solución.
- Se identificó, en el orden teórico, la necesidad de desarrollar métodos sistemáticos que permitan, en la etapa de diseño conceptual, en primer lugar, articular las conexiones o relaciones entre las distintas sub-etapas y luego, establecer formas que posibiliten la evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Así, se favorecería la toma de decisiones, sobre todo, en la síntesis de soluciones y en el proceso de evaluación conceptual.

3. CONCEPCIÓN DEL MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE CONCEPTOS A PARTIR DE LA TRAZABILIDAD DE LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

3. CONCEPCIÓN DEL MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE CONCEPTOS A PARTIR DE LA TRAZABILIDAD DE LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

El presente capítulo expone un método sistemático que permite la evaluación de conceptos en el diseño mecánico de productos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Se realiza una descripción de los aspectos teóricos esenciales o necesarios para su desarrollo y de los métodos de soporte sugeridos a la metodología sistemática de Pahl y Beitz.

3.1. Base teórica para el desarrollo del método propuesto

Como se describió en el capítulo anterior, el diseñador en las etapas primarias del proceso de diseño de productos, debe tomar una serie de decisiones en medio de un contexto de conocimientos imprecisos. En la revisión bibliográfica realizada para esta investigación se evidenció el insuficiente desarrollo de métodos y herramientas que le permitan al diseñador disponer de ayuda en la toma de decisiones, basadas en la trazabilidad de los requerimientos funcionales, durante la etapa conceptual.

La etapa de diseño conceptual tiene por objetivo el desarrollo de diversas definiciones que satisfagan los requerimientos del usuario. Los mismos serán evaluados según distintos criterios hasta la selección del concepto de solución más adecuado, de acuerdo al producto en cuestión. En caso de que la evaluación no cumpla con las expectativas del usuario, se retorna a la fase inicial del proceso para desarrollar y evaluar otras variantes de solución.

El proceso de diseño proporciona una transformación de las especificaciones de diseño en descripciones del producto. En este sentido, autores como Zeng y Gu (1999) plantean que una teoría de diseño deberá incluir al menos tres elementos básicos: (1) una estructura general para describir y formular el problema de diseño, (2) un lenguaje para definir el proceso de diseño, y (3) una teoría que soporte los procesos de formulación y de diseño. El método sistemático propuesto en esta investigación tiene por objetivo ser una herramienta de ayuda para la toma de decisiones, durante la evaluación conceptual de variantes, en la etapa conceptual del diseño de productos. Deben tenerse en cuenta las cualidades de los requerimientos funcionales a través de su trazabilidad. El método sistemático está formado por los siguientes elementos o componentes estructurales:

- Un enfoque metodológico para el tratamiento del diseño conceptual que fundamenta la propuesta de un nuevo método sistemático en el diseño conceptual, la cual permite articular el proceso de trazabilidad desde los requerimientos del usuario hasta la evaluación de los conceptos.

- Un método para garantizar la trazabilidad de los requerimientos tiene por objetivo la captura, estructuración, estratificación y encapsulación de los requerimientos en la estructura funcional. Permite un estudio más exhaustivo y le facilita al modelo la trazabilidad de los requerimientos del usuario.
- Un método para garantizar la síntesis guiada de soluciones. Su objetivo es conceptualizar la transformación de la información desde el nivel funcional hasta el nivel de las soluciones conceptuales.

En el siguiente acápite se muestran los fundamentos que conforman el modelo propuesto de ayuda para la toma de decisiones en la etapa conceptual a partir de la evaluación conceptual de variantes, teniendo en cuenta las cualidades de los requerimientos funcionales.

3.2. Estructura del modelo

Como se abordó en el capítulo anterior, esta investigación toma como referencia los modelos prescriptivos y en específico, el modelo de Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007). El mismo sugiere un enfoque sistemático que divide el proceso de diseño en varias etapas, cada una de las cuales posee su propia estructura y pasos específicos. De las etapas que este modelo propone (ver Anexo 2, Figura 2.1), solo se abordarán las de especificación y concepto, por ser las que poseen una relación más directa con la evaluación conceptual. La toma de decisiones en el proceso de diseño conceptual se establece en cuatro jerarquías, en concordancia con las etapas de los modelos prescriptivos. El centro del modelo lo constituyen la generación de funciones y todo el proceso alrededor del desarrollo de alternativas de solución, el proceso de evaluación de las funciones y la selección de variantes de diseño.

El modelo propuesto en esta investigación para la ayuda en la toma de decisiones en la evaluación conceptual del diseño a partir de la trazabilidad de los requerimientos, se representa en la figura 3.1. El mismo parte de la representación del ciclo básico de toma de decisiones durante el proceso de diseño (parte (A) de la Figura 3.1), desarrollado por diversas investigaciones y sintetizado por Wiegeraad (1999).

En un proceso de diseño, normalmente existe una información relativa al producto disponible en diferentes formatos; a partir de ella el diseñador y su equipo proceden a definir un determinado diseño. Según los modelos prescriptivos, el diseñador definirá una estructura funcional en la que tomará en cuenta la necesidad y los requerimientos del usuario. Esta estructura funcional se obtendrá a partir de la información que se disponga y de la creatividad del diseñador. Es la etapa más compleja, pues dependerá de diversas variables de carácter objetivo y subjetivo. Para su análisis predominará la heurística. El desarrollo de bases funcionales constituye una forma viable para disminuir la incertidumbre y garantizar cierta homogeneidad en el proceso.

Los principios de solución constituyen las soluciones generadas por el diseñador a las diferentes funciones definidas y es también una etapa donde prevalece el carácter heurístico. El tipo de información que se manifiesta aquí se encuentra más próxima a las soluciones que la relativa a las funciones, de ahí que la información sea más selectiva.

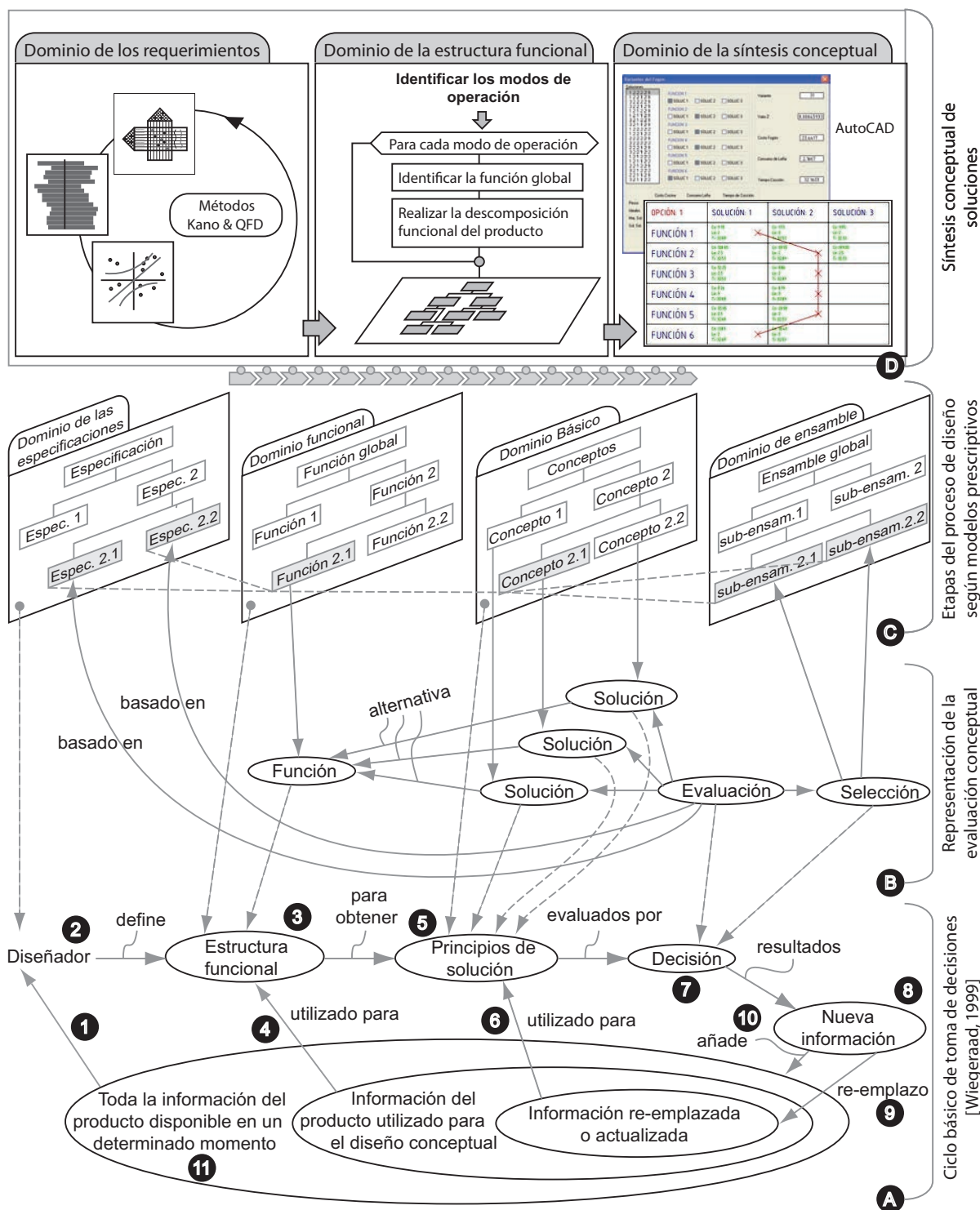


Figura 3.1. Modelo integrado de trazabilidad de los requerimientos cualitativos desde la etapa de especificación hasta la etapa de evaluación conceptual.

El establecimiento de los principios de solución a partir de la estructura funcional, permite dar respuesta a los requerimientos iniciales y enriquecen la información que se tiene del producto. A partir de estos principios, ocurre el proceso de la toma de decisiones respecto a cuál resulta más adecuado, completándose el ciclo. La toma de decisiones constituye la fase que concluye el proceso de transformación de la información de las funciones

a los principios de soluciones. Es aquí donde generalmente se genera un nuevo tipo de información que puede, en ocasiones, reemplazar a la ya existente.

El dominio de los requerimientos del modelo permite la caracterización y captura de los requerimientos del producto, tal y como se enfoca en el modelo prescriptivo de Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007). El proceso de evaluación funcional está estrechamente relacionado con la definición de este dominio, una vez que el proceso de evaluación establece el grado de aproximación de las funciones con respecto a los requerimientos del producto. En la figura 3.1(B), se representan el proceso de evaluación conceptual como vínculo del proceso de toma de decisiones y las etapas de los modelos prescriptivos del proceso de diseño. Esta representación permite fundamentar el proceso de trazabilidad de los requerimientos del producto hasta la evaluación conceptual. Los elementos que intervienen en la representación se expresan a través de elipses. Cada elemento muestra una información que puede ser identificada en un diseño. Las relaciones entre estos elementos se representan a través de líneas con saetas.

Como se observa en la figura 3.1(A), la representación del proceso de evaluación conceptual constituye el nexo entre el ciclo básico de toma de decisiones de Wiegeraad (1999) y los dominios o etapas del proceso de diseño del modelo que se tomó como referencia para la investigación.

La generación de funciones vincula la estructura funcional del ciclo básico con el dominio funcional del modelo prescriptivo, constituyéndose en la base de este. Las alternativas de soluciones a cada función relacionan los principios de solución del ciclo básico con el dominio básico del modelo.

El proceso de evaluación y selección de conceptos, sintetiza la toma de decisiones en el ciclo básico y permite la evaluación de la satisfacción de los requerimientos del usuario por el o los conceptos seleccionados.

En la parte (C) de la figura 3.1, se representan las etapas clásicas del proceso de diseño según los modelos prescriptivos y su relación o vínculo con el proceso de evaluación conceptual (parte (B) de la Figura 3.1) y con el proceso de toma de decisiones (parte (A) de la misma figura).

A cada etapa clásica tomada como referencia (tres etapas), se le asocia un dominio específico, referido al tipo de información que se manifiesta en cada una: (a) dominio de las especificaciones, relacionado con la etapa primaria del proceso de diseño; (b) dominio funcional, relacionado con la estructuración funcional propia de los modelos prescriptivos; y (c) dominio básico, relacionado con la etapa de diseño básico, según el modelo de referencia.

¿Cómo lograr una mejoría en el proceso de transformación de la información del dominio de las especificaciones al funcional, que garantice, a la vez, la trazabilidad de la información relacionada con los requerimientos?

Una de las soluciones adoptadas en esta investigación fue la estratificación de los requerimientos funcionales, utilizando para ello los principios definidos por el método Kano (Kano *et al.*, 1984), aplicado a partir de su estudio y análisis.

En la parte (D) de la figura 3.1, se representa la síntesis conceptual asistida por los sistemas CAD, como etapa

que permite la trazabilidad de los requerimientos funcionales, desde su definición hasta la evaluación conceptual. Esta constituye un aporte al modelo clásico del proceso de diseño de Pahl y Beitz, pues permite una mejor caracterización de los requerimientos del producto y propicia una toma de decisiones más acertada por parte de los diseñadores.

3.2.1. Estadios de la información en el modelo propuesto

En general, en cada etapa del proceso de diseño, se parte de una información inicial que evoluciona o se transforma, para dar lugar a una información final o resultado. La combinación de las diferentes actividades a lo largo de este proceso permitirá alcanzar el diseño final. En esta investigación se definen un conjunto de acepciones propias para los diferentes estadios de la información; en este sentido, se le denomina al proceso de transformación de la información propia del diseño como **estadios conceptuales evolutivos**. Estos expresan los diferentes momentos por los que transita un concepto desde la definición de las especificaciones del producto, donde la información resulta muy primaria con respecto a los conceptos, hasta la definición del concepto de solución que mejor cumpla con las expectativas tenidas al inicio del proceso de diseño.

En las metodologías prescriptivas la información evoluciona de forma secuencial entre las diferentes etapas, las que se relacionan como se representa en la figura 3.2. En el dominio de las especificaciones, se establece la información inicial del proceso de diseño. Si bien aquí existe un nivel avanzado de información relacionada con los requerimientos, en los restantes dominios resulta prácticamente nula, pues a partir del procesamiento de esta información primaria es que comienzan a definirse las propuestas de soluciones. A este primer tipo de información se le denomina **estadio conceptual evolutivo primario**, que es el estado de la información en la etapa conceptual del proceso de diseño relacionado con el producto y descrito fundamentalmente a través de los requerimientos funcionales iniciales.

Este estado está relacionado directamente con el dominio de los requerimientos y es propio de los modelos prescriptivos descritos en el capítulo 1. La información expuesta por este concepto relaciona los requerimientos con la evaluación de las funciones según el modelo propuesto. Es el primer proceso de transformación de la información y se expresa a través de la estratificación de los requerimientos en un dominio que los contiene (Parte (D) de la Figura 3.1).

Una vez que se inicien las etapas definitorias del dominio funcional, la información proveniente del estadio conceptual evolutivo primario será transformada en un tipo de información enriquecida con elementos funcionales de un marcado carácter heurístico, tal y como se analizó con anterioridad.

En este dominio funcional ocurre la transformación de los requerimientos del usuario en funciones relacionadas con el producto. A este segundo tipo de información se le denomina **estadio conceptual evolutivo funcional**, es el estado de la información en la etapa conceptual del proceso de diseño que parte de los requerimientos funcionales establecidos en el dominio de los requerimientos y termina en la definición de la estructura

funcional, definida en el dominio funcional según los modelos prescriptivos descritos en el capítulo 1. En tal contexto existe un proceso de transformación de la información, de un tipo semántico a un tipo funcional, más relacionada con el producto. Es el segundo proceso de transformación de la información en el modelo propuesto. Se expresa a través de la definición funcional vinculada a los requerimientos estratificados en la especificación cualitativa.

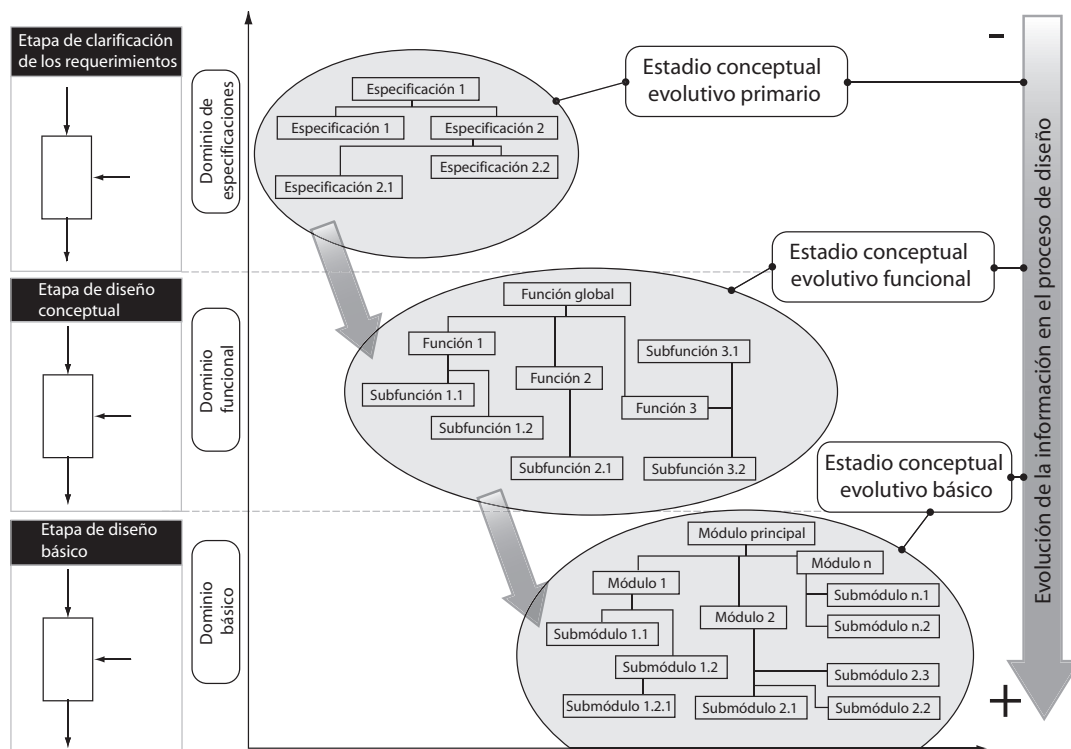


Figura 3.2. Flujo de información en las metodologías prescriptivas.

La determinación de la arquitectura básica del producto se logra a través de la transformación de la información obtenida en el estadio conceptual evolutivo funcional a un nivel superior, a partir del conocimiento previo y de la heurística. A este tercer tipo de información se le denominó **estadio conceptual evolutivo básico**, el cual es el estado de la información en la etapa conceptual del proceso de diseño, que parte de la estructura funcional descrita en la segunda etapa de transformación de la información y termina con la definición de la denominada arquitectura básica del producto, definida en el dominio básico según los modelos prescriptivos descritos en el capítulo 1. En este nivel existe un proceso de transformación de la información, de un tipo funcional con una determinación abstracta, a una básica más relacionada con la definición estructural del producto. Es el tercer proceso de transformación de la información en el modelo propuesto. En este dominio, existe un proceso de generación de alternativas de solución a cada una de las funciones definidas en el dominio funcional.

Una vez que la información del proceso de diseño conceptual está en su tercer estadio, la determinación de las alternativas de conceptos a evaluar queda definida en el modelo, donde la toma de decisiones tiene en cuenta cada una de las diferentes transformaciones por las que la información ha atravesado.

La base del modelo propuesto parte del ciclo de diseño que se representa en la figura 3.1. Al comenzar

un proceso de este tipo, existe una determinada información primaria del producto, expresada a través de requerimientos y documentos disponibles para el diseñador, la cual se relaciona directamente con el dominio de los requerimientos de los modelos prescriptivos a través del estadio conceptual evolutivo primario.

La información definida en este primer estadio permite el comienzo de la estructuración funcional del producto (dominio funcional) y se obtiene un tipo de información funcional mucho más concreta que en el dominio de los requerimientos. Esta se relaciona directamente con el dominio funcional de los modelos prescriptivos a través del estadio conceptual evolutivo funcional.

Los principios de solución se obtienen a partir de la definición de las diferentes funciones relacionadas en el dominio funcional. La información, en este caso, se transforma de una definida en términos de funciones a una de tipo básica o estructural más cercana a la definición física del producto. Dicha información se relaciona directamente con el dominio básico de los modelos prescriptivos a través del estadio conceptual evolutivo básico. Esta etapa establece la base necesaria para la evaluación conceptual de las alternativas del producto.

El modelo propuesto dispone así de tres estadios fundamentales, definidos por los conceptos relacionados con los estadios conceptuales evolutivos.

3.3. Método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional

En la presente investigación se establece el **método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional**, que tiene como objetivo la captura, estructuración, estratificación y encapsulación de los requerimientos funcionales en la estructura funcional. En la figura 3.3 se muestra el algoritmo general, el cual parte de la estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales (1), a través de la aplicación de métodos para calificar los niveles de cualidades. Esta información se representa a través de vectores y matrices, con el objetivo de facilitar su trazabilidad. A continuación se realiza un proceso iterativo donde para cada modo de operación (2), se comienza un proceso de establecimiento de las estructuras funcionales (3).

Para los niveles de la estructura funcional de cada modo de operación, se determinan las funciones globales y las sub-funciones (4) con las que debe cumplir el producto, así como los flujos asociados, según lo analizado en el capítulo 2 respecto a la modelación funcional. Posteriormente, se obtiene la acumulación o captura en cada estructura funcional (5) de los niveles cualitativos establecidos anteriormente para los requerimientos funcionales. De esta forma, se garantiza la transferencia de información, al obtenerse la estructura funcional clásica con una nueva información relativa al proceso de estratificación (6) antes planteado. Una vez que se haya efectuado este proceso cíclico para cada modo de operación, el método proporciona un conjunto de estructuras funcionales (7), que contienen de manera implícita los niveles de calidad de los requerimientos funcionales (8).

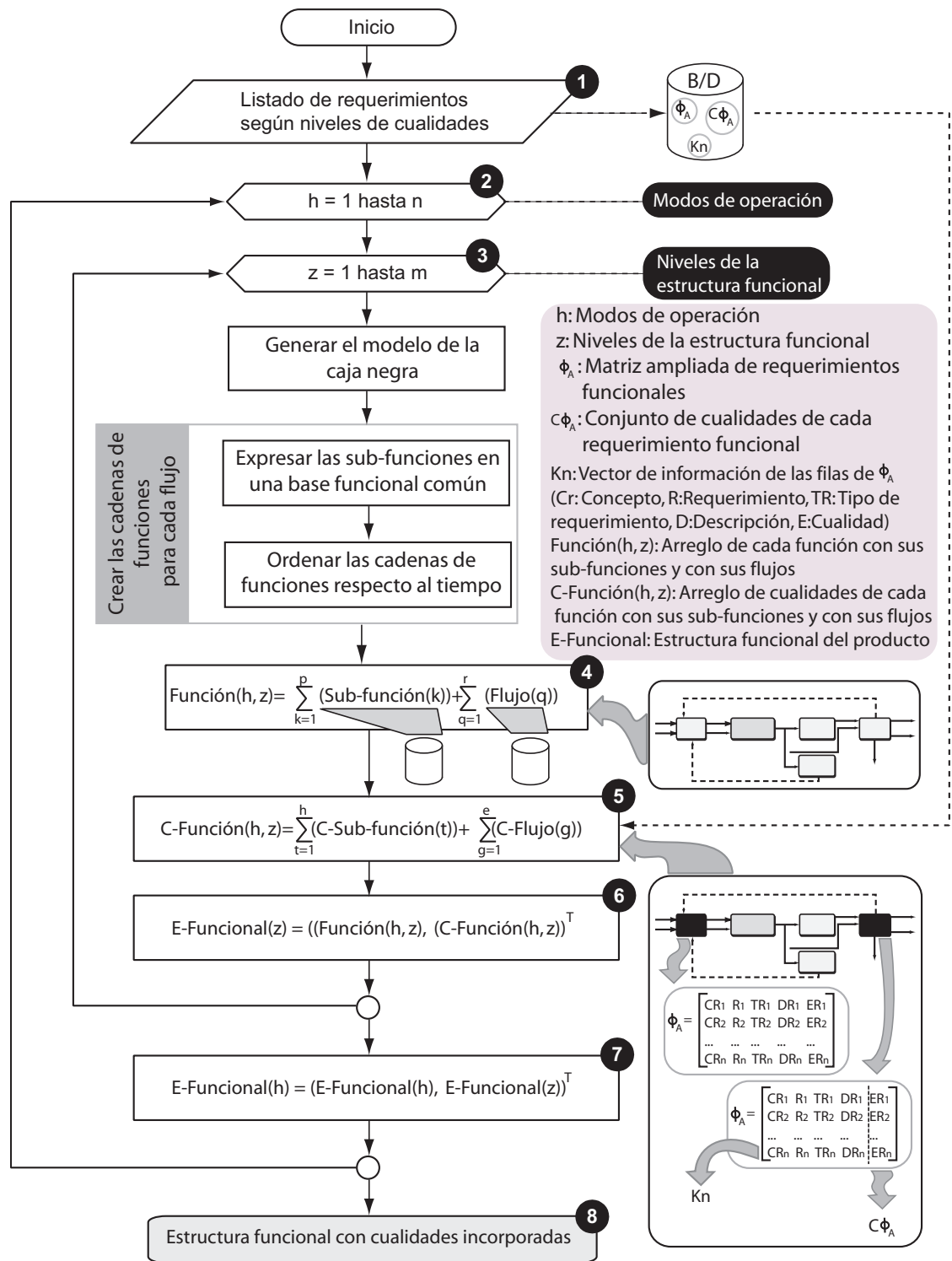


Figura 3.3. Método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional.

Uno de los objetivos de la investigación es establecer un modelo de representación del método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional. La representación algorítmica responde a lo expresado en la ecuación (2.10) y proporciona una guía, paso a paso, para su implementación en los sistemas CAD. El modelo no es más que el proceso de refinamiento del proceso de diseño reflejado en la parte (A) de la figura 1.2 del capítulo 1.

El modelo expresa que, en cualquier dominio del diseño conceptual de un producto, existe un conjunto de niveles de cualidades de los requerimientos funcionales. Acorde con la ecuación (2.5) del capítulo 2, se define un conjunto de cualidades de los requerimientos funcionales según la ecuación (3.1):

$$C_{RF} = (C_{RF}^i | i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.1)$$

Dónde: n es el número de cualidades diferentes de los requerimientos funcionales. Por tanto se asume la existencia de un conjunto de requerimientos funcionales estratificados, según (3.2).

$$(R_E^{FP} = \delta(P, [P]), (R_E^{FP} \subset C_{RF} \quad (3.2)$$

3.3.1. Estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales

Según los enfoques clásicos de los modelos prescriptivos de diseño (ver Anexo 1, Tabla 1.1), existen pocos estudios que aborden la caracterización y representación de la evolución de los requerimientos del producto en los diferentes estadios o etapas del diseño conceptual. A continuación se expone la estructuración de los requerimientos según el modelo propuesto.

Estructuración de los requerimientos funcionales

En la figura 3.4, se observa el tratamiento clásico a los requerimientos. En la misma se muestran dos etapas o transiciones: la clarificación de la tarea y el diseño conceptual. El proceso de refinamiento de los requerimientos funcionales comienza en la etapa de especificación, típica de los modelos prescriptivos analizados y luego transitan a, la etapa de la clarificación de la tarea, donde se comienzan a descartar una serie de requerimientos no válidos o innecesarios.

Como se planteó en el capítulo anterior, en los modelos prescriptivos clásicos se evidencia la falta de un proceso de estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales, con vistas a un mejor análisis en el proceso de toma de decisiones. En esta investigación se propone una alternativa para la evaluación conceptual a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales.

En la figura 3.4, se aprecia la incorporación de un nuevo paso en la metodología prescriptiva de Pahl y Beitz, y se toman como referencia los aportes que, en este sentido, han realizado otros autores (ver acápite 1.5.1).

Uno de los aspectos principales para poder realizar un proceso de trazabilidad de los requerimientos funcionales desde su definición hasta la etapa de evaluación de conceptos, lo constituye su estructuración y estratificación. Con vistas a lograr este objetivo, se propone, al modelo sistemático de Pahl y Beitz, una nueva etapa en la fase de clarificación de la tarea, denominada **especificación cualitativa**, con la que se garantiza, además del refinamiento, una agrupación de los requerimientos en función de la cualidad. Esto constituye un nuevo aporte a la etapa de clarificación de la tarea en relación con otros modelos sistemáticos de diseño.

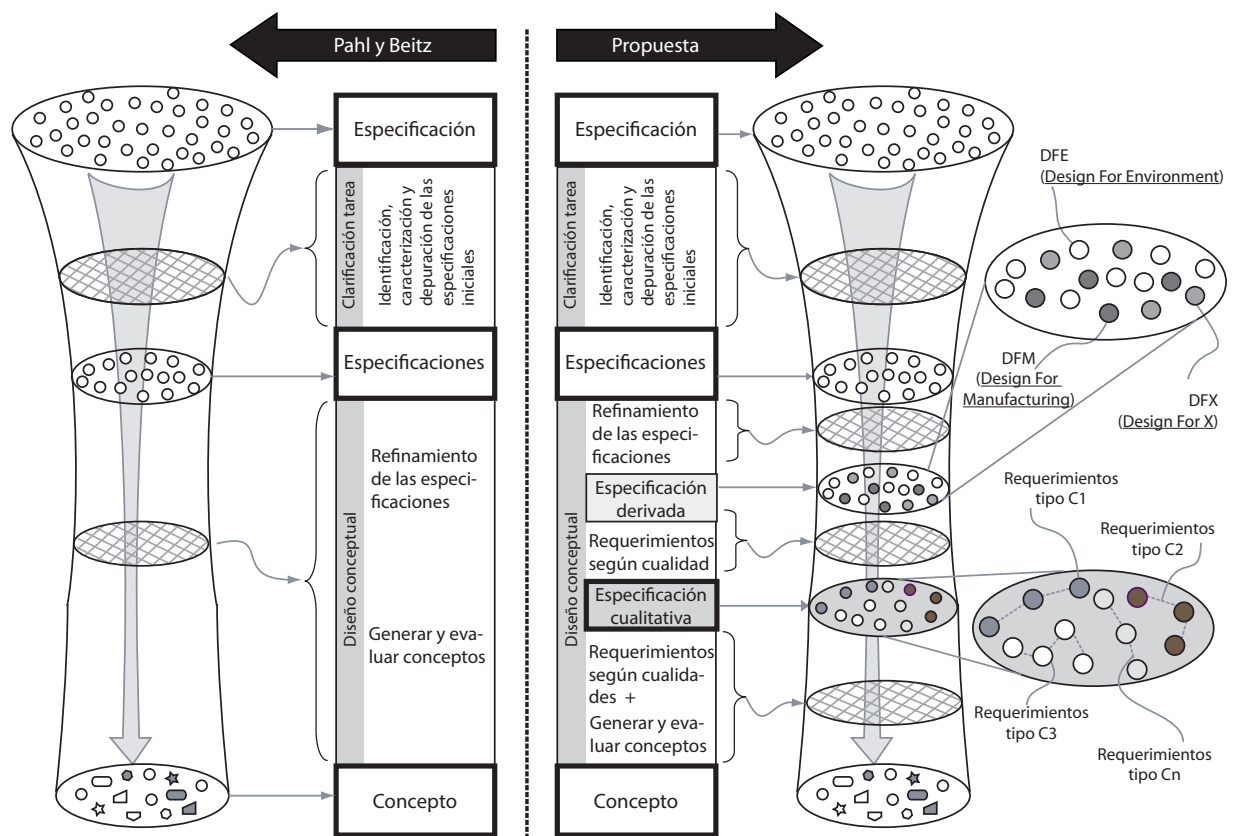


Figura 3.4. Esquema de la especificación en Pahl y Beitz y propuesta de especificación cualitativa de la investigación.

Niveles de estratificación de los requerimientos funcionales

Autores como Ahuett (2006), Crostack *et al.* (2010) y Farias *et al.* (2006) plantean que una de las formas de estratificar los requerimientos funcionales de una manera estructurada, que permita su análisis cualitativo, es utilizando los conceptos y atributos de las cualidades de los requerimientos, expresados por diferentes métodos y la Teoría de Conjuntos. Tomando en consideración lo antes explicado, cabe preguntarse: ¿Cómo definir conceptualmente los niveles o estratos de los requerimientos, que permitan el análisis y la trazabilidad de los mismos hasta la evaluación de los conceptos?

En la figura 3.5, se refleja la conceptualización del proceso de estratificación de los requerimientos funcionales. A partir de un universo de requerimientos funcionales establecidos en la especificación inicial (E_i), en función de la necesidad real identificada (N_r), se establece un proceso de articulación de las cualidades de los requerimientos funcionales. Esta articulación se logra a partir de un proceso de estratificación por niveles de cualidades, expresado desde un nivel (C_1) hasta un nivel (C_n), lo cual está determinado por el tipo de método de estratificación que se utilice.

Este proceso tiene como elemento característico el poder articular los requerimientos funcionales por grupos a partir de los diferentes estratos por los que van siendo filtrados. Tomando como referencia la teoría de conjuntos, se pueden establecer en el orden teórico diferentes estados de representación donde se analice el problema inicial

de diseño y en qué medida el diseñador cumple, a través de los requerimientos, con las exigencias iniciales. Si se relacionan estos dos momentos del proceso de diseño de manera conceptual (especificación inicial *versus* especificación real), se pueden identificar tres estados de representación.

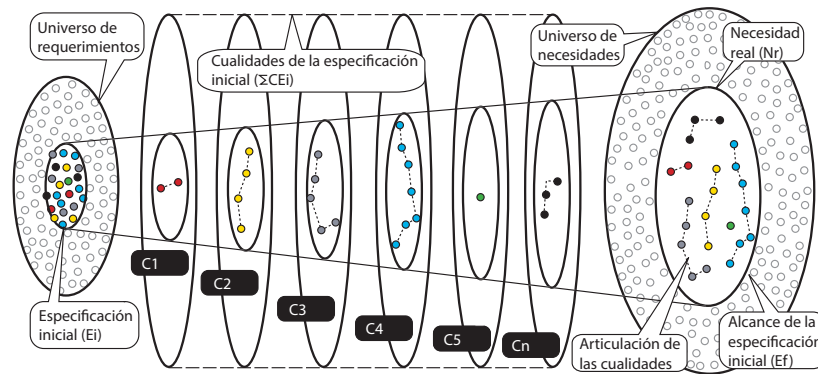


Figura 3.5. Conceptualización de la estratificación de los requerimientos funcionales.

El primero se denomina **especificación suficiente articulada** (Figura 3.6). En este caso la especificación inicial satisface la necesidad identificada de manera total. Constituye el estado ideal para el modelo propuesto.

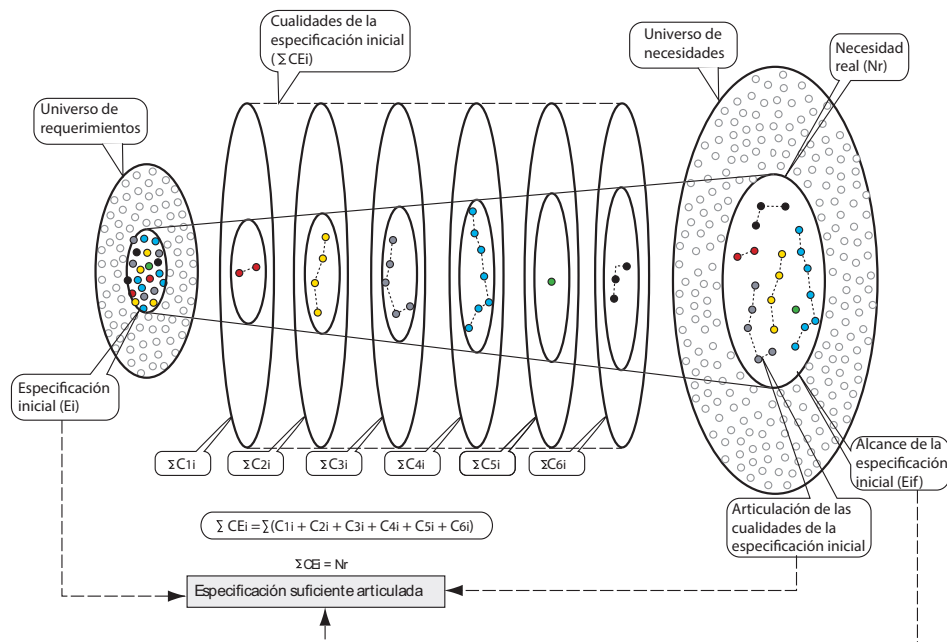


Figura 3.6. Estado de la especificación suficiente articulada para los requerimientos.

Como se observa en la figura, las cualidades de la especificación inicial permiten la articulación del alcance de los requerimientos, lográndose una mejor estructuración y estratificación de dicha especificación, gracias a la aplicación de los conceptos definidos en ella. La definición de estos tres tipos de estados fundamenta conceptualmente el establecimiento de un análisis cualitativo de los requerimientos funcionales, orientado a facilitar la evaluación de conceptos. Esto a la vez facilita la ayuda en la toma de decisiones en esta etapa primaria del proceso de diseño.

El segundo se denomina **especificación insuficiente articulada** (Figura 3.7), donde la especificación inicial no satisface, de manera total, a la necesidad identificada. Para este estado existirán especificaciones que, aunque estén articuladas, se encontrarán fuera del alcance de la inicial. La articulación permite reconocer la tipología de requerimientos a la que pertenecen aquellas especificaciones fuera del alcance deseado.

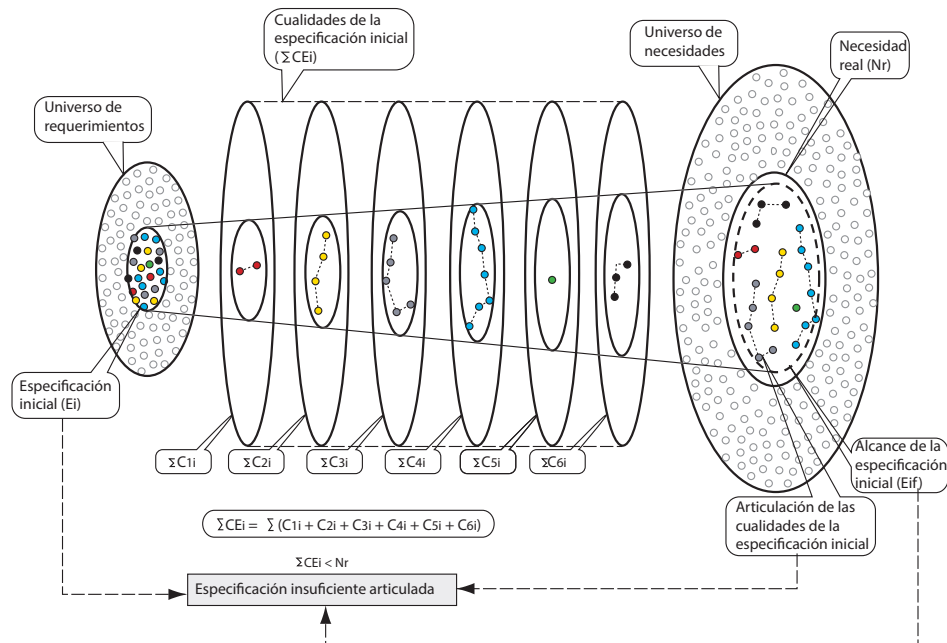


Figura 3.7. Estado de especificación insuficiente articulada para los requerimientos.

Al tercer estado se le denominó **hiper-especificación articulada** (Figura 3.8) y es aquel en que la especificación inicial excede a la satisfacción de la necesidad identificada. Como en los demás estados, las cualidades de la especificación inicial permiten la articulación del alcance de sus requerimientos, lográndose una mejor estructuración y estratificación de su estudio.

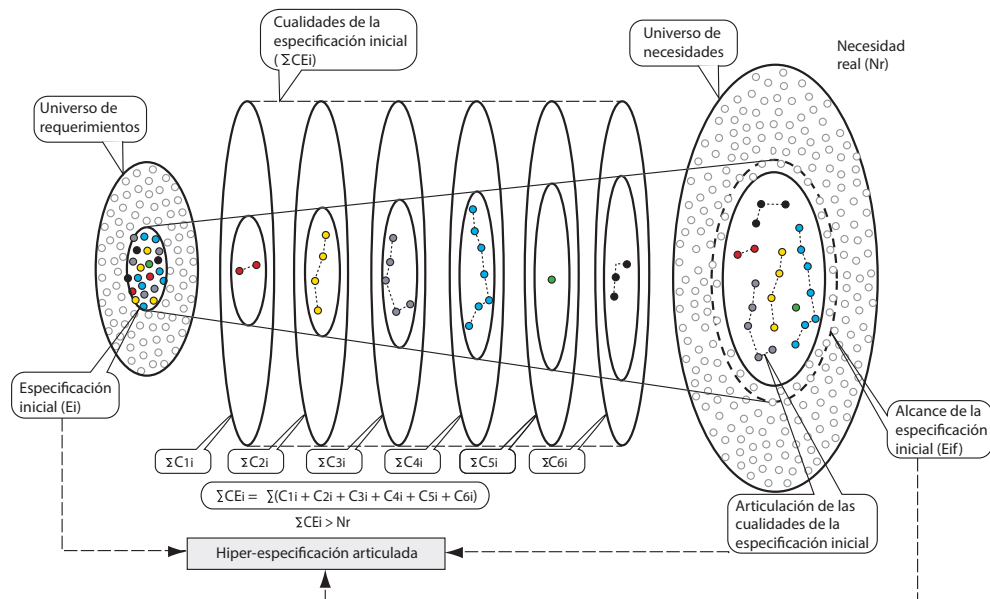


Figura 3.8. Estado de la hiper-especificación articulada para los requerimientos.

A continuación, a partir del método Kano, se ejemplifica el método de estratificación propuesto. Para explicarlo, se parte del análisis de la figura 3.5, en el sentido de izquierda a derecha del gráfico indicado. Los estratos de los requerimientos, denominados desde (C_1) hasta (C_n) , identifican los posibles tipos de clasificación en que pueden orientarse los requerimientos en función de la herramienta de análisis que se utilice.

Al tomar como referencia para el estudio de los requerimientos funcionales el método Kano, el primer estrato corresponde a los requerimientos indiferentes (C_1) ; el segundo, a los atractivos (C_2) ; el tercero, a los unidimensionales (C_3) ; el cuarto, a los obligatorios (C_4) ; el quinto, a los inversos (C_5) y el sexto, a los dudosos (C_6) . La especificación inicial (C_{Ei}) será entonces la sumatoria de cada uno de los requerimientos contenidos en los estratos de la ecuación (3.3).

$$C_{Ei} = \sum C_{E1i} + \sum C_{E2i} + \sum C_{E3i} + \sum C_{E4i} + \sum C_{E5i} + \sum C_{E6i} \quad (3.3)$$

En la figura 3.6, se muestra el primero de los estados, que es denominado especificación suficiente articulada, se muestra aplicado con los conceptos del método Kano. La figura 3.7 evidencia el segundo de estos estados, denominado especificación insuficiente articulada. En este caso, la especificación inicial no satisface la necesidad del mercado o del usuario de manera total. En la figura 3.8, se indica el tercero de los estados antes mencionados, denominado hiper-especificación articulada. La especificación inicial, en este caso, excede a la satisfacción de la necesidad del mercado o del usuario.

Conceptualización de la estratificación de los requerimientos funcionales

En la presente investigación se definen una serie de pasos que permite la **conceptualización de la estratificación de los requerimientos funcionales**; los mismos se enumeran seguidamente y consisten en:

1. A partir de la especificación inicial del universo de requerimientos, se establece un conjunto de requerimientos funcionales iniciales del producto (R_I^{FP}) .
2. Estos (R_I^{FP}) son evaluados respecto al conjunto de cualidades de especificación inicial (C_{EI}) , de manera que cada requerimiento funcional estratificado del producto se relacione con las cualidades pertinentes, obteniéndose el conjunto de $R_E^{FP}(C^{RFE})$.

$$C_{EI} = \{C_{EI}^i | i = 1, 2, \dots, n\}$$

$$R_{Ei}^{FP} = \{R_{Ei}^{FP} \cup C_{EI}^i | i = 1, 2, \dots, n\}$$

$$C^{RFE} = \{\sum_1^i R_{Ei}^{FP} | i = 1, 2, \dots, n\}$$
3. Una vez concluido el paso anterior, se realiza una evaluación de los R_E^{FP} versus el alcance de la especificación inicial (A_E) , para determinar el estado de la especificación.

Esta comprobación establece tres estados de la especificación:

- a) Especificación suficiente articulada. Ocurre cuando existe correspondencia entre los R_E^{FP} y el alcance de la especificación inicial A_E

$$R_{Ei}^{FP} = A_E(R_i^F | i = 1, 2, \dots, n)$$

- b) Especificación insuficiente articulada. Ocurre cuando no existe correspondencia entre los R_E^{FP} y el alcance de la especificación inicial A_E , siendo A_E menor que los R_E^{FP}
- $$R_{Ei}^{FP} > A_E(R_i^F | i = 1, 2, \dots, n)$$
- c) Hiper-especificación articulada. Ocurre cuando no existe correspondencia entre los R_E^{FP} y el alcance de la especificación inicial A_E , siendo A_E mayor que los R_E^{FP}
- $$R_{Ei}^{FP} < A_E(R_i^F | i = 1, 2, \dots, n)$$
4. Una vez que se obtiene una especificación suficiente articulada, se tiene una especificación acorde con la estratificación del producto (E_P).
- $$E_P = A_E(R_i^F | i = 1, 2, \dots, n)$$

Simbólicamente, el proceso anterior puede definirse como:

$$\forall R_i^{FP}, \exists T^S (T^S : R^F \rightarrow E^T) \quad (3.4)$$

$$\forall R_i^{FP}, \exists R_{Ei}^{FP} \{ R_{Ei}^{FP} \cup C_{EI}^i | C_{EI}^i = C_{EI}^i | i = 1, 2, \dots, n \}, i = 1, 2, \dots, n \} \quad (3.5)$$

$\forall C^{RFE}, \exists (Si R_i^F = A_E(R_i^F | i = 1, 2, \dots, n))$ es una especificación suficientemente articulada;

$(Si R_i^F > A_E(R_i^F | i = 1, 2, \dots, n))$ es una especificación insuficientemente articulada;

$(Si R_i^F < A_E(R_i^F | i = 1, 2, \dots, n))$ es una hiper-especificación articulada. (3.6)

$$E_P = A_E(R_i^F | i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.7)$$

En el análisis simbólico anterior resalta que el tratamiento relacionado con la determinación de la especificación suficiente de un producto, depende de la experiencia y el conocimiento de los diseñadores. La representación matemática propuesta se ajusta al modelo sistemático del proceso de diseño. Se corresponde, además, con los diferentes niveles de complejidad y abstracción de la descripción del producto en la definición de la síntesis del conocimiento de las ecuaciones (2.3) y (2.4).

Una vez definida la estructuración y estratificación de los requerimientos, se hace necesario, en primer lugar, representarlos de manera adecuada para su posterior trazabilidad. A continuación, se expone una propuesta de las vías para capturar los requerimientos funcionales.

Captura y representación de los requerimientos funcionales

Al establecer la especificación para la definición del producto, conviene disponer de una lista de referencia de especificaciones que permita recorrer de forma metódica distintos conceptos relacionados con las funciones, las características, las prestaciones y las condiciones del entorno del producto. Corresponde a las personas implicadas en el diseño del artículo fijar si una determinada especificación, es un requerimiento o un deseo.

Las especificaciones de diseño (requerimientos funcionales) manifiestan, por sí mismas, un conjunto de propiedades deseadas del producto que representan, estas pueden ser aspectos geométricos, económicos, físicos y de otros tipos. Si denotamos por R^F a los requerimientos funcionales de un producto y a las propiedades del

producto por P^P , se tiene:

$$R^F = \{r_m^f : r_m^f = \delta(p_k^P, [p_k^P]), p_k^P \in P^P, m = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, q\}, \quad (3.8)$$

donde $[p_k^P]$ es una restricción de una propiedad del producto p_k^P y q , el número de requerimientos funcionales. De la misma forma que se expresó en (3.2), en el caso de la especificación de diseño, esta puede formularse como un predicado de la forma $\delta(p_k^P, [p_k^P])$. Las soluciones de diseño, denotadas por S^D , están definidas usualmente por un conjunto de propiedades del producto, según se expresa en la ecuación (3.9).

$$S^D = \delta(p_k^P : k = 1, 2, \dots, q, p_k^P \in P^P\}, \quad (3.9)$$

donde k es el número de propiedades que permiten la definición de un determinado producto.

Como referencia inicial del proceso de diseño, conviene organizar las especificaciones en un documento breve denominado documento de especificación, (con el máximo de información útil). Existen diversas propuestas en las metodologías prescriptivas de cómo capturar la información relacionada con los requerimientos funcionales. La más aceptada y utilizada se expresa en la tabla 3.1. La información que debe contener la tabla de especificaciones dependerá del tipo de diseño, experiencia de los diseñadores, normas empresariales u otros criterios. Para expresar el método, se utilizan como referencia los tres aspectos más relevantes.

Tabla 3.1. Forma más aceptada para la captura de los requerimientos funcionales.

	$\rightarrow i$				
$\downarrow j$	Concepto	Requerimiento	N/D	Descripción	...
	C_1	R_1	TR_1	DR_1	...
	C_2	R_2	TR_2	DR_2	...
	C_3	R_3	TR_3	DR_3	...

	C_n	R_n	TR_n	DR_n	...

Intuitivamente, los datos de la tabla anterior se pueden expresar matemáticamente a través de una matriz (3.10), donde las filas (i) identifican los diferentes datos que contendrá la especificación, y las columnas (j) representan los requerimientos funcionales. A esta matriz se le denomina matriz de requerimientos funcionales (ϕ). La misma constituye la base de la captura de los requerimientos para su posterior trazabilidad y utilización en la evaluación de los conceptos. El siguiente paso consiste en comenzar el proceso de estratificación utilizando cualquier método que permita realizar este proceso.

$$\phi = \begin{bmatrix} CR_1 & R_1 & TR_1 & DR_1 & \dots \\ CR_2 & R_2 & TR_2 & DR_2 & \dots \\ CR_3 & R_3 & TR_3 & DR_3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CR_n & R_n & TR_n & DR_n & \dots \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Para ejemplificar el procedimiento propuesto, se utilizará el método Kano aplicado a un caso específico. En la figura 3.9(a) se representa la aplicación de Kano al diseño de un molino de cuchillas para el molinado de granos y tallos. Con el fin de facilitar el proceso de estratificación, como puede observarse en la imagen, se realizó una división de los requerimientos en cuatro niveles básicos: atractivos, unidimensionales, indiferentes y obligatorios.

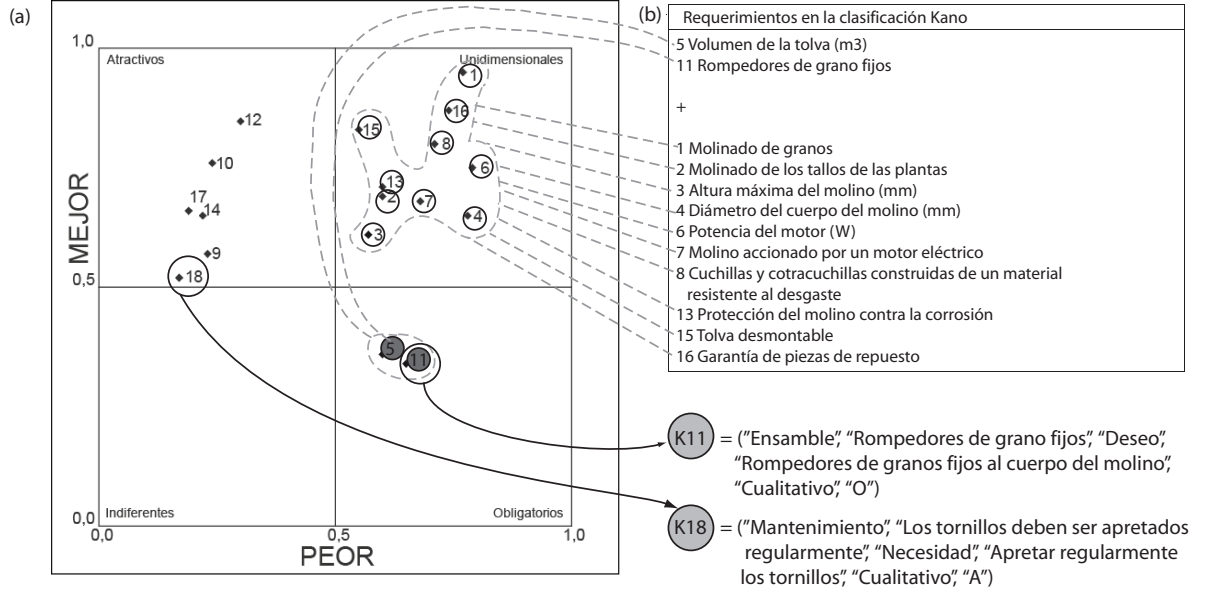


Figura 3.9. Aplicación del método Kano al diseño de un molino de cuchillas.

En la figura 3.9(b), se observa, según lo planteado por Yacuzzi y Martín (2002), la agrupación de los requerimientos acorde a los atributos que definen un producto esperado. Este proceso permite a los modelos sistemáticos establecer una calificación primaria de los requerimientos funcionales. Entonces, sin importar el método que se utilice para la estratificación, se obtendrá un vector (K_n) (3.11) que contendrá la información de la fila (i) de la matriz (ϕ) y la información relacionada con el tipo de cualidad que se determine. La ecuación (3.11) expresa esta forma aplicada al método Kano.

$$\begin{aligned}
 K_1 &= [CR_1, R_1, TR_1, DR_1, ER_1] \\
 K_2 &= [CR_2, R_2, TR_2, DR_2, ER_2] \\
 K_3 &= [CR_3, R_3, TR_3, DR_3, ER_3] \\
 &\vdots \\
 K_n &= [CR_n, R_n, TR_n, DR_n, ER_n]
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Los vectores (K_n) pueden representarse utilizando una matriz ampliada, denominada matriz ampliada de requerimientos funcionales (ϕ_A), la cual se encuentra expresada en la ecuación (3.12). El vector ($C\phi_A$) representa el conjunto de cualidades de cada uno de los requerimientos funcionales.

$$\phi_A = \begin{bmatrix} CR_1 & R_1 & TR_1 & DR_1 & ER_1 \\ CR_2 & R_2 & TR_2 & DR_2 & ER_2 \\ CR_3 & R_3 & TR_3 & DR_3 & ER_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CR_n & R_n & TR_n & DR_n & ER_n \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Una vez definida la estructuración, estratificación y representación de los requerimientos, se hace necesario la transformación de los mismos en una estructura funcional, tal y como lo reflejan los modelos prescriptivos de diseño. En el siguiente apartado se hace un análisis de esta etapa.

3.3.2. La trazabilidad de los requerimientos funcionales en el diseño conceptual de productos mecánicos

Como se expresó en el acápite 2.4.2, las funciones tienen en los modelos sistemáticos un rol fundamental. Las mismas contienen de manera encapsulada y conceptualizada la mayor cantidad de información en la fase conceptual de diseño. El análisis de la estructura funcional del producto y la interacción entre sus componentes, es de importancia capital en el proceso de diseño.

La representación formal de las funciones constituye uno de los factores claves en la posterior automatización del proceso a través de herramientas computarizadas que permitan integrar la búsqueda de soluciones, la comunicación de los problemas de diseño y la documentación para la re-utilización de la información. Para lograr su objetivo, esta herramienta debe poder traducir y encapsular en la estructura funcional los requerimientos funcionales, permitiendo, luego, su utilización en la selección de conceptos.

Captura de los requerimientos cualitativos en la modelación funcional

Una de las ventajas que posee la modelación funcional es que representa una forma de conservar y transmitir información relativa al diseño. Basándose en dicha característica, el modelo propuesto aporta una estructura de datos que permite la trazabilidad de los requerimientos cualitativos en la estructura funcional del producto. Atendiendo a esto, surge entonces una interrogante: ¿Cómo expresar a través de la base funcional propuesta por Pahl y Beitz, Hundal o Stone, la caracterización cualitativa de los requerimientos?

La respuesta a dicha pregunta radica en el análisis de los flujos que representan las entradas y salidas de la modelación funcional como forma de traducir los requerimientos funcionales. La representación de los flujos trae consigo información crítica acerca del producto. Es posible representarlo en diferentes niveles de abstracción, en función del tipo de diseño que se encuentra realizando. La utilización de una descripción de flujos general, induce a una estructura funcional genérica y, por tanto, a una variedad más amplia de conceptos. Por otra parte, la utilización de una especificación de flujos más concreta, implica una estructura funcional más concisa.

Un determinado producto (P) puede representarse funcionalmente a través de varias estructuras funcionales (EF_P) en cada modo de operación (MO) posible:

$$P = \{MO^j | MO^j = (EF_p^i | i = 1, 2, \dots, r)\}, \quad (3.13)$$

donde r es el número de estructuras funcionales que representan un modo de operación de un producto. Cada estructura funcional está formada por las funciones genéricas (F_P) y los flujos que las conectan (C_F). A su vez, cada F_P está conformada por una función global (F_G) y unas funciones derivadas (DF_G). De esta, se modelan todas las funciones que representan un determinado producto.

$$EF_p^i = \{F_P, C_F | MO^j | F_P = F_G, DF_G; DF_G = \{DF_G^i | i = 1, 2, \dots, r)\}\} \quad (3.14)$$

En la presente investigación se ha desarrollado una sintaxis a través de vectores y matrices que le permite al diseñador identificar en una representación funcional, las diferentes cualidades de los requerimientos funcionales a partir del modelo propuesto. La sintaxis indica que un flujo con características cualitativas es el resultado de la adición, a los flujos utilizados por la base funcional seleccionada, de un descriptor cualitativo que le indica qué tipo de cualidad posee el requerimiento representado a través de ese flujo.

En la figura 3.10(a), se representa la estructura funcional de un molino de cuchillas, utilizando la sintaxis tradicional de los modelos funcionales. En la figura 3.10(b), se representa la estructura funcional, que adopta la sintaxis para la representación cualitativa de los requerimientos funcionales propuesta.

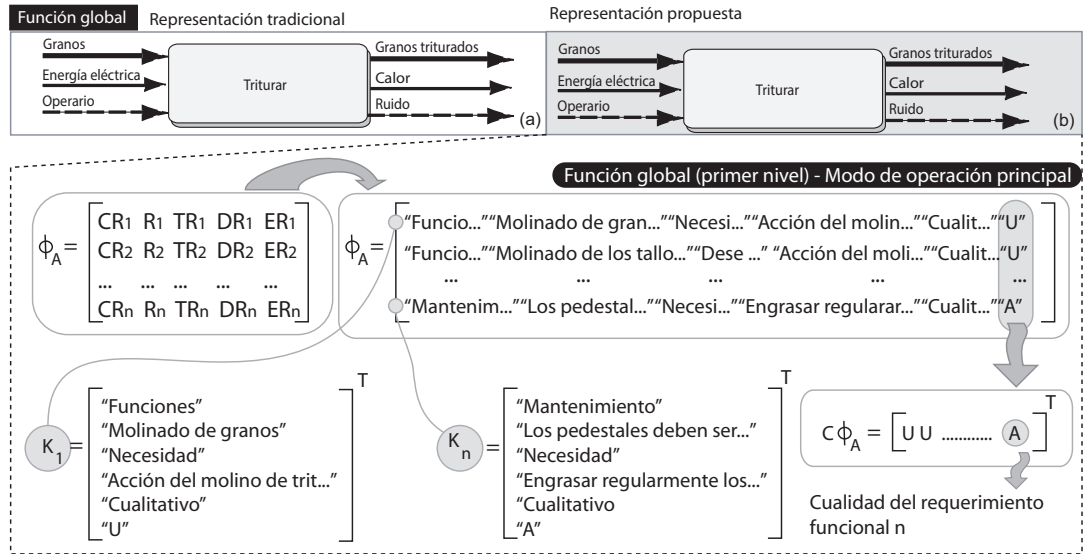


Figura 3.10. Representación de la estructura funcional de un molino de cuchillas en su forma tradicional y con la sintaxis propuesta.

Esta forma de representación garantiza que exista una trazabilidad de la estratificación cualitativa de los requerimientos, al indicarse gráficamente su tipología. También, manifiesta una forma de vincular el dominio de las especificaciones con el dominio funcional (Figura 3.1). A la vez, la sintaxis propuesta constituye, desde el punto de vista de la información que se maneja en esta etapa de diseño, la conexión o vínculo entre el estadio conceptual evolutivo primario y el estadio conceptual funcional (Figura 3.2).

Como se expresó en el capítulo 2, acápite 2.4.2., autores como Helms (2013), Helms *et al.* (2009), Jin y Li (2007), Schmidt y Cagan (1995), junto a Schmidt y Cagan (1997), definen un grupo de reglas gráficas gramaticales en el proceso de diseño. En la presente investigación se constituyen y utilizan un conjunto de reglas con un enfoque modificado, que incorporan la trazabilidad cualitativa de los requerimientos funcionales. Dichas reglas están relacionadas con la descomposición de la función global, de una función de alto nivel a una de más bajo nivel, y la posterior definición de un grupo integrado por las genéricas y las específicas. La ventaja de la utilización de reglas gráficas gramaticales se aprecia en la posibilidad de codificar el conocimiento, por tanto, las reglas gramaticales expresan de una manera simple el conocimiento del diseño.

REGLA 1. Regla para la descomposición de la función global.

La regla de descomposición de la función global se aplica en el proceso de descomposición de funciones basada en los flujos. Se caracteriza por disponer, además de los datos conocidos, de la categorización de los requerimientos funcionales codificados. Se representa por:

$$DF_G = \{ \langle \text{acción} \rangle, \langle \text{objeto} \rangle, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \}, \quad (3.15)$$

donde $\langle \text{acción} \rangle$ denota la operación (función) que se ejecutará y $\langle \text{objeto} \rangle$, el objeto a quién se le aplicará. Los atributos fle_n y fls_n indican los flujos de entrada y de salida, representados según la metodología prescriptiva de Pahl y Beitz. El atributo ER_n expresa la cualidad del requerimiento funcional, categorizado de acuerdo al método utilizado.

Reglas genéricas

REGLA 2. Descomposición funcional en expansión con criterio de requerimientos cualitativos.

Para cada función global F^i al nivel i , deberá existir al menos una función F^{i+1} , en el siguiente nivel de la estructura funcional, que garantice el proceso de descomposición funcional. El proceso de selección de la función F^{i+1} se realiza a partir de la búsqueda, en la base de datos de las funciones (BD^F), de la que posea la mayor coincidencia entre los flujos de entrada y de salida, con respecto a la función F^i .

$$\forall F_P^i \rightarrow F^{i+1} = \{ F_G, DF_G | DF_G = DF_G^i | i = 1, 2, \dots, n; DF_G \in BD^F \} \quad (3.16)$$

REGLA 3. Regla para la descomposición funcional a través de la reducción de funciones.

Esta regla desestima en el proceso de búsqueda de la función F^{i+1} , aquellas funciones de la base de datos que no satisfacen la primera regla expuesta.

$$\forall F_P^i \rightarrow F^{i+1} = \{ F_G, DF_G | DF_G \notin BD^F \} \quad (3.17)$$

REGLA 4. Regla para la terminación del proceso de descomposición funcional.

Para toda función F^i , en un nivel determinado $i + n$, si cada flujo de entrada de una función F^{i+1} perteneciente a la base de datos de funciones proviene de los flujos de salida de la función F^i , entonces, el proceso de descomposición se termina.

$$\begin{aligned} \forall F_P^{i+n} \rightarrow Si DF_G^{i+n} \{fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE}\} = \\ DF_G^{i+n} \{fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE}\} \in BD^F \end{aligned} \quad (3.18)$$

Reglas específicas

Las reglas específicas, basadas en la acción que ejecuta la función, descomponen una función global en sub-funciones en base a el tipo de acciones que realiza, en vez de utilizar como criterio la búsqueda de los flujos de entrada y de salida.

REGLA 5. Regla de descomposición funcional basada en la semántica de la acción.

En ingeniería es frecuente la existencia de casos donde una acción de un nivel de jerarquía alta (*Acc_h*) puede ser dividida en acciones de un nivel de jerarquía más bajo (*Acc₁*, *Acc₂*, ..., *Acc_n*). Por ejemplo, en la función < transportar > < objeto >, la acción < transportar > puede ser expandida como < transportar > → { < soportar >, < mover > }. Por tanto, la función original < transportar > < objeto > puede ser expandida en dos sub-funciones, < soportar > < objeto > y < mover > < objeto >.

$$\begin{aligned} DF_G = \{ < acción >, < objeto >, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \rightarrow DF_{G1} \\ = \{ < acción >^1, < objeto >, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \\ + \{ < acción >^2, < objeto >, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} + \dots \\ + \{ < acción >^n, < objeto >, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \end{aligned} \quad (3.19)$$

REGLA 6. Regla de descomposición funcional donde se requiere incorporar acciones

En algunos casos, la ejecución de una determinada acción requiere de la ejecución de otras acciones. La función original puede ser descompuesta con la inclusión de nuevas acciones, manteniendo la acción original. Por ejemplo, la función < medir > < probeta > requiere < asegurar > < probeta > y < extraer > < probeta >.

$$\begin{aligned} DF_G = \{ < acción >, < objeto >, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \rightarrow DF_{G1} \\ = \{ < acción >, < objeto >, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \\ + \{ < acción^2 >, < objeto >, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} + \dots \\ + \{ < acción^n >, < objeto >, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \end{aligned} \quad (3.20)$$

REGLA 7. Regla de descomposición funcional basada en la acción y el objeto.

Algunas veces, de manera heurística se conoce que una determinada función puede ser descompuesta en otras funciones. El resultado de aplicar este tipo de reglas consiste en que la función original se reemplaza por un

nuevo conjunto de funciones. En este caso, tanto la acción como el objeto son reemplazados. Por ejemplo, la función $\langle \text{mover} \rangle \langle \text{objeto} \rangle$ puede ser descompuesta en $\langle \text{generar} \rangle \langle EM \rangle$, $\langle \text{guiar} \rangle \langle EM \rangle$ y $\langle \text{parar} \rangle \langle EM \rangle$, como se ejemplifica en la ecuación 3.21.

$$\begin{aligned}
 DF_G &= \{ \langle \text{acción} \rangle, \langle \text{objeto} \rangle, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \rightarrow DF_{G1} \\
 &= \{ \langle \text{acción}^1 \rangle, \langle \text{objeto}^1 \rangle, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \\
 &\quad + \{ \langle \text{acción}^2 \rangle, \langle \text{objeto}^2 \rangle, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} + \dots \\
 &\quad + \{ \langle \text{acción}^n \rangle, \langle \text{objeto}^n \rangle, fle_n, fls_n, ER_n | ER_n \in C^{RFE} \} \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

REGLA 8. Regla para establecer la tipología de relaciones entre las funciones.

En una estructura funcional pueden observarse dos tipos de relaciones entre funciones: las relaciones en serie, cuando una función se vincula con otra a través de un flujo determinado; y las relaciones en paralelo, cuando las funciones no poseen conexión directa.

Procedimiento para la modelación funcional con los requerimientos cualitativos

A continuación se detalla el procedimiento para obtener la estructura funcional a partir de la base funcional, lo cual facilita el análisis cualitativo de los requerimientos. Luego de disponer del conjunto de requerimientos funcionales estratificados, se crea el modelo de la caja negra, que consiste en una representación gráfica de la función del producto con sus flujos de entradas y salidas. La función global se expresa de forma verbal.

Cada necesidad o requerimiento funcional reconoce uno o más flujos de entrada y de salida. De manera general, los flujos de entrada y de salida identifican a los requerimientos funcionales relacionados con la función global, no con los flujos internos. El nivel de detalle de la estructura funcional depende del tipo de diseño que se efectúe. En el caso de los rediseños, los flujos se encuentran típicamente bien definidos. Sin embargo, en un problema de diseño original, los flujos son más genéricos (Figura 3.10).

Una vez que se dispone del modelo de la caja negra, se pasa a crear las cadenas de sub-funciones para cada flujo de entrada. En cada caso, se sigue la ruta definida por el flujo de entrada hasta el de salida correspondiente o hacia otros tipos de flujos. Se expresan de forma verbal. En esta investigación se definen los modos de operación del producto y para cada uno de estos, se establecen las cadenas de sub-funciones. En la figura 3.11 se muestran las cadenas de sub-funciones para el caso del producto expresado en la figura 3.10.

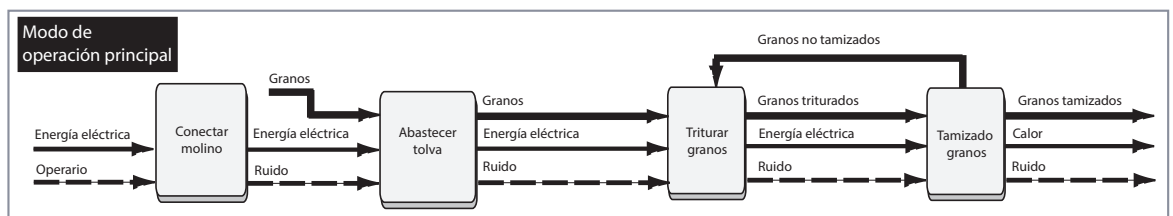


Figura 3.11. Cadenas de sub-funciones para el caso de un molino de cuchillas.

Las cadenas de sub-funciones se expresan a través de la base funcional (ver Anexo 3, Figura 3.1). Esta expresión de la estructura funcional facilita la estandarización y la comprensión de los modelos funcionales. Se sugiere el ordenamiento de las sub-funciones con respecto al tiempo. Como etapa final, las diferentes cadenas funcionales obtenidas para cada uno de los flujos de entrada se superponen en un solo modelo. Este paso puede requerir la adición de nuevas sub-funciones. En la figura 3.12 se muestra el modelo integrado para el caso del molino de cuchillas.

A la base funcional que se tomó como referencia, se le proporcionó un lenguaje de diseño homogéneo que permitió la estandarización de la estructuración funcional de los productos y un análisis cualitativo de los requerimientos funcionales que facilitó la estratificación de estos. Al mismo tiempo, se añadió una sintaxis que permitió su trazabilidad hasta la evaluación conceptual.

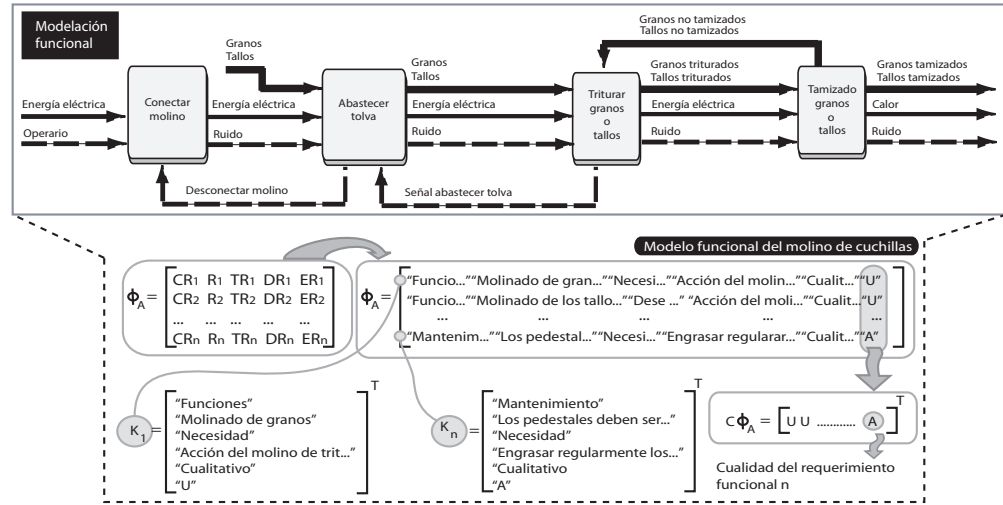


Figura 3.12. Modelo funcional para el caso de un molino de cuchillas.

Representación matricial de la modelación funcional

Como forma de capturar en una matriz la estructura funcional o estructuras funcionales que se obtienen a través del método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional, se define, para la modelación funcional, la matriz de funciones cualitativas (M_{fc}), según se expresa en (3.22).

$$M_{fc} = \begin{bmatrix} f_1 & \phi_{A1} & fle_1 & fls_1 \\ f_2 & \phi_{A2} & fle_2 & fls_2 \\ f_3 & \phi_{A3} & fle_3 & fls_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_n & \phi_{An} & fle_n & fls_n \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Esta matriz captura la representación funcional final obtenida con anterioridad (Figura 3.12). La primera columna identifica el conjunto de sub-funciones (f_n) que componen la estructura funcional para un determinado nivel.

El vector de las funciones con cualidades para la trazabilidad (ξ_n), expresado en (3.23), se deriva de la matriz de funciones cualitativas (M_{fc}) y representa los elementos fundamentales que posee cada sub-función en la estructura funcional, orientados estos al proceso de trazabilidad o transferencia de la información en la síntesis conceptual de soluciones.

$$\xi_n = [f_n \phi_{An} fle_n fls_n]_{M_{fc}} \quad (3.23)$$

Con estas estructuras matemáticas se logra capturar la información relacionada con la modelación funcional de un determinado producto, para facilitar así el proceso de trazabilidad de los requerimientos funcionales hasta la evaluación de los conceptos.

3.4. Método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas

Una de las limitaciones de los actuales modelos sistemáticos es la forma de dar respuesta al soporte necesario para que el diseñador seleccione los mejores conceptos posibles. La clave para responder a esta limitación está en que, en la mayoría de las ocasiones, existen múltiples soluciones posibles para un determinado problema de diseño. Por tanto, si el diseñador dispone de una asistencia en el proceso de generación y exploración de la gama de alternativas de solución a través del uso de diversos criterios de evaluación, entonces, le incrementará su posibilidad de obtener mejores conceptos.

En la presente investigación, con el objetivo de dar respuesta al planteamiento anterior y orientado a garantizar el proceso de trazabilidad de los requerimientos funcionales hasta la evaluación de los conceptos, se desarrolló el método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas.

En la figura 3.13 se muestra la propuesta del método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas, con el objetivo de conceptualizar la transformación de la información desde el nivel funcional hasta el nivel de soluciones conceptuales. Es decir, este proceso constituye la transformación del **estadio conceptual evolutivo funcional al estadio conceptual evolutivo básico**.

El método propuesto se basa en la intervención del diseñador en el proceso de toma de decisiones (síntesis guiada). En consecuencia, se proporciona una asistencia para que el diseñador pueda contemplar las diferentes soluciones que se van obteniendo a medida que se avanza y, con ello, la posibilidad de elegir la más conveniente. De esta forma, resulta el campo de soluciones mucho más amplio.

El método (Figura 3.13) se inicia a partir de la estructura funcional con cualidades incorporadas (1), descritas en el acápite anterior y representadas por el sistema de matrices y vectores expuesto. En este paso se establece la síntesis de los principios de soluciones y se obtiene la matriz (M_{fc}). Es importante destacar que, cuando varias funciones están asociadas a un mismo principio de solución, la matriz (M_{fc}) se debe transformar en una matriz sintetizada de funciones cualitativas (M_{sfc}). En esta se unifican, en un criterio único, las funciones asociadas al principio de solución.

A continuación, se determina el tamaño teórico del campo de soluciones (2). Mediante este paso se obtiene el tamaño que tendría el campo teórico de soluciones a partir de la combinación sistemática de los conjuntos no acotados de conceptos elementales asociados con cada una de las sub-funciones de la estructura funcional (3). Se utiliza, sobre todo, en aquellos problemas complejos de la ingeniería para estudiarlos de una manera más adecuada, y contiene todas las alternativas de solución planteadas para el concepto en desarrollo.

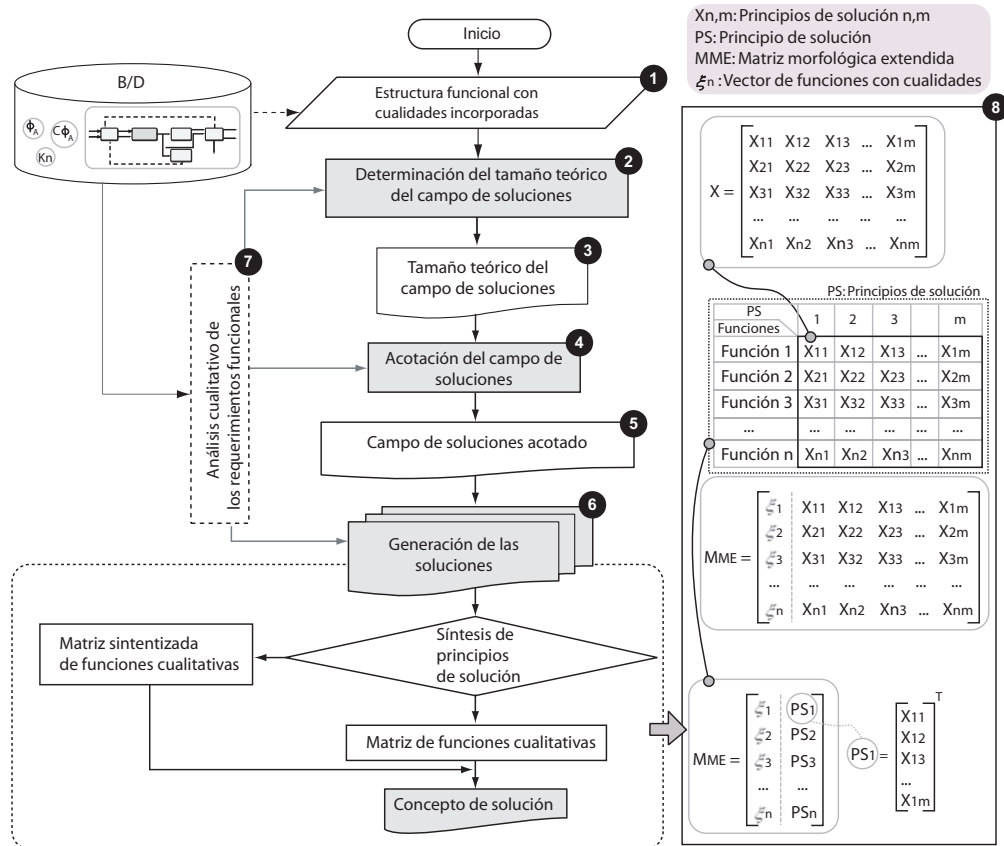


Figura 3.13. Método propuesto para la síntesis conceptual de soluciones.

La acotación del campo de soluciones (4) constituye una alternativa para aquellos sistemas donde existe un campo de soluciones demasiado grande para ser evaluado. Aquí juega un papel importante el conocimiento heurístico, el cual consiste en eliminar aquellos principios de solución inadecuados que dan respuesta a cada sub-función en la estructura funcional, obteniéndose un campo de soluciones acotado (5).

A partir de este campo de principios de solución acotado, se pasa a la combinación sistemática para la obtención de los conceptos del producto (6).

3.4.1. Estructuración de la síntesis de soluciones acumulativas

En el método de síntesis de soluciones propuesto se toma la matriz morfológica como método para generar conceptos por ser la más adecuada para los objetivos previstos. Con vistas a facilitar su representación en la trazabilidad de los requerimientos funcionales y su utilización en la evaluación de conceptos, la representación matricial de la matriz morfológica se considera como una matriz X con n número de funciones y

m principios de solución asociados a cada función. Sin embargo, esta representación clásica no contiene todos los elementos que permiten su utilización en el proceso de trazabilidad de los requerimientos funcionales con el objetivo de utilizarlos en el proceso de evaluación conceptual.

Con vistas a suplir esta limitación, se propone la representación de una matriz morfológica extendida, que incluye aquellos parámetros esenciales para el proceso de trazabilidad antes analizado. La matriz morfológica extendida (M_{ME}) se representa en la figura 3.13(8), donde se aprecia que la misma inserta, en lugar de la denominación tradicional de la función o sub-función, al vector de las funciones con cualidades para la trazabilidad (ξ_n). Por tanto, la (M_{ME}) está compuesta por los vectores (ξ_n) y los vectores (PS_n) que representan los diferentes principios de solución de cada función o sub-función.

3.4.2. Determinación del tamaño teórico del campo de soluciones

Mediante este paso se determina el número teórico de soluciones del campo, obtenido por la combinación sistemática del conjunto de principios elementales de solución, seleccionados a partir de las sub-funciones de la estructura funcional. El procedimiento es el siguiente:

- Extracción de la base de principios de solución del conjunto de principios elementales asociados a las sub-funciones.
- Determinación del tamaño del campo teórico de soluciones (TCS) según la expresión (3.24), a través de la combinación sistemática de los principios de solución.

$$TCS = \prod_{p=1}^q PS_p \quad (3.24)$$

La expresión (3.24) indica que el (TCS) se obtiene multiplicando la cantidad de principios de solución de cada sub-función (p) para toda la estructura funcional (q) (Smith *et al.*, 2012).

3.4.3. Acotación y generación del campo de soluciones

Para el caso de productos donde el número de sub-funciones y el número de principios de solución sea elevado, se recomienda la aplicación de estrategias para la acotación del número de soluciones a obtener, a partir de la aplicación de reglas heurísticas. Este paso es opcional y queda a criterio del diseñador su aplicación; dependerá de cada caso de estudio en particular.

La generación de conceptos se obtiene a partir de la selección sistemática de un principio de solución por cada sub-función de la estructura funcional. Matemáticamente se puede denotar a través del valor 1 para cierto principio de solución (X_{NM}) seleccionado, y 0 para los no seleccionados. Por tanto, cuando se está realizando la combinación sistemática, solo existirá un elemento diferente de cero en cada vector (PS) (3.25).

$$\sum_{i=1}^n PS_i = 1, i = 1, \dots, n, PS_i \in \{0, 1\} \quad (3.25)$$

3.5. Método para la evaluación conceptual de soluciones por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales

A partir del enfoque sistemático de Pahl y Beitz adoptado en la investigación, se evalúan las propuestas de solución obtenidas en el apartado anterior. En este caso, la evaluación conceptual significa determinar la proximidad de cada solución, respecto a un objetivo definido, con la particularidad de que, en esta tesis, se añade al proceso de evaluación la trazabilidad de los requerimientos funcionales.

Los criterios de evaluación constituyen elementos centrales en esta etapa y se encuentran relacionados con los requerimientos funcionales, que fueron la causa para el diseño del producto. La tabulación de tales objetivos depende, en gran medida, del propósito de la evaluación en particular, es decir, en qué fase de diseño se encuentra y la relativa novedad del producto.

Existen diversas formas para evaluar los conceptos de solución, cada una de ellas definidas para entornos ya establecidos, como son: el árbol de objetivos, la ponderación de criterios, etcétera. En este caso, para demostrar la factibilidad de la trazabilidad de los requerimientos funcionales en la evaluación conceptual, se hará referencia a la evaluación por ponderación, al ser el criterio utilizado en los casos de estudio. No obstante, puede recurrirse, de igual manera, a los demás criterios establecidos por la literatura.

Para la evaluación conceptual de soluciones, a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales, se propone una modificación al método de evaluación por ponderación, consistente en incluirle la trazabilidad de los requerimientos funcionales al mismo. En la figura 3.14 se muestra todo el proceso.

Para poder garantizar el proceso de trazabilidad, se proponen tres etapas fundamentales. La etapa A (Figura 3.14), que está centrada en la transferencia de la información de los requerimientos funcionales, va desde las cadenas de funciones y sub-funciones del producto a las matrices ampliadas de requerimientos funcionales (ϕ_{An}). Las mismas se estructuran a partir de las funciones (f_n) y la información resultante permite la definición de la matriz de funciones cualitativas (M_{fc}). En las matrices (M_{fc}) están agrupados los vectores de las funciones con cualidades para la trazabilidad (ξ_n). Estos vectores constituyen el elemento de enlace con la etapa B del proceso de evaluación de conceptos, a partir de la trazabilidad en la síntesis conceptual de soluciones.

La etapa B permite definir la matriz morfológica extendida (M_{ME}), a partir de relacionar los vectores (ξ_n) con los principios de soluciones y la estratificación de los requerimientos. La relación entre estos elementos parte de la formalización de los vectores (K_n), lograda al ponderar las cualidades que se identifican en el vector de cualidades ($C\phi_A$) de cada uno de los requerimientos funcionales asociados a la función del producto. Los valores de ponderación para las cualidades se definieron en los rangos asignados de 0,10, 0,20, 0,30 y 0,40; siguiendo el orden preferencial definido por Berger *et al.* (1993), donde: $U > O > A > I$.

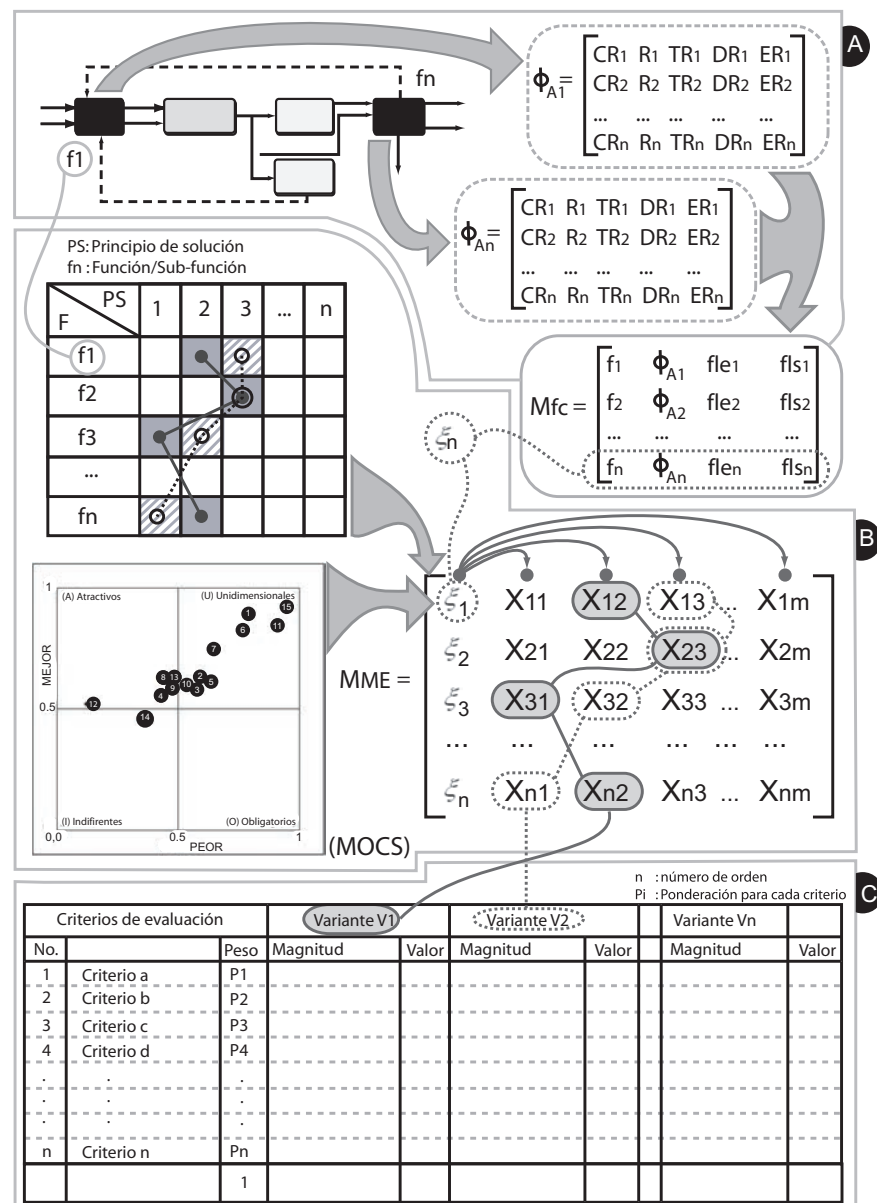


Figura 3.14. Proceso de evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales.

El resultado de la suma de los valores ponderados de las cualidades del vector $(C\phi_A)$, contenidas en los vectores (K_n) , corresponde al valor del vector (ξ_n) que es distribuido según el criterio del diseñador entre los diferentes principios de solución aportados por la matriz morfológica extendida (M_{ME}) .

La etapa C es aquella que contiene la evaluación de cada variante de solución. Para la comparación de los conceptos se suman los valores distribuidos del vector (ξ_n) , asociado a las soluciones seleccionadas de la matriz (M_{ME}) . Los valores de los principios de solución son multiplicados por los pesos relativos asignados según el diseñador a los criterios de evaluación.

La combinación de los valores del vector (ξ_n) con los pesos relativos, definen una **métrica para el ordenamiento de los conceptos de solución** (MOCS), que sirve como criterio de evaluación para la selección de los conceptos de solución. Dicha métrica responde a una orientación hacia la percepción del requerimiento

por parte del usuario, donde el diseñador puede distribuir los valores de los vectores (ξ_n) entre los principios de solución, a partir del criterio de cuán preferida es para él una solución sobre otra, el criterio de preferencia está contenido en un indicador de preferencia (pesos relativos) según lo planteado por Jin y Li (2007). Según estos autores corresponde al diseñador establecer esta preferencia en base a su experiencia.

El resultado final indica la variante conceptual de solución cuyos requerimientos funcionales satisface en mayor medida los deseos del usuario, lo que permite que el diseñador disponga de una referencia para la evaluación conceptual de soluciones, teniendo en cuenta la trazabilidad de las cualidades de los requerimientos funcionales desde su definición hasta la etapa de evaluación. De esta forma, se logra cumplimentar el objetivo central de la investigación que es implementar un método sistemático que facilite la toma de decisiones en la evaluación de conceptos, teniendo en cuenta la estructuración de las relaciones entre cada una de las sub-etapas del diseño conceptual, y la estratificación y trazabilidad de los requerimientos funcionales.

La tabla 3.2 muestra una comparación entre los métodos utilizados comúnmente en la selección de conceptos y el de evaluación conceptual por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales (ECTR). Independientemente de su complejidad de uso (alta, media o baja), se destaca que una de las debilidades identificadas en los métodos para evaluar conceptos, incluyendo la metodología prescriptiva de Pahl y Beitz, es la no existencia de un criterio que le permita al diseñador disponer de una referencia para ordenar por niveles de importancia los requerimientos funcionales a la hora de asignar las diferentes ponderaciones a los conceptos de solución.

Tabla 3.2. Comparación de los métodos utilizados en la selección de conceptos

Método	Complejidad de uso	El método obtiene los pesos de los criterios	Evaluación con funciones de valoración	Criterios tangibles	Trazabilidad
AHP	Alta	Sí	No	No	No
Fuzzymethod	Alta	No	No	Sí	No
ECTR	Media	Sí	Sí	Sí	Sí
Pahl y Beitz	Media	No	Sí	Sí	No
QFD	Media	Sí	No	Sí	No
DecisionMatrix	Baja	No	No	No	No
Pugh	Baja	No	No	No	No

La ausencia en los métodos de criterios para el análisis de la trazabilidad, unido a que no todos aportan los pesos de los criterios asociados a los requerimientos de los usuarios, refleja lo adecuado del método ECTR propuesto, a partir del cual se puede realizar la selección de conceptos teniendo en cuenta los criterios de los usuarios, a diferencia de los otros métodos que utilizan el grado de importancia de los criterios, asumiendo valores basados en la intuición o experiencia del diseñador.

3.6. Herramientas computacionales para el proceso de síntesis conceptual de soluciones a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales

El diseño conceptual, es un complejo proceso que involucra la generación, evaluación y selección de conceptos para satisfacer los requerimientos del diseño. Los diseñadores deben encontrar formas efectivas para la búsqueda de alternativas que relacionen los requerimientos del diseño con las soluciones tecnológicas disponibles. Para facilitar este proceso, se requieren de herramientas computacionales que soporten la generación, evaluación y selección de conceptos (Chen *et al.*, 2012; Komoto y Tomiyama, 2012; Tseng y El-Ganzoury, 2012).

Para el desarrollo de herramientas computacionales debe abordarse la comprensión y estructuración del proceso de generación, evaluación y selección de conceptos. La no comprensión de estos procesos implica una dificultad considerable para su implementación computacional. Las metodologías y métodos de diseño existentes describen las formas de realizar el proceso (ver Capítulo 1), pero proporcionan poca información acerca de la etapa relacionada con los conceptos.

A partir de estos análisis, la presente investigación propone un enfoque computacional para garantizar el desarrollo de herramientas que permitan el proceso de generación, selección y evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Las herramientas computacionales en un entorno CAD facilitan al diseñador la exploración del campo de soluciones a partir de la generación automática de conceptos que cumplen los requerimientos funcionales. Las mismas se basan en la implementación del método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional y del método para la síntesis conceptual de soluciones propuesto.

Para que los métodos antes citados puedan ser implementados computacionalmente, se definió un conjunto de herramientas informáticas contenidas en el software CODISE-TZR, concebido para la formalización de la evaluación conceptual de las soluciones en el diseño mecánico (ver Anexo 4, Figura 4.1). El conjunto de herramientas contenidas en este software está conformado por las aplicaciones GRProyect, CADProcessDesigner, GECOND y SINCOS. Estas herramientas son un prototipo demostrativo, concebido en función de los casos de estudio analizados en esta investigación.

3.6.1. Algoritmo de las herramientas computacionales desarrolladas

El desarrollo del conjunto de softwares mencionado, se estructuró mediante un algoritmo computacional mostrado en la figura 3.15. En el mismo se definió la entrada al proceso con la aplicación, a los usuarios, del cuestionario del método Kano; a estos efectos se desarrolló la herramienta informática denominada GRProyect. Sus datos de salida están constituidos por los requerimientos funcionales estratificados (1).

A partir del momento en que el diseñador dispone de los requerimientos funcionales estratificados por niveles de cualidades, se pasa a la generación de la estructura funcional del producto (2), que dependerá del problema de diseño en particular y de la biblioteca de funciones estandarizadas existente (3). Para facilitar este proceso al

diseñador se desarrolló una herramienta informática denominada CADProcessDesigner.

La biblioteca de funciones y de principios de solución, sirve como base de conocimientos acerca de la tipología de funciones que pueden utilizarse para la descripción conceptual de los productos, con la incorporación de los elementos cualitativos que garantizan el proceso de trazabilidad de los requerimientos funcionales (Stone, 1997; Stone y Wood, 2000; Stone *et al.*, 1998, 2000). La biblioteca de principios de solución se adecúa a cada contexto relacionado con un determinado producto y expresa cuáles son las posibles soluciones tecnológicas que garantizan lo representado por la estructura funcional del producto. Las mismas proporcionan una base para la descomposición funcional, la estructuración funcional y la combinación correspondiente de los principios de solución. La diversidad de las bibliotecas determina el tamaño del campo de soluciones.

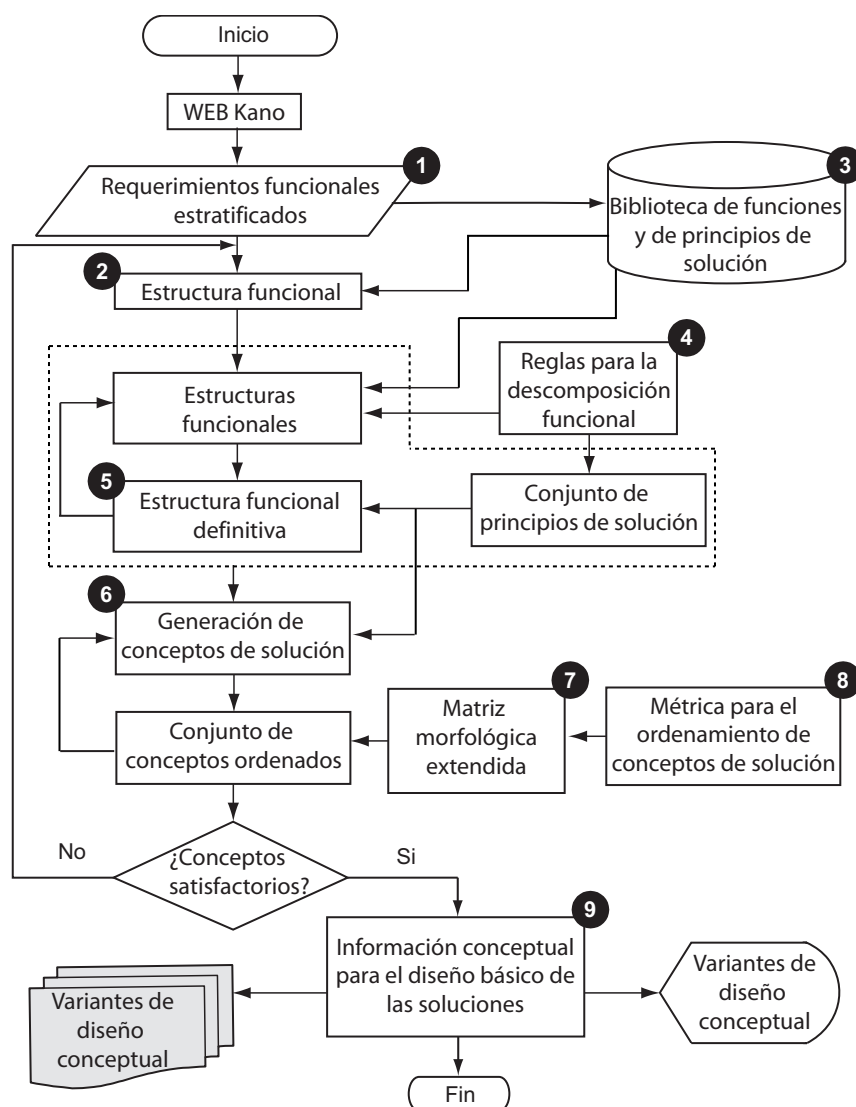


Figura 3.15. Estructuración de la automatización de los métodos acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional y para la síntesis conceptual de soluciones.

A partir de esta etapa del proceso, se obtiene primeramente un conjunto de estructuras funcionales en dependencia de las consideraciones del diseñador. Las mismas se logran a partir de la consulta de la biblioteca

de funciones estandarizadas y a través de un proceso iterativo que concluye con una estructura funcional final. Las funciones expresadas definirán los tipos de principios de solución.

En la construcción de las estructuras funcionales, se utiliza el conjunto de reglas gramaticales (4) para descomponer la función global en sub-funciones de un nivel de jerarquía más bajo y más específicas, descritas en el acápite 2.3.2. Las reglas gramaticales descritas facilitan el proceso de formalización del método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional y de la síntesis conceptual de soluciones, con el objetivo de poderlos implementar en un sistema CAD. Además, permiten la descomposición funcional del producto.

Una vez que se disponga de la estructura funcional definitiva (5), se procede a la generación de los posibles conceptos de solución (6), utilizando la matriz morfológica extendida que se desarrolló (7). Para cada función establecida en la estructura funcional, se identifica un conjunto de principios de solución. Luego de la definición de la correspondencia entre funciones y principios de solución, se aplica la métrica “MOCS” (8) que garantiza, a través de la matriz morfológica extendida, la trazabilidad de los requerimientos funcionales en el proceso de generación de conceptos. Para esta etapa, se desarrolló una herramienta informática denominada GECOND. Otra herramienta disponible para la síntesis conceptual de soluciones (9) es la denominada SINCOS, la cual potencia la generación de soluciones y la utilización de la teoría de los sistemas de ingeniería, permitiendo la obtención de soluciones optimizadas.

3.6.2. Descripción de las herramientas informáticas desarrolladas

La descripción de las interfaces que conforman las aplicaciones GRProyect, CADProcessDesigner, GECOND y SINCOS permite conocer la signatura de los métodos del conjunto de herramientas contenidas en el software CODISE-TZR. En este sentido, mediante la descripción de las interacciones que se establecen entre las funciones, sus argumentos y los valores de retorno se expone la funcionalidad de estos programas.

GRProyect

Este software se encarga de la gestión de los requerimientos funcionales en proyectos de diseño mecánico, a través del uso del método Kano en un entorno Web, con el objetivo de facilitar su utilización por parte de los diseñadores. Una vez accedida a la dirección Web donde está alojada la página de la aplicación, se procede a autenticación del usuario (ver Anexo 4, Figura 4.3(a)), al introducir sus datos (usuario y contraseña) si está registrado, le son asignados los permisos según su rol (administrador, diseñador o encuestado).

En la aplicación, la gestión del proyecto (ver Anexo 4, Figura 4.3(b)) inicia cuando el usuario con rol de administrador o de diseñador crea un proyecto y le designa un nombre para identificarlo. Para la gestión de los requerimientos (ver Anexo 4, Figura 4.3(c)), el usuario define, modifica, elimina y caracteriza los requerimientos del producto. Durante la gestión de la pregunta de los requerimiento (ver Anexo 4, Figura 4.3(d)) se elabora, modifica o elimina la pregunta del requerimiento previamente definido en el proyecto. La gestión del usuario (ver Anexo 4, Figura 4.3(e)) inicia cuando este crea, modifica o elimina un usuario registrado. Si el usuario

es del tipo diseñador puede modificar a usuarios de tipo encuestado. La gestión de la encuesta (ver Anexo 4, Figura 4.3(f)) se realiza cuando se responde, inserta, modifica o elimina una encuesta. Si el usuario es de tipo encuestado sólo puede responder la encuesta. El procesamiento de la encuesta es automático y se inicia cuando se completa el cuestionario en el que se le da respuesta a las preguntas de todos los requerimientos pertenecientes al proyecto. Los resultados (ver Anexo 4, Figura 4.3(g)), que pueden aparecer tabulados y en forma gráfica (ver Anexo 4, Figura 4.3(h)), son mostrados con el análisis del comportamiento para cada requerimiento mediante su clasificación en “Mejor que” y “Peor que”. La aplicación permite generar un archivo con la encuesta y los resultados en un formato de extensión pdf.

CADProcessDesigner

Consiste en un editor de estructuras funcionales, que facilita la creación interactiva de las variantes de estructuras funcionales deseadas. La aplicación permite construir las estructuras funcionales del producto mediante la selección y arrastre hacia la hoja de dibujo del elemento gráfico a representar, consistentes en los cuadros de las funciones y las flechas de las entradas o salidas. Estos elementos son editables y reciben la denominación indicada por el usuario. La información de salida contiene la estructura de la matriz de funciones cualitativas (M_{fc}) y se guarda tanto en un documento de extensión pdf como en forma de lista en un archivo de extensión txt para su interacción con la herramienta GECOND.

GECOND

Permite el análisis de la contribución de cada una de las funciones de la estructura funcional en la ponderación total del concepto de solución que se analice. Este procedimiento se basa en la métrica “MOCS”, facilitando visual y analíticamente la comprensión de cada concepto de solución y su comparación con otras soluciones conceptuales. De esta forma se ofrece al diseñador una herramienta que facilita su toma de decisiones. La explotación del software se realiza a través del dialogo principal que contiene dos pestañas; una con las opciones para la formación del “Concepto base” y otra para la “Generación de variantes”. La construcción del concepto base se inicia cuando el usuario accede a la aplicación y se le brinda la posibilidad de, implementar las funciones para crear o abrir un concepto base existente, así como para salvar en la bases de datos (BD) un concepto base. El usuario puede adicionar o eliminar los requerimientos, las funciones y los principios de solución; al mismo tiempo, puede aplicar o modificar las propiedades de un requerimiento determinado y asignar los pesos de ponderación contenido en la métrica a los principios de solución.

La generación de variantes inicia cuando al usuario se le brinda la posibilidad de escoger dentro de la BD de conceptos bases, aquel que desea evaluar. Una vez escogido el concepto base se podrán seleccionar, a criterio del diseñador, los principios de solución asociados a cada función que serán considerados para la generación de las combinaciones posibles, las cuales representan la población de variantes de solución para la tarea de diseño conceptual en estudio. Las variantes de solución generadas son mostradas en pantalla mediante un código alfanumérico que representa la función y el principio de solución correspondiente; también, se muestra un

esquema dinámico con los pesos de ponderación de cada principio de solución, según corresponda al caso de estudio. La información de salida genera de forma automática un documento de extensión rtf con las funciones, los principios de solución y los requerimientos asociados al concepto seleccionado.

SINCOS

Permite el análisis de las combinaciones de los principios de solución contenidos en la matriz morfológica. La información de entrada para el uso de este software será introducida por el usuario en un archivo de extensión txt, que contendrá en forma de listas la información de los valores correspondientes a los indicadores de eficiencia de cada principio de solución asociado a cada función del caso de estudio en análisis.

La explotación del software se realiza cuando al usuario introduce los pesos relativos a partir de los cuales se evalúan los criterios de diseño y se analizan la influencia de los indicadores de eficiencia para la función objetivo. La información de salida se visualiza en los resultados. En estos el sistema genera de forma automática una representación de los mejores conceptos analizados y los muestra en la pantalla principal de AutoCAD, en forma de matrices morfológicas; la información resultante puede ser guardada en un archivo de extensión dwg.

3.6.3. Implementación de las herramientas informáticas desarrolladas en el método propuesto

El soporte para la implementación del conjunto de herramientas informáticas contenidas en el software CODISE-TZR, se sustenta en un entorno CAD. Dichas herramientas están concebidas para ser ejecutadas desde el sistema operativo Microsoft Windows 7, sobre el programa de diseño gráfico Autodesk® AutoCAD®, concretamente en su versión R18.2. El nombre oficial de este programa es AutoCAD 2012 y fue lanzado en marzo de 2011. El lenguaje de programación utilizado es AutoLISP, una derivación del lenguaje Lisp que se usa para generar rutinas orientadas hacia su uso específico en AutoCAD. Para la creación de los diálogos se utilizó el editor visual de diálogos OpenDCL Studio 8.0.1.0., el cual es un software libre, concebido para la creación de interfaces para AutoCAD y desarrollado por OpenDCL Consortium. La compilación y corrida del software CODISE-TZR, se realiza desde la consola Visual LISP, la cual se encuentra integrada a AutoCAD.

El código implementado permite la ejecución de programas exteriores al entorno CAD. Tal es el caso de la aplicación WOS Portable II, software libre para redes informáticas utilizado como plataforma integrada de elementos del sistema operativo Microsoft Windows. Dicho software contiene el servidor Apache HTTP Server, desarrollado por Apache Software Foundation. El gestor de bases de datos MySQL Server (Version 5.0.45), fue creado por MySQL AB y el lenguaje PHP con el PHP5 de PHP Group (Version 5.2.5). La herramienta CODISE-TZR hace uso del servidor WOS Portable II para la ejecución de la aplicación GRProyect; la misma está constituida por una página Web encargada de la gestión del cuestionario Kano.

La información manejada por las herramientas computacionales desarrolladas se vinculan a estructuras de las BD para el caso de GRProyect. El motor de almacenamiento usado para el manejo de los datos asociados a los usuarios, proyectos, requerimientos y encuestas, se manejan desde una BD estructurada en MySQL y su acceso

e intercambio de información se establece mediante la aplicación WOS Portable II. En el caso de los programas CADProcessDesigner, GECOND y SINCOS, las entradas y salidas para el intercambio de la información se realiza en archivos estructurados en forma de listas que son procesadas por AutoLISP y constituyen las BD de estas aplicaciones.

En los datos utilizados para la implementación del software SINCOS, se tiene en cuenta que cada componente del diseño agrupa en sí todas las funciones, donde cada una aporta una solución y cada función tiene, en cada solución, valores que distinguen su influencia en el conjunto de los indicadores de eficiencia. En calidad de función objetivo se utiliza la de valor de Múltiple Criterio Z (3.26) que toma en cuenta la distancia de Tchebysheff aumentada (Arzola, 2000; Hechavarría, 2009; Lastre, 2010; Simeón, 1999).

$$Z = \max_{1 \leq v \leq n} W_i \frac{|Y_v - Y_{id}|}{|Y_{id}|} + \sum_{v=1}^n 0,001 \frac{|Y_v - Y_{id}|}{|Y_{id}|} \quad (3.26)$$

En el caso de estudio del molino de cuchillas existen tres indicadores de eficiencia comprendidos por: costo (Co), consumo eléctrico (El) y productividad (Pr). Cada función n , con la solución m , aporta un valor $Conm$, Elm y $Prnm$. El valor de cada Y_{id} se determina por la ecuación (3.27) para los indicadores de consumo eléctrico y productividad; en el caso del costo, se asume la cantidad de funciones como $n = 1$. Esto permite obtener los valores $Coid$, $Elid$ y $Prid$:

$$Y_{id} = \frac{\sum_{v=1}^n \min_{1 \leq j \leq m} Y_{ij}}{n} \quad (3.27)$$

Por su parte, Y_v también tomará el valor promedio de la suma de los valores Y_{ij} de la variante analizada. Cada variante de solución de diseño tendrá un valor Z con tendencia a 0 a medida que la solución sea más eficiente, y dependerá de los valores de pesos W_i asignados por el usuario. La suma de los W_i siempre es 1. Para este análisis, la aplicación informática, a partir de los pesos asignados, realiza una evaluación cuyos resultados se representan en el entorno gráfico de AutoCAD.

Las soluciones generadas a partir de la matriz morfológica se codifican numéricamente para su mejor estudio y análisis, lo que permite identificar las soluciones y la descripción de la variante seleccionada, con la representación de la combinación de los principios de solución y su correspondiente esquema conceptual. Esta estructura de datos permite el manejo computacional de la trazabilidad de los requerimientos funcionales desde su definición por el usuario hasta su implementación en la solución conceptual del producto.

3.7. Conclusiones del capítulo

Los aspectos descritos en este capítulo, con el fin de desarrollar un método que permita la evaluación de conceptos en el diseño mecánico de productos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales, evidencian que mediante los mismos:

- Se desarrolló un método sistemático en el diseño conceptual que incluyó la propuesta de una nueva etapa denominada **especificación cualitativa**, la cual permite articular el proceso de trazabilidad desde la definición de los requerimientos funcionales hasta la evaluación de los conceptos. Constituye este un aporte al modelo clásico del proceso de diseño de Pahl y Beitz.
- Se propuso la conceptualización de los estadios fundamentales de información por los que transitan los requerimientos funcionales en el método sistemático propuesto desde su definición hasta la evaluación conceptual. Estos son: **estadio conceptual evolutivo primario**, **estadio conceptual evolutivo funcional** y **estadio conceptual básico**. Los mismos permiten la conceptualización del tránsito de la información más abstracta hacia una más concreta en el proceso de diseño.
- Se desarrolló un método denominado **método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional**. Este método tiene por objetivo la captura, estructuración, estratificación y encapsulación de los requerimientos funcionales en la estructura funcional. Facilita la trazabilidad de los requerimientos funcionales y garantiza, de esta forma, un primer proceso de transformación de los requerimientos, orientado a la síntesis de soluciones y a la evaluación conceptual de variantes de solución.
- Se desarrolló un método para garantizar la **síntesis guiada de soluciones acumulativas** con el objetivo de conceptualizar la transformación de la información desde el nivel funcional hasta el nivel de soluciones conceptuales. Este método le garantiza un segundo proceso de transformación de los requerimientos funcionales para favorecer el proceso de toma de decisiones en la síntesis de soluciones y en la evaluación de conceptos.
- Se desarrollaron un conjunto de herramientas computacionales, en un entorno CAD, que permitieron el proceso de generación, selección y evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Dichas herramientas facilitan al diseñador la exploración del campo de soluciones a partir de la generación automática de conceptos en función de los requerimientos funcionales.

4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS RESULTADOS, CASOS DE ESTUDIO Y VALIDACIÓN PRÁCTICA

4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS RESULTADOS, CASOS DE ESTUDIO Y VALIDACIÓN PRÁCTICA

En este capítulo se presentan los resultados de la validación del método sistemático que facilita la toma de decisiones en la evaluación de conceptos, teniendo en cuenta la estructuración de las relaciones entre cada una de las sub-etapas del diseño conceptual, y la estratificación y trazabilidad de los requerimientos funcionales. Los casos de estudio que aquí se presentan se desarrollaron en la Empresa Central de Talleres Agropecuarios “26 de Julio”, de Bayamo (ECTA “26 de Julio”), denominada en la actualidad “Empresa de Logística Agropecuaria “26 de Julio” Granma” (ELA “26 de Julio”). La misma se encuentra subordinada al Grupo Empresarial de Logística del Ministerio de la Agricultura (GELMA), perteneciente a la Provincia de Granma. Se desarrollarán, por su importancia, los resultados correspondientes al caso de estudio del diseño conceptual de un molino de cuchillas, mientras que los resultados de los otros dos casos que validan la investigación (un molino de viento (Anexo 5) y un fogón eficiente para biomasa (Anexo 6)) se ubicarán en los anexos.

4.1. Caso de estudio del diseño conceptual de un molino de cuchillas

A partir del análisis realizado en el acápite 2.4.1 del capítulo 2, donde se evidencia la falta de un proceso de estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales en los modelos prescriptivos clásicos; en esta sección se presentan los resultados correspondientes a la propuesta de solución para la estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales, descrita en el acápite 3.3.1 del capítulo 3. Los resultados obtenidos constituyen una alternativa para la toma de decisiones en la evaluación conceptual a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales para el diseño conceptual de un molino de cuchillas.

4.1.1. Captura y representación de los requerimientos funcionales del molino de cuchillas

Al iniciar el diseño de un producto con la planificación y clarificación de tareas, se realiza un análisis del problema con el objetivo de determinar las especificaciones del mismo. En este análisis los diseñadores recopilan la información proveniente de los usuarios, de las normativas vigentes relacionadas con el producto a desarrollar, así como de los modelos similares disponibles en el mercado. Atendiendo a lo planteado en el capítulo 2, esta información permite agrupar las funciones, características, prestaciones y condiciones del entorno del producto. Una vez obtenida esta información se procede a establecer las especificaciones.

En la tabla 4.1 se muestra un listado de requerimientos funcionales para el diseño de un molino de cuchillas según el método tradicional. Aquí se observa claramente la tendencia a una especificación no estratificada y no

evolutiva de los requerimientos, que permite su trazabilidad, pues los mismos no están dispuestos de una manera estructurada que admita su agrupación en conjuntos y su posterior análisis cualitativo. Este último permite identificar, y le indica al diseñador, la percepción que los usuarios tienen sobre los requerimientos a partir del grado de satisfacción o insatisfacción que ellos generan al estar presentes o no en el diseño del producto.

Tabla 4.1. Listado de requerimientos funcionales para el diseño de un molino de cuchillas.

No. Concepto	Requerimiento	N\D	Descripción	Naturaleza
1 Funciones	Molinado de granos	Necesidad	Acción del molino de triturar los granos	Cualitativo
2 Funciones	Molinado de los tallos de las plantas	Deseo	Acción del molino de triturar los tallos de las plantas	Cualitativo
3 Geometría	Altura máxima del molino (mm)	Necesidad	Altura total del molino	Cuantitativo
4 Geometría	Diámetro del cuerpo del molino (mm)	Necesidad	Diámetro mayor del cuerpo del molino	Cuantitativo
5 Geometría	Volumen de la tolva (m3)	Necesidad	Capacidad total de la tolva	Cuantitativo
6 Fuerzas y momentos	Potencia del motor (W)	Necesidad	Potencia del motor instalado	Cuantitativo
7 Energía	Molino accionado por un motor eléctrico	Deseo	Fuente de potencia del molino	Cualitativo
8 Materiales	Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste	Deseo	Construir las cuchillas y contracuchillas de un material resistente al desgaste	Cualitativo
9 Ensamble	Rotor de 5 cuchillas	Necesidad	Número de cuchillas del rotor	Cuantitativo
10 Ensamble	Contracuchillas regulables	Deseo	Posibilidad de regular las contracuchillas	Cualitativo
11 Ensamble	Rompedores de granos fijos	Deseo	Rompedores de granos fijos al cuerpo del molino	Cualitativo
12 Ensamble	Malla perforada según la granulometría a obtener	Deseo	Diferentes tipos de mallas en el tamiz	Cualitativo
13 Ensamble	Protección del molino contra la corrosión	Deseo	Proteger las piezas y partes del molino expuestas a la corrosión	Cualitativo
14 Modularidad	Rotor, contracuchillas y rompedores intercambiables	Deseo	Poder intercambiar el rotor, las contracuchillas y los rompedores	Cualitativo
15 Modularidad	Tolva desmontable	Deseo	Poder desmontar la tolva	Cualitativo
16 Mantenimiento	Garantía de piezas de repuesto	Deseo	Disponer de piezas de repuesto	Cualitativo
17 Mantenimiento	Los pedestales deben ser engrasados regularmente	Necesidad	Engrasar regularmente los pedestales	Cualitativo
18 Mantenimiento	Los tornillos deben ser apretados regularmente	Necesidad	Apretar regularmente los tornillos	Cualitativo

Los datos de la tabla 4.1 con los requerimientos funcionales para el diseño de un molino de cuchillas, se expresan matemáticamente a través de la siguiente matriz de requerimientos funcionales (ϕ) representada por la expresión (4.1).

$$\phi = \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} & \text{"Molinado de granos"} & \text{"Necesidad"} & \text{"Acción del molino de triturar los granos"} & \text{"Cualitativo"} \\ \text{"Funciones"} & \text{"Molinado de los tallos de las plantas"} & \text{"Deseo"} & \text{"Acción del molino de triturar los tallos de las plantas"} & \text{"Cualitativo"} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{"Mantenimiento"} & \text{"Los tornillos deben ser apretados regularmente"} & \text{"Necesidad"} & \text{"Apretar regularmente los tornillos"} & \text{"Cualitativo"} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

La matriz de requerimientos funcionales (ϕ) define que los requerimientos del molino de cuchillas relacionan conceptos relativos a las funciones propias del molino, a la geometría, al ensamble y al mantenimiento.

4.1.2. Estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales del molino de cuchillas a través de la aplicación del método Kano

Una vez definida la matriz de requerimientos funcionales (ϕ), se obtiene la estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales. Los niveles de estratificación de los requerimientos funcionales cualitativos se determinan a través de la aplicación del método Kano, descrito en capítulo 2, acápite 2.5. Sus resultados permitieron lograr la estratificación de los requerimientos, procedimiento descrito en el capítulo 3, epígrafe 3.3.1.

Niveles de estratificación de los requerimientos funcionales cualitativos

El método Kano se basa en la aplicación de un cuestionario a los usuarios. Para el caso del molino de cuchillas, fueron realizadas 21 encuestas a usuarios (ver Anexo 7), seleccionados entre un grupo de pobladores de comunidades rurales ubicadas en los municipios Bartolomé Masó, Guisa y Jiguaní, en la provincia Granma. El tamaño de la muestra se considera adecuado para los intereses de este trabajo.

Los resultados se presentan en forma resumida porque la información obtenida en la sección del método Kano es demasiado extensa. Para sintetizar los mismos, se incluye primeramente un mapa de respuestas en forma de tablas, donde aparece la concentración de las respuestas obtenidas en cada uno de los requerimientos evaluados y se realiza una comprobación de la validez estadística de los resultados alcanzados. Por último, se lleva a cabo la clasificación de los requerimientos según los resultados obtenidos. Estos requerimientos clasificados serán posteriormente asociados a las estructuras funcionales afines, para el caso particular del diseño del molino de cuchillas.

Clasificación de los requerimientos según el resultado de las encuestas

El análisis del mapa de respuestas permite construir la tabla 4.2, la cual se corresponde con la clasificación de los requerimientos en las categorías descritas por Kano. La clasificación de los requerimientos se obtiene por simple mayoría. El significado de los encabezados de las columnas corresponden a la clasificación otorgada: A, Atractivos; O, Obligatorios; U, Unidimensionales; Inv., Pregunta inversa; D, Pregunta dudosa; T, Total de respuestas; C, Clasificación del requerimiento para la muestra de las 21 encuestas realizadas a los usuarios seleccionados en el estudio exploratorio.

Prueba estadística de los requerimientos clasificados

Es adecuado contar con una prueba estadística que permita evaluar varios aspectos como: lo significativo de la clasificación de Kano, los valores de la diferencia absoluta ($Abs(a - b)$) y los valores del parámetro estadístico (Q). Estos datos se presentan en las dos columnas de la tabla 4.3. De las 18 preguntas, 17 presentan valores de $Abs(a - b) > (Q)$ y, por lo tanto, hay diferencias significativas entre las dos clasificaciones más frecuentes

de cada pregunta. Otras como la 6, con un valor de $Abs(a - b) = 13 > 5,75$, presentan una clasificación de requerimiento unidimensional estadísticamente significativa. Prosiguiendo con este análisis, resulta que el 94 % de las preguntas evidencian una clasificación estadísticamente significativa.

Tabla 4.2. Clasificación de los requerimientos obtenida con la tabla de Kano.

No.	Requerimiento	A	O	U	I	Inv.	D	T	C
1	Molinado de granos	4	0	17	0	0	0	21	U
2	Molinado de los tallos de las plantas	3	1	13	2	2	0	21	U
3	Altura máxima del molino (mm)	4	3	12	2	0	0	21	U
4	Diámetro del cuerpo del molino (mm)	2	5	14	0	0	0	21	U
5	Volumen de la tolva (m3)	5	11	4	1	0	0	21	O
6	Potencia del motor (W)	2	3	16	0	0	0	21	U
7	Molino accionado por un motor eléctrico	4	4	12	1	0	0	21	U
8	Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste	5	3	13	0	0	0	21	U
9	Rotor de 5 cuchillas	11	2	4	4	0	0	21	A
10	Contracuchillas regulables	14	1	5	1	0	0	21	A
11	Rompedores de granos fijos	4	12	5	0	0	0	21	O
12	Malla perforada según la granulometría a obtener	14	1	6	0	0	0	21	A
13	Protección del molino contra la corrosión	5	2	13	1	0	0	21	U
14	Rotor, contracuchillas y rompedores intercambiables	13	1	5	2	0	0	21	A
15	Tolva desmontable	7	0	14	0	0	0	21	U
16	Garantía de piezas de repuesto	4	1	16	0	0	0	21	U
17	Los pedestales deben ser engrasados regularmente	5	0	2	2	12	0	21	Inv.
18	Los tornillos deben ser apretados regularmente	5	1	1	2	12	0	21	Inv.

Tabla 4.3. Valores obtenidos para el parámetro estadístico Q y para la diferencia absoluta $Abs(a - b)$ en la encuesta a usuarios.

No.	Requerimiento	Q	Abs (a-b)	Sig.Est.
1	Molinado de granos	6,04	< 13	Si
2	Molinado de los tallos de las plantas	5,61	< 10	Sí
3	Altura máxima del molino (mm)	5,82	< 8	Sí
4	Diámetro del cuerpo del molino (mm)	6,17	< 8	Sí
5	Volumen de la tolva (m3)	6,02	> 6	No
6	Potencia del motor (W)	5,75	< 13	Sí
7	Molino accionado por un motor eléctrico	5,82	< 8	Sí
8	Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste	6,17	< 8	Sí
9	Rotor de 5 cuchillas	5,74	< 7	Sí
10	Contracuchillas regulables	6,23	< 9	Sí
11	Rompedores de granos fijos	6,11	< 7	Sí
12	Malla perforada según la granulometría a obtener	6,51	< 8	Sí
13	Protección del molino contra la corrosión	6,17	< 8	Sí
14	Rotor, contracuchillas y rompedores intercambiables	6,17	< 8	Sí
15	Tolva desmontable	6,79	< 7	Sí
16	Garantía de piezas de repuesto	6,02	< 12	Sí
17	Los pedestales deben ser engrasados regularmente	6,11	< 7	Sí
18	Los tornillos deben ser apretados regularmente	6,11	< 7	Sí

Análisis de las respuestas al cuestionario Kano

En la tabla 4.4 se indican, las tres clasificaciones más frecuentes de cada requerimiento. La columna de la importancia promedio permite evaluar, en una escala de 0 a 1, la percepción de la importancia que el requerimiento funcional tiene para el usuario.

Junto con la información de clasificación se ofrecen los resultados de la evaluación de los requerimientos en función del incremento de la satisfacción o bien, el decremento de ella, debido a la inclusión o no del requerimiento como característica del producto. En la tabla 4.4 aparecen en la columna denominada “Mejor” y “Peor” respectivamente.

Tabla 4.4. Resultados concentrados para los requerimientos obtenidos en la encuesta a usuarios.

No.	A	O	U	I	Inv.	D	T	P	S	Tr	Imp.	Mejor	Peor	C1	C2	Clasif.
1	4	0	17	0	0	0	21	U	A		0,95	1,00	-0,81	0,95	0,77	U
2	3	1	13	2	2	0	21	U	A		0,82	0,84	-0,74	0,69	0,60	U
3	4	3	12	2	0	0	21	U	A	O	0,80	0,76	-0,71	0,61	0,57	U
4	2	5	13	0	0	0	21	U	O	A	0,87	0,75	-0,90	0,65	0,78	U
5	5	11	4	1	0	0	21	O	A	U	0,83	0,43	-0,71	0,36	0,60	O
6	2	3	16	0	0	0	21	U	O	A	0,88	0,86	-0,90	0,75	0,79	U
7	4	4	12	1	0	0	21	U			0,90	0,76	-0,76	0,68	0,68	U
8	5	3	13	0	0	0	21	U	A	O	0,93	0,86	-0,76	0,80	0,71	U
9	11	2	4	4	0	0	21	A			0,79	0,71	-0,29	0,57	0,23	A
10	14	1	5	1	0	0	21	A	U		0,85	0,90	-0,29	0,76	0,24	A
11	4	12	5	0	0	0	21	O	U	A	0,80	0,43	-0,81	0,34	0,65	O
12	14	1	6	0	0	0	21	A	U	O	0,89	0,95	-0,33	0,85	0,30	A
13	5	2	13	1	0	0	21	U	A	O	0,83	0,86	-0,71	0,71	0,60	U
14	13	1	5	2	0	0	21	A	U	I	0,76	0,86	-0,29	0,65	0,22	A
15	7	0	14	0	0	0	21	U	A		0,83	1,00	-0,67	0,83	0,55	A
16	4	1	16	0	0	0	21	U	A	O	0,91	0,95	-0,81	0,87	0,74	U
17	5	0	2	2	12	0	21	Inv.	A		0,85	0,78	-0,22	0,66	0,19	A
18	5	1	1	2	12	0	21	Inv.	A		0,79	0,67	-0,22	0,52	0,17	A

Gráficamente, los resultados de la tabla 4.4 se representan en la Figura 4.1. En esta ilustración se pueden apreciar las consecuencias que pudiera tener el incorporar o no una característica del producto. Al concebirlo, la presencia de un requerimiento puede influir en la satisfacción del usuario, o en el caso de su omisión, generar el descontento o la insatisfacción del mismo.

Al realizarse este análisis a los requerimientos funcionales, se logra un primer estudio cualitativo orientado a estratificarlos, lo cual permitirá una mejor comprensión de las necesidades del usuario. Es este uno de los pasos que conforma el modelo expuesto en el capítulo anterior e inicia la estratificación de los requerimientos.

Si en el análisis del gráfico Kano tomamos en consideración los valores de la importancia promedio del requerimiento percibida por el usuario; al combinarla con los valores de “Mejor que” y “Peor que”, se obtendrán los valores de (C1) y (C2), lo que originará un reordenamiento de los requerimientos en el gráfico Kano.

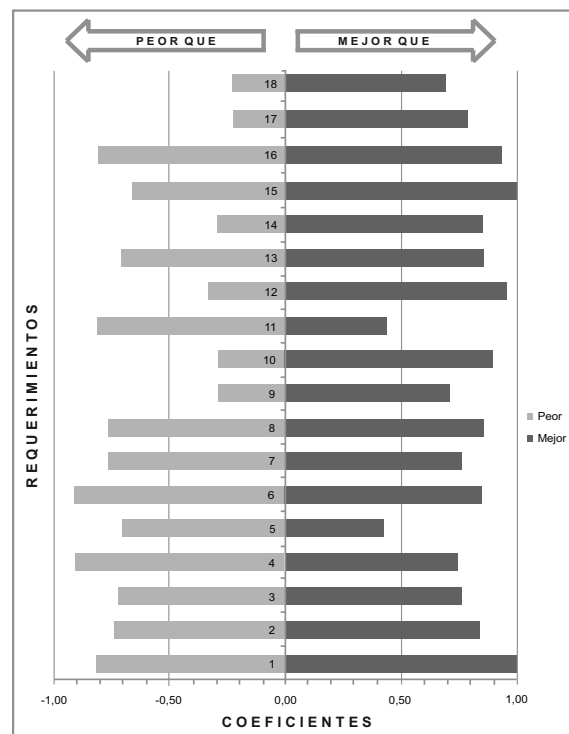


Figura 4.1. Valores obtenidos para cada requerimiento en la encuesta. Clasificación en “Mejor que” y “Peor que”.

Este reordenamiento permite disponer de un análisis más completo de los requerimientos a considerar para el diseño conceptual del producto (Figura 4.2). De esta forma, se obtiene la articulación de los requerimientos funcionales por grupos a partir de su paso por los diferentes estratos, por los que se filtran. La ecuación 4.2 expresa la sumatoria de cada uno de los estratos a partir de los resultados de la figura 4.2.

$$CE_i = (9 + 10 + 12 + 14 + 15 + 1 + 18) + (1 + 2 + 3 + 4 + 6 + 7 + 8 + 13 + 16) + (5 + 11) \quad (4.2)$$

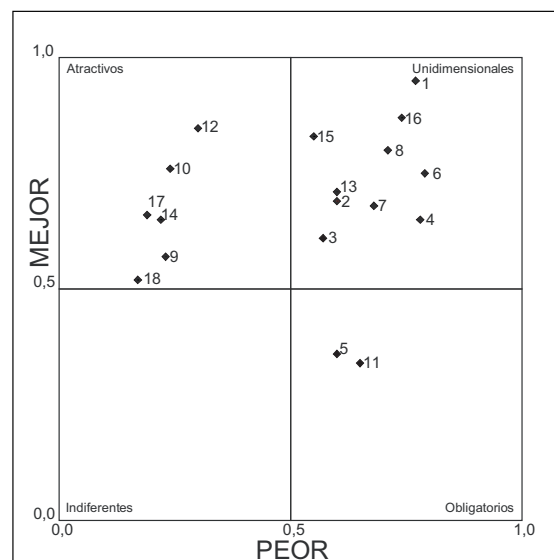


Figura 4.2. Gráfico de clasificación de los requerimientos en base a los resultados obtenidos para los valores de C1 y C2 contenidos en la tabla 4.4.

Con respecto a la distribución de las diferentes combinaciones de requerimientos funcionales realizadas a partir de los requerimientos agrupados en el gráfico Kano, de un total de 18, fueron catalogados 10 como unidimensionales, 6 como atractivos y 2 como obligatorios. Partiendo de esto, se puede realizar una clasificación de los tipos de productos que pueden ser ofrecidos, caracterizando un diseño conceptual para un producto como básico, esperado o ampliado.

Es posible distinguir entre producto básico, producto esperado, producto ampliado y potencial, teniendo muy claro que estos conceptos son dinámicos. La distribución de los requerimientos relativos al molino de cuchillas y el enunciado de sus características, junto a la clasificación asignada para el caso del comportamiento de un producto básico, son presentados en la figura 4.3(a); el caso de un producto esperado se muestra en la figura 4.3(a+b).



Figura 4.3. Clasificación de los requerimientos en base a un producto básico (a) , esperado (a+b) y ampliado (a+b+c).

Como se observa para el caso de un molino de cuchillas esperado, el método Kano le comunica al diseñador el agrupamiento de los requerimientos o necesidades que debe cumplir este tipo de producto. En la definición conceptual de la especificación para el molino de cuchillas, la aplicación de los conceptos definidos por el método Kano facilita la estructuración y estratificación de los requerimientos y, a la vez, proporciona una ayuda en la toma de decisiones por parte del diseñador en esta etapa del proceso de diseño. En la figura 4.3 (a+b+c) se muestra la distribución de los requerimientos relativos a la clasificación para el caso del comportamiento de un producto ampliado.

Los gráficos obtenidos permiten la clarificación y estratificación de los requerimientos de los usuarios en función de sus cualidades para el caso del diseño conceptual del molino de cuchillas. En el Anexo 8 se muestra un listado con la distribución de los requerimientos y el enunciado de sus características junto a la clasificación asignada al producto.

La información comprendida desde la definición de los requerimientos funcionales iniciales hasta la obtención

del análisis de los mismos por el método Kano, constituye la base del **estadio conceptual evolutivo primario**. Es el primer proceso de transformación de la información en el modelo propuesto y se expresa a través de la estratificación de los requerimientos en la etapa de especificación cualitativa propuesta (Figura 3.5, Capítulo 3). Una vez establecidas las cualidades de los requerimientos, obtenidas a partir de método Kano, se definen los vectores (K_n) los cuales contienen la información descrita en la fila (i) de la matriz (ϕ) y la información relacionada con la cualidad determinada para el requerimiento, en base a su evaluación.

Las expresiones agrupadas en (4.3) contienen los diferentes vectores (K_n) obtenidos para los 18 requerimientos del caso en estudio del molino de cuchillas. Los vectores (K_n) permiten al diseñador aislar cada uno de los requerimientos del producto para su mejor análisis; pero, al mismo tiempo, se logra mantener agrupada, en la estructura del vector, toda la información disponible relativa al requerimiento aislado.

$$K_1 = \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} \\ \text{"Molinado de granos"} \\ \text{"Necesidad"} \\ \text{"Acción del molino de triturar los granos"} \\ \text{"Cualitativo"} \\ \text{"U"} \end{bmatrix}^T \quad K_2 = \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} \\ \text{"Molinado de los tallos de las plantas"} \\ \text{"Deseo"} \\ \text{"Acción del molino de triturar los tallos de las plantas"} \\ \text{"Cualitativo"} \\ \text{"U"} \end{bmatrix}^T \quad K_3 = \begin{bmatrix} \text{"Geometría"} \\ \text{"Altura máxima del molino (mm)"} \\ \text{"Necesidad"} \\ \text{"Altura total del molino"} \\ \text{"Cuantitativo"} \\ \text{"U"} \end{bmatrix}^T \quad (4.3)$$

Los vectores (K_n) obtenidos se representan en una matriz ampliada de requerimientos funcionales (ϕ_A), representada en la expresión (4.3). Esta matriz permite tener agrupados los requerimientos del molino de cuchillas y los criterios de evaluación definidos para los mismos. Dichos criterios están contenidos en el vector ($C\phi_A$) definido en (4.4), el cual representa el conjunto de cualidades de cada uno de los requerimientos funcionales del molino de cuchillas.

Si bien, como se planteó anteriormente, los vectores (K_n) permiten aislar los requerimientos del producto para su análisis individual, también resulta oportuno tenerlos agrupados para un análisis integral; en este sentido, la matriz ampliada de requerimientos funcionales (ϕ_A) permite agruparlos y poder evaluarlos en su conjunto y así disponer de una acumulación estructurada de la información del producto.

$$\phi_A = \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} & \text{"Molinado de granos"} & \text{"Necesidad"} & \text{"Acción del molino de triturar los granos"} & \text{"Cualitativo"} & \text{"U"} \\ \text{"Funciones"} & \text{"Molinado de los tallos de las plantas"} & \text{"Deseo"} & \text{"Acción del molino de triturar los tallos de las plantas"} & \text{"Cualitativo"} & \text{"U"} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{"Mantenimiento"} & \text{"Los tornillos deben ser apretados regularmente"} & \text{"Necesidad"} & \text{"Apretar regularmente los tornillos"} & \text{"Cualitativo"} & \text{"A"} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$C\phi_A = \begin{bmatrix} U & U & U & U & O & U & U & U & A & A & O & A & U & A & A & U & A \end{bmatrix}^T \quad (4.5)$$

Al analizar la información brindada por la matriz (ϕ_A), se aprecia el predominio de requerimientos orientados al ensamble. Estos están relacionados con el rotor, las cuchillas, las contracuchillas y la regulación. Dichos

requerimientos constituyen deseos de los usuarios para el diseño y poseen, en su mayoría, cualidades atractivas. Esto indica que deben ser incluidos de las propuestas de diseño conceptuales, pues los usuarios esperan que tales requerimientos estén presentes en el producto final.

La matriz indica que, en el caso de los requerimientos relacionados con el mantenimiento, el requerimiento de “los pedestales deben ser engrasados regularmente” obedece a una necesidad de naturaleza cualitativa y con la cualidad atractiva de engrasar regularmente los pedestales. Por su parte, el relacionado con “Molinado de los tallos de las plantas”, obedece a un deseo manifiesto de los usuarios de que el diseño tenga en cuenta la acción del molino de triturar los tallos de las plantas. Este requerimiento tiene una naturaleza cualitativa y cualidades que lo definen como unidimensional. Esto indica que, su presencia en las propuestas conceptuales de diseño, incorporará esta función al producto final.

El vector de cualidades (C_{ϕ_A}) permite aislar e identificar las cualidades predominantes en los requerimientos a implementar, dentro de las propuestas conceptuales de diseño. En el molino de cuchillas se evidencia que la mayoría de los requerimientos tienen cualidades unidimensionales y existe un grupo de requerimientos atractivos (9, 10, 12, 14, 17 y 18) que potencian la novedad del molino con respecto a otros productos similares disponibles en el mercado. Los referidos requerimientos hacen del molino un producto atractivo que está dotado de un rotor de cinco cuchillas; dispone de contracuchillas regulables; tiene una malla perforada según la granulometría a obtener; el rotor, las contracuchillas y los rompedores son intercambiables; sus pedestales deben ser engrasados y los tornillos apretados regularmente.

Una vez realizada la definición, estructuración, estratificación y representación de los requerimientos, el siguiente paso consiste en la transformación de los mismos en una estructura funcional, realizada de acuerdo a lo planteado en el procedimiento descrito en el capítulo 3.

Estructura funcional con cualidades incorporadas para el molino de cuchillas

A partir de los preceptos metodológicos definidos en el capítulo anterior, en este paso se determina la estructura funcional del molino de cuchillas. En los modelos funcionales prescriptivos y siguiendo el procedimiento propuesto en esta investigación y expuesto en la figura 3.10 del capítulo 3, se determina la función global del molino, a partir del conocimiento del análisis cualitativo de los requerimientos funcionales.

La función global del molino de cuchillas “Triturar” representa la tarea global que realiza el producto y se establece como una caja negra que relaciona los flujos de entrada y los de salida. Esta representación es muy esquemática y, a menudo, hay que dividir la función global en sub-funciones (o sub-tareas) y establecer las relaciones de flujos entre ellas (productos complejos) (ver Figura 4.4 (a)).

En la forma tradicional, y siguiendo el procedimiento de Stone y Wood (2000) y Stone *et al.* (2000), la función global tiene como entrada de materiales los granos (Figura 4.4 (a)), como energía se define la eléctrica y como señal, la acción del operario. En la salida hay un flujo de materiales caracterizado por la salida de los granos triturados. A diferencia del modelo de Stone, en esta investigación se definen los modos de operación

del producto. Para el caso del molino de cuchillas se establecen dos modos de operación: (a) modo de operación principal y (b) modo de operación auxiliar. Para cada caso se constituyen las cadenas de sub-funciones, las cuales se muestran en la figura 4.4 (b) y (c).

En el caso del modo de operación principal (ver Figura 4.4 (b)), la cadena de sub-funciones está compuesta por cuatro funciones, descritas como: “Conectar molino”, “Abastecer tolva”, “Triturar granos” y “Tamizado de los granos”. Para cada una de estas funciones se definen los flujos de entrada y salida. Dado que el modo de operación principal es una derivación en sub-funciones de la función global, los flujos entrantes de la cadena de sub-funciones del modo de operación principal corresponden a los flujos de la función global. Los flujos salientes están determinados por un flujo de material consistente en granos tamizados, un flujo de energía térmica (calor) y el flujo de señales (ruido).

Como etapa final del procedimiento propuesto, las diferentes cadenas funcionales obtenidas para cada uno de los flujos de entrada del molino de cuchillas, se superponen en un solo modelo. Este paso, de ser necesario, puede requerir agregar nuevas sub-funciones o flujos. En la Figura 4.4 (d) se muestra el modelo integrado para el caso que se analiza. La cadena de sub-funciones correspondientes a la modelación funcional del molino se encuentra definida por las funciones del modo de operación principal y el auxiliar. Los flujos de entrada y salida de la cadena de sub-funciones del modelo integrado consisten en los flujos de materiales, energía y señales del modo de operación principal.

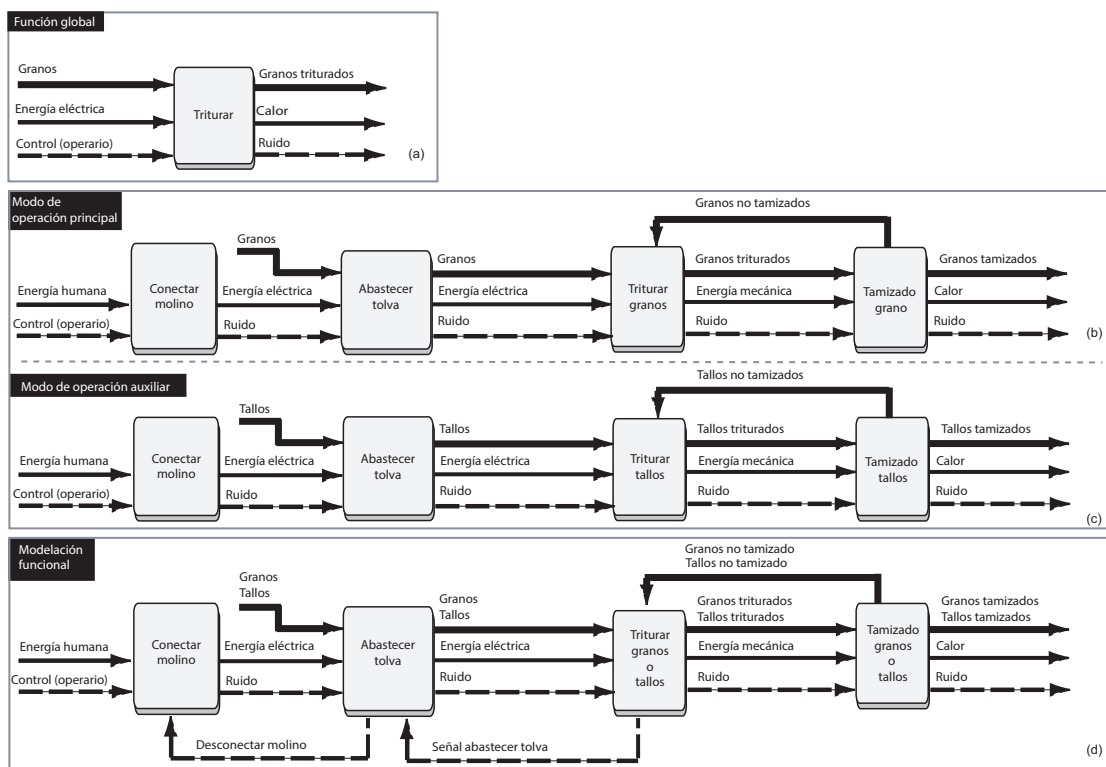


Figura 4.4. Determinación de la estructura funcional del molino de cuchillas.

La trazabilidad de la representación funcional final del molino se evidencia en una matriz de funciones cualitativas (M_{fc}), representada en la expresión (4.6). En la primera columna de la matriz está identificado el conjunto de sub-funciones (fn); en la segunda columna se incluye la matriz ampliada de requerimientos funcionales (ϕ_{An}), la cual se expresa en la ecuación (4.6) y es obtenida a partir de los vectores (K_n) asociados a cada función; las restantes columnas contienen los flujos de entrada (flen) y de salida (flsn) de las funciones del molino.

$$M_{fc} = \begin{bmatrix} \text{"Conectar molino"} & \phi_{A1} & \begin{matrix} \text{"Control (operario)"} \\ \text{"Energía humana"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Ruido"} \\ \text{"Energía eléctrica"} \end{matrix} \\ \text{"Abastecer tolva"} & \phi_{A2} & \begin{matrix} \text{"Granos"} \\ \text{"Tallos"} \\ \text{"Ruido"} \\ \text{"Energía eléctrica"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Granos"} \\ \text{"Tallos"} \\ \text{"Ruido"} \\ \text{"Desconectar molino"} \\ \text{"Energía eléctrica"} \end{matrix} \\ \text{"Triturar granos o tallos"} & \phi_{A3} & \begin{matrix} \text{"Granos"} \\ \text{"Tallos"} \\ \text{"Granos no triturados"} \\ \text{"Tallos no triturados"} \\ \text{"Energía eléctrica"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Granos triturados"} \\ \text{"Tallos triturados"} \\ \text{"Ruido"} \\ \text{"Señal de abastecer tolva"} \\ \text{"Energía mecánica"} \end{matrix} \\ \text{"Tamizado granos o tallos"} & \phi_{A4} & \begin{matrix} \text{"Granos no triturados"} \\ \text{"Tallos no triturados"} \\ \text{"Ruido"} \\ \text{"Energía mecánica"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Granos tamizados"} \\ \text{"Tallos tamizados"} \\ \text{"Granos no triturados"} \\ \text{"Tallos no triturados"} \\ \text{"Ruido"} \\ \text{"Calor"} \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

El análisis de la matriz (M_{fc}) del molino permite secuenciar la trazabilidad de los requerimientos relativos a la sub-función (f1), la cual consiste en "Conectar molino". La matriz (ϕ_{A1}) contiene los vectores (K6), (K7), (K13), y (K16), asociados a esta sub-función. El flujo de entrada es "Control (operario)" y "Energía humana", y el flujo de salida es "Ruido" y "Energía eléctrica". De forma análoga se determinan las restantes matrices (ϕ_{A2}), (ϕ_{A3}) y (ϕ_{A4}).

$$\phi_{A1} = \begin{bmatrix} K_6 & K_7 & K_{13} & K_{16} \end{bmatrix}^T \quad (4.7)$$

Poder disponer de la matriz de funciones cualitativas (M_{fc}) del molino de cuchillas, permite extraer de esta el vector de las funciones con cualidades para la trazabilidad (ξ_1). Dicho vector, para el caso del molino de cuchillas, se expresa en la ecuación (4.8) y se deriva de la matriz (M_{fc}), que contiene los restantes vectores (ξ_2), (ξ_3) y (ξ_4). Estos representan los elementos fundamentales que posee cada sub-función en la estructura funcional del molino de cuchillas. Dichos vectores se encuentran orientados al proceso de trazabilidad o transferencia de información en la síntesis conceptual de soluciones.

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} \text{"Conectar molino"} & \phi_{A1} & \text{"Control (operario), Energía humana"} & \text{"Ruido, Energía eléctrica"} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

En la figura 4.8 se muestra la comparación de los diferentes modos de operación de la estructura funcional del molino descrita en la figura 4.7. Como se observa, la modelación funcional contiene cuatro funciones, las

cuales son el resultado de integrar las funciones correspondientes al modo de operación principal y al modo de operación auxiliar. En los gráficos se aprecia la relación existente entre las funciones y los requerimientos, así como los flujos de entrada y salida asociados a estas.

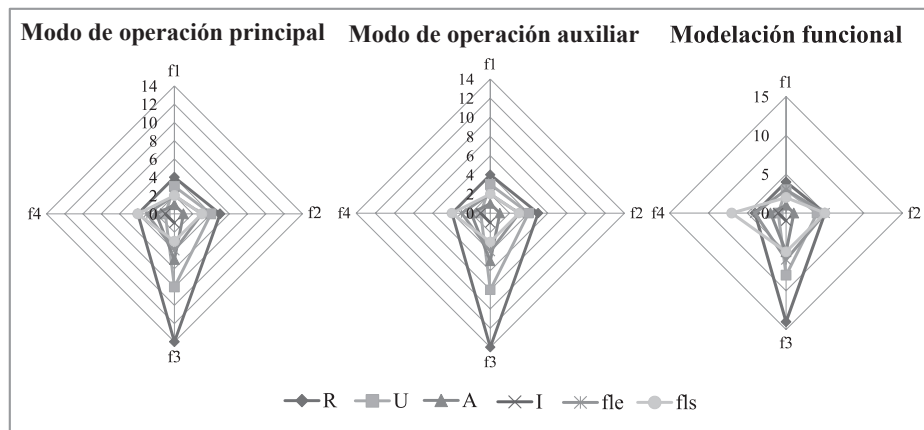


Figura 4.5. Gráficos radiales de la estructura funcional del molino de cuchillas.

Siguiendo la secuencia algorítmica del método propuesto para la síntesis conceptual de soluciones, detallado en la figura 3.15, se establece la síntesis de los principios de soluciones, realizada a partir de los elementos aportados por la matriz (M_{fc}) y los vectores (ξ_n).

4.1.3. Estructuración de la síntesis guiada de soluciones acumulativas para el molino de cuchillas.

Para la síntesis guiada de soluciones del molino de cuchillas, se sigue el procedimiento de síntesis conceptual de soluciones, expresado en la figura 3.15 del capítulo 3. Al disponer de la estructura funcional, representada en la figura 4.7, se determina el tamaño teórico del campo de soluciones. Mediante este paso, se establece el número teórico de soluciones del campo, obtenido por la combinación sistemática del conjunto de conceptos elementales que han sido seleccionados a partir de las funciones básicas del sistema. En la tabla 4.5 se muestra la base de conceptos elementales asociados a las funciones básicas.








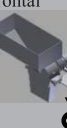








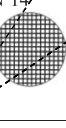
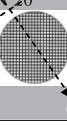




Tabla 4.5. Resumen de la base de conceptos para las funciones del molino de cuchillas.

No.	Nombre de la función	Número de conceptos	Nombre del concepto	Número de soluciones
1	Conectar	3	Conector	3
			Cuchilla	2
			Pulsador	2
2	Abastecer	1	Tolva	3
3	Triturar	2	Rompedor de grano	2
			Rotor	3
4	Tamizar	1	Tamiz	7

En la determinación del campo teórico de soluciones, lo cual se logra sustituyendo los datos en la ecuación (3.24) planteada en el capítulo 3, se obtienen 882 soluciones teóricas para el caso que se analiza. Como resultado de

multiplicar el número de principios de soluciones correspondiente a cada función. La síntesis conceptual de soluciones se obtiene a partir de la combinación sistemática de soluciones, expresada a través de la matriz morfológica, la cual es característica del modelo prescriptivo de Pahl y Beitz (Pahl *et al.*, 2007). En la tabla 4.6, se aprecia dicha matriz para el caso del molino de cuchillas. Con líneas discontinuas se representa las formas en que se obtienen las diferentes soluciones constructivas.

Tabla 4.6. Matriz morfológica y soluciones factibles para el molino de cuchillas.

		Soluciones						
		1	2	3	4	5	6	7
Sub-funciones	Conectar	Conector espiga plana (Tipo A) 	Conector espiga redonda (Tipo B) 	Conector espiga en V (Tipo I) 	Cuchilla 220V 3~ 	Interruptor magnético 	Pulsador de un botón 	Pulsador de dos botones 
	Abastecer	Tolva frontal 	Tolva trasera 	Tolva lateral 				
	Rompedor	Rompedor de grano ajustable 	Rompedor de grano fijo 					
	Triturar	Rotor con menos de cinco paletas 	Rotor con cinco paletas 	Rotor con más de cinco paletas 				
	Tamizar	Tamiz N°10 	Tamiz N°14 	Tamiz N°20 	Tamiz N°25 	Tamiz N°35 	Tamiz N°40 	Tamiz N°50 
	Combinación de los principios de solución							

Leyenda: ● Variantes de solución. ● Variante de solución adoptada para la construcción.

A partir de lo antes explicado, se impone preguntar: ¿Cómo se expresa en este análisis la trazabilidad de los requerimientos funcionales? Para este caso en estudio, la matriz morfológica expone un conjunto de sub-funciones que están relacionadas con los requerimientos unidimensionales. Con el fin de lograr un mejor análisis, donde se manifiesten los restantes tipos de requerimientos, habría que realizar varios niveles de estructuración funcional con el objetivo de evidenciar, en cada nivel, los tipos de requerimientos. No se pretende, en este estudio, hacer un examen exhaustivo de los diferentes niveles de descomposición funcional que podría tener el molino de cuchillas, solo se desea expresar el análisis primario que demuestra la factibilidad de la trazabilidad de los requerimientos en esta fase del proceso de diseño.

La matriz (M_{ME}) del molino de cuchillas expresada en (4.9) está compuesta por los vectores (ξ_n), contenidos en la matriz (M_{fc}), y los vectores (PSn) que representan a los diferentes principios de solución definidos para el molino de cuchillas y que están agrupados en la tabla 4.6. De esta manera se logra orientar la trazabilidad de los requerimientos del molino al vincular, en una misma matriz, los requerimientos con toda la información disponible relativa al mismo y los principios de soluciones asociados a esos requerimientos.

$$M_{ME} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \end{matrix} & \begin{matrix} \text{“Conector espiga plana (Tipo A)”} \\ \text{“Tolva frontal”} \\ \text{“Rompedor de grano ajustable”} \\ \text{“Rotor con menos de cinco paletas”} \\ \text{“Tamiz No.10”} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{“Conector espiga redonda (Tipo B)”} \\ \text{“Tolva trasera”} \\ \text{“Rompedor de grano fijo”} \\ \text{“Rotor con cinco paletas”} \\ \text{“Tamiz No.14”} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{“Conector espiga en V (Tipo I)”} \\ \text{“Tolva lateral”} \\ \text{“Rotor con más de cinco paletas”} \\ \text{“Tamiz No.20”} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{“Cuchilla 220 V 3”} \\ \text{“Tamiz No.25”} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{“Interruptor magnético”} \\ \text{“Tamiz No.35”} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{“Pulsador de un botón”} \\ \text{“Tamiz No.40”} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{“Pulsador de dos botones”} \\ \text{“Tamiz No.45”} \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Acotación del campo de soluciones para el molino de cuchillas

Para el caso molino de cuchillas fue necesario realizar el acotado del campo de soluciones, dadas las limitaciones económicas de la empresa productora. La tabla 4.6 destaca las soluciones factibles para el molino de cuchillas, determinadas en base a las soluciones acotadas. Las mismas se establecen por el diseñador, quien es el encargado de decidir la preferencia de una solución con respecto a otra, en base a su experiencia. La herramienta computacional SINCOS se encarga de realizar el análisis de todas las soluciones y las muestra en pantalla.

Generación de las soluciones globales para el molino de cuchillas

Siguiendo el enfoque sistemático adoptado en esta investigación, corresponde ahora evaluar las propuestas de solución, obtenidas en los pasos anteriores, relativas al molino de cuchillas. La evaluación conceptual de las soluciones para el caso que se analiza, significa determinar la proximidad de cada solución, con la particularidad de que en esta tesis se añade el proceso de evaluación de la trazabilidad de los requerimientos funcionales.

Teniendo en cuenta los conceptos factibles a desarrollar por la empresa productora del molino de cuchillas, la matriz morfológica desarrollada permite la obtención de la solución por la combinación sistemática de un conjunto de conceptos posibles. Para demostrar la hipótesis de la investigación se muestran, expresadas en (4.10), las variantes conceptuales potenciales:

$$\text{Variante de Concepto 1} = \begin{matrix} \text{Conector espiga plana (Tipo A) + Tolva frontal +} \\ \text{Rompedor de grano fijo + Rotor con más de cinco paletas + Tamiz No10} \end{matrix}$$

$$\begin{aligned} \text{Variante de Concepto 2} &= \text{Cuchilla 220V 3~ + Tolva trasera +} \\ &\quad \text{Rompedor de grano ajustable + Rotor con cinco paletas + Tamiz No10} \\ \text{Variante de Concepto 3} &= \text{Pulsador de dos botones + Tolva trasera +} \\ &\quad \text{Rompedor de grano fijo + Rotor con cinco paletas + Tamiz No20} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Los conceptos desarrollados son representados matemáticamente en las matrices de principios de solución (PSn), formuladas en la expresión (4.11).

$$PS_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad PS_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad PS_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

4.2. Evaluación conceptual de variantes de diseño y trazabilidad de los requerimientos funcionales del molino de cuchillas

Para la evaluación de las variantes, se propone el método de evaluación conceptual por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos (ECTR), expuesto en el acápite 3.5 del capítulo 3. Al mismo tiempo, los resultados de la selección de las variantes son contrastados con los métodos AHP, Decision Matrix y el Método de Pugh (Ver Anexo 9).

Evaluación conceptual por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales

En la tabla 4.7 se muestran los criterios de evaluación para la comparación de los conceptos y los pesos relativos que el diseñador le otorga. No todos los criterios existentes fueron contemplados, ya que serían muchos (relacionados con la energía, mantenimiento, entre otros) y solo se toman cinco para su visualización como ejemplo en la validación del caso. Según el método tradicional, la selección de los conceptos se realiza a través del ordenamiento de los criterios de selección por los pesos ponderados. Nótese que los criterios de evaluación que poseen mayor importancia son los referidos a las cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste y el de la malla perforada según la granulometría a obtener.

Tabla 4.7. Criterios de evaluación para la comparación de los conceptos.

Criterio de evaluación	Peso relativo
a) Volumen de la tolva	0,15
b) Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste	0,30
c) Garantía de piezas de repuesto, para mantener la operatividad del molino	0,15
d) Malla perforada según la granulometría a obtener	0,25
e) Los pedestales deben ser engrasados regularmente	0,15

En base a las expresiones descritas en (4.6), se determinan los diferentes valores formalizados de los vectores (ξ_n), que han sido calculados en base a los vectores (K_n) contenidos en las matrices (ϕ_{An}) y a las cualidades identificadas en el vector (C_{ϕ_A}), las cuales corresponden a cada uno de los requerimientos funcionales que están

asociados a las funciones definidas para el molino de cuchillas. Los valores de (K_n) se establecen a partir de los rangos asignados a los valores de ponderación para las cualidades (explicados en el acápite 3.5.2 del capítulo 3). Sustituyendo y sumando en (ξ_n) se obtienen los valores correspondientes a $\xi_1 = 1,60$; $\xi_2 = 1,70$; $\xi_3 = 4,40$ y $\xi_4 = 0,80$.

El resultado de la suma efectuada a partir de los valores ponderados de las cualidades de los requerimientos, evidencia que los máximos valores del vector (ξ_n) se tienen en los vectores $\xi_2 = 1,70$ y $\xi_3 = 4,40$. Estos se corresponden con las funciones de “Abastecer tolva” y “Triturar granos o tallos”, por ser las que más requerimientos tienen asociados. Dichos criterios indican al diseñador cuán importante es la función y los requerimientos asociados en la evaluación de las variantes conceptualizadas.

La combinación de los valores calculados de los vectores (ξ_n) , con los pesos relativos contenidos en la tabla 4.8, definen la métrica MOCS, que sirve como criterio de evaluación para la selección de los conceptos de solución. La tabla 4.9 muestra la forma de distribución, según el criterio del diseñador, de los valores de los vectores entre los diferentes principios de solución aportados para el molino de cuchillas por la matriz morfológica extendida (M_{ME}) . La herramienta informática que permite realizar esta operación es el programa SINCOS.

Tabla 4.8. Distribución de los valores de los vectores (ξ_n) y principios de solución seleccionados para las variantes 1, 2 y 3 del molino de cuchillas.

Variante 1	1	2	3	4	5	6	7	Variante 2	1	2	3	4	5	6	7
$\xi_1 = 1,60$	0,10	0,10	0,15	0,20	0,40	0,30	0,35	$\xi_1 = 1,60$	0,10	0,10	0,15	0,20	0,40	0,30	0,35
$\xi_2 = 1,70$	0,70	0,55	0,45					$\xi_2 = 1,70$	0,70	0,55	0,45				
$\xi_3 = 4,40$	2,40	2,00						$\xi_3 = 4,40$	2,40	2,00					
	1,30	1,60	1,50						1,30	1,60	1,50				
$\xi_4 = 0,80$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13	$\xi_4 = 0,80$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13

Variante 3	1	2	3	4	5	6	7
$\xi_1 = 1,60$	0,10	0,10	0,15	0,20	0,40	0,30	0,35
$\xi_2 = 1,70$	0,70	0,55	0,45				
$\xi_3 = 4,40$	2,40	2,00					
	1,30	1,60	1,50				
$\xi_4 = 0,80$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13

En la tabla 4.9 se muestra la correlación existente entre los criterios de evaluación y los valores de los vectores (ξ_n) asociados a los principios de solución seleccionados, los cuales fueron evaluados para cada variante de solución del molino de cuchillas. El resultado final indica que, entre las variantes evaluadas, la variante 3 posee un mayor peso de ponderación, lo que permite asegurar que es la que satisface, en mayor medida, los requerimientos del usuario. Este resultado permite que el diseñador disponga de una referencia para la evaluación conceptual de soluciones, teniendo en cuenta la trazabilidad de las cualidades de los requerimientos funcionales desde su definición hasta esta etapa de evaluación.

Tabla 4.9. Evaluación y comparación de las variantes de conceptos del molino de cuchillas.

No.	Criterios de evaluación	Peso	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
			Mag.	Valor	Mag.	Valor	Mag.	Valor
1	Volumen de la tolva	0,15	0,10	0,02	0,20	0,03	0,35	0,05
2	Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste	0,30	0,70	0,21	0,55	0,17	0,55	0,17
3	Garantía de piezas de repuesto para mantener la operatividad del molino	0,15	2,00	0,30	2,40	0,36	2,40	0,36
4	Malla perforada según la granulometría a obtener	0,25	0,50	0,38	1,60	0,40	1,60	0,40
5	Los pedestales deben ser engrasados regularmente	0,15	0,11	0,02	0,11	0,02	0,11	0,02
		1,00	0,93		0,98		1,00	

4.3. Validación del método propuesto

Para validar el método propuesto, se realizó una comparación de los resultados obtenidos por el método de ECTR, contrastados con los métodos de AHP, Decision Matrix y el Método de Pugh. Los resultados obtenidos se muestran en el anexo 9 y en ellos resulta significativo que, para el caso del molino de cuchillas, con el análisis por Decision Matrix y Pugh el resultado coincidió con el aportado el método de ECTR; mientras que, con el AHP, fue seleccionada la variante 1. Tal resultado no invalida la propuesta desarrollada en esta investigación, pues los criterios y formas de realizar el análisis en estos métodos tienen marcadas diferencias.

Un elemento a destacar es la no existencia en ellos de un criterio presente en el método de ECTR como es el vector (ξ_n) , que permite al diseñador disponer de una referencia para el ordenamiento por niveles de importancia de los requerimientos funcionales a la hora de asignar las diferentes ponderaciones a los conceptos de solución. A diferencia de los métodos antes citados, que carecen de criterios para el análisis de la trazabilidad, el ECTR incorpora las matrices (ϕ_{An}) ; las cuales, unidas a los pesos de los criterios asociados a los requerimientos, permiten realizar la selección de conceptos teniendo en cuenta los criterios de los usuarios.

La conceptualización del molino de cuchillas, lograda a partir de la aplicación del método propuesto y del uso de las herramientas CAD desarrolladas, permitió a los diseñadores de la ELA “26 de Julio”, disponer de una diversificación de los diseños acorde con las necesidades y requerimientos expresados por los usuarios, logrando la empresa aumentar la gama de productos a disposición de los clientes.

En el diseño conceptual del molino de cuchillas se mejoró la estética del producto conceptualizado, en relación con el prototipo inicial (Figura 10.1 del Anexo 10). Este último posee una tolva frontal acoplada a la tapa del molino que dificulta su manipulación durante la limpieza o, ante una parada de emergencia, dispone de un rotor con menos de cinco paletas se disminuye la rapidez del molinado. En contraste con estas limitaciones, el concepto desarrollado (Figura 10.2 del Anexo 10) tiene dispuesta la tolva en su parte posterior. Esta solución posibilita independizar la tapa del molino, facilitando su remoción. Las cinco paletas del rotor permiten un

molinado más rápido, lo cual permitió una mayor aceptación de este por parte de los usuarios.

Se esclarece que en el molino conceptualizado hay un ahorro de material en un volumen pequeño (ver Anexo 7), que, para los niveles de producción, no es representativo. Esto contrasta con el caso del fogón eficiente (Figuras 10.3 y 10.4 del Anexo 10), donde sí se aprecia, a partir de un cambio en el diseño, un significativo ahorro de materiales.

Todo lo antes expuesto demuestra que, con el uso del método propuesto, es posible para la empresa mejorar la eficiencia en el ahorro con el caso del fogón y aumentar los ingresos por ventas con el molino de cuchillas.

De esta forma, se establece la factibilidad del método sistemático propuesto y las facilidades que brinda en la toma de decisiones dentro de la evaluación de conceptos. El mismo constituye una herramienta de apoyo para el diseñador ya que le aporta valores comparativos para la selección de los principios de solución a implementar durante la conceptualización del producto, así como las soluciones generadas contienen los requerimientos funcionales que maximizan la satisfacción del usuario, pues se conceptualizan teniendo en cuenta la estructuración de las relaciones entre cada una de las sub-etapas del diseño conceptual, y la estratificación y trazabilidad de los requerimientos funcionales.

4.4. Conclusiones del capítulo

Los tres casos de estudio en los que se aplicó el método sistemático propuesto y que están referidos al diseño conceptual de un molino de cuchillas, un fogón eficiente para biomasa y un molino de viento, demostraron que:

- La formalización sistemática de la integración de las diferentes sub-etapas que conforman el proceso de diseño conceptual, potencia la generación de conceptos de una forma suficientemente estructurada y facilita la toma de decisiones durante su evaluación.
- La utilización del método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional y del método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas, garantizan la captura y transformación evolutiva de la información relativa a los requerimientos funcionales, orientados a la síntesis de soluciones y a la evaluación conceptual de variantes de solución.
- La formulación del conjunto de matrices permite la captura de la información relativa a los requerimientos funcionales y el estudio evolutivo de los mismos desde su definición hasta la evaluación de conceptos, garantizando la viabilidad del método sistemático propuesto.
- La evaluación conceptual de variantes de solución por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales, le facilita al diseñador la toma de decisiones, al incorporar información evolutiva de los requerimientos funcionales según el método sistemático propuesto.
- El uso de herramientas informáticas integradas en un entorno CAD, facilita la toma de decisiones del diseñador y le permite la generación, selección y evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales durante el proceso de diseño.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. Se desarrolló un método sistemático en el diseño conceptual, que incluyó la propuesta de una nueva etapa denominada especificación cualitativa, la cual permite articular el proceso de trazabilidad desde la definición de los requerimientos funcionales hasta la evaluación de los conceptos. Esto constituye un aporte al modelo clásico del proceso de diseño de Pahl y Beitz.
2. Se demostró que la utilización del método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional y del método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas, desarrollados en el método propuesto, garantizan la captura y transformación evolutiva de la información relativa a los requerimientos funcionales, orientados a la síntesis y evaluación conceptual de variantes de solución. Cada una de las 882 soluciones conceptuales generadas para el molino de cuchillas, las 144 del fogón eficiente y las 512 del molino de viento, contienen, en sus principios de solución, los requerimientos funcionales que maximizan la satisfacción del usuario, permitiendo al diseñador rastrear el requerimiento durante el desarrollo conceptual del producto.
3. Se demostró, mediante el método propuesto, que la conceptualización de los estadios de información por los que transitan los requerimientos funcionales permite desde la captura de la información y su estudio evolutivo, hasta la evaluación de variantes de solución, lo que garantiza la viabilidad en el método expuesto, quedando contenida la información de cada solución conceptual desarrollada, en las bases de datos estructuradas a partir de las matrices y vectores que se formularon durante la transición de los requerimiento por cada estadio conceptual evolutivo.
4. Se demostró, con la aplicación a los casos de estudio del método sistemático de diseño propuesto, que la formalización de las relaciones establecidas en el proceso de diseño conceptual, potencia la generación y evaluación de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales y facilita la posterior toma de decisiones, obteniéndose la variante conceptual que maximiza la satisfacción del usuario, a partir del valor de ponderación asignado a cada principio de solución que fue establecido en base a la estratificación y especificación cualitativa de los requerimientos realizada con el método Kano.
5. Se desarrollaron un conjunto de herramientas computacionales en un entorno CAD, contenidas en el software CODISE-TZR, para el proceso de síntesis conceptual de soluciones a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales. Dichas herramientas están basadas en la implementación del método

acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional y del método propuesto para la síntesis conceptual de soluciones. El conjunto de herramientas está conformado por las aplicaciones GRProyect, encargada de la a gestión de los requerimientos funcionales a través del uso del método Kano en un entorno Web; CADProcessDesigner, software editor de estructuras funcionales que facilita la creación interactiva de las variantes de estructuras funcionales deseadas; GECOND, herramienta que gestiona su toma de decisiones a partir del análisis de la contribución de cada una de las funciones de la estructura funcional en la ponderación total del concepto de solución que se analice; y SINCOS, programa que permite el análisis de las combinaciones de los principios de solución contenidos en la matriz morfológica.

6. Los resultados obtenidos se aplicaron en la Empresa de Logística Agropecuaria “26 de Julio” de la provincia Granma, perteneciente al Ministerio de la Agricultura. Allí, a partir del análisis de los tres casos de estudio, referidos al diseño conceptual de un molino de cuchillas, un molino de viento y un fogón eficiente para biomasa, fue validado el método sistemático propuesto.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

Una vez establecido el método sistemático formulado en esta investigación, se propone:

- Desarrollar métodos de generación y visualización de conceptos en 3D, que permitan asistir al diseñador durante la fase conceptual de diseño.
- Aplicar, de forma articulada con el estudio y los métodos desarrollados, técnicas de optimización multicriterial en la evaluación de conceptos.
- Utilizar los resultados obtenidos en el desarrollo de un prototipo de sistema informático integrable a las aplicaciones CAD multiplataforma.
- Extender la aplicación del método sistemático propuesto a otras empresas de diseño y proyectos del país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, H.S. y EBEID, M.A.: "A Holistic Approach for Sustainable Product Design," En: *Global Product Development Proceedings of the 20th CIRP Design Conference*, pp. 329–338, Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- ADAMS, KEVIN MACG: *Nonfunctional Requirements in Systems Analysis and Design*, Springer International Publishing AG Switzerland: Springer International Publishing, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-18344-2>.
- AHUETT, HORACIO: "Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora", *Evolución de las metodologías de apoyo a la ingeniería concurrente*, pp. 77–85, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- ALANEN, JARMO; ISTO, PEKKA; TOMMILA, TEEMU y TIKKA, PETRI: "Requirements traceability in simulation driven development," Report 978-951-38-8359-1, Teknologian tutkimuskeskus VTT, 2015.
- AMMAR, ADEL AMIN; SCARAVETTI, DOMINIQUE y NADEAU, JEAN-PIERRE: "Knowledge reuse: Towards a design tool," En: *International Design Conference-DESIGN 2010*, Dubrovnik, Croatia, May 17–20, 2010a.
- "A heuristic method for functional aggregation within the design process," En: *Proceedings of IDMME-Virtual Concept 2010*, Bordeaux, France, October 20–22, 2010b.
- ANTONSSON, ERIK K.: "Imprecision in Engineering Design," En: *IDEA'97 - Intelligent Design in Engineering Applications Symposium, at the 5th European Congress on Intelligent Techniques and and Soft Computing - EUFIT'97*, Aachen, Germany, September 11, 2001.
- ARCHER, L.B.: *Technological Innovation - A Methodology*, Frimley: Inforlink, 1971.
- ARMSTRONG, JAMES: "Design principles The engineer's contribution to society," 2002, Disponible en: http://www.raeng.org.uk/education/vps/pdf/design_principles.pdf.
- ARZOLA, J.: *Sistemas Ingenieriles*, Ciudad de La Habana: Félix Varela, 2000.
- ASIEDU, Y. y GU, P.: "Product life cycle cost analysis: state of the art review," *International journal of production research*, **36** (4), pp. 883–908, 1998.
- AVIGADA, GIDEON y MOSHAIOV, AMIRAM: "Set-based concept selection in multi-objective problems involving delayed decisions," *Journal of Engineering Design*, **21** (6), pp. 619–646, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09544820802459243>.

- BERGER, CHARLES; BLAUTH, ROBERT; BOGER, DAVID; BOLSTER, CHRISTOPHER; BURCHILL, GARY; DUMOUCHEL, WILLIAM; POULIOT, FRED; RICHTER, REINHART; RUBINOFF, ALLAN; SHEN, DIANE; TIMKO, MIKE y WALDEN, DAVID: "Kano's methods for understanding customer-defined quality.," *Center for Quality Management Journal*, **2** (4), pp. 1–35, 1993, Disponible en: [http://cqmxextra.cqm.org/cqmjournal.nsf/37b98822dd684012852567f40051314a/d3ca60e8ab5b19d185256634006beb68/\\$FILE/2.4_Whole_Issue.pdf](http://cqmxextra.cqm.org/cqmjournal.nsf/37b98822dd684012852567f40051314a/d3ca60e8ab5b19d185256634006beb68/$FILE/2.4_Whole_Issue.pdf).
- BLESSING, L.T.M.: "Comparison of Design Models proposed in prescriptive literature," En: European Committee ed. *Proceeding of the COST A3/ COST A4 International Research Workshop on the Role of Design in the Shaping of Technology*, pp. 187–212, Lyon, 1996.
- BOLT, ANDREW y MAZUR, GLENN H.: "Jurassic QFD Integrating Service and Product Quality Function Deployment," En: *The Eleventh Symposium on Quality Function Deployment*, 1999.
- BORDEGONI, MONICA: "Innovation in Product Design From CAD to Virtual Prototyping", *Product Virtualization: An Effective Method for the Evaluation of Concept Design of New Products*, pp. 117–141, London: Springer-Verlag, 2011.
- BRYANT, CARI R.; MCADAMS, DANIEL A.; STONE, ROBERT B.; KURTOGLU, TOLGA y CAMPBELL, MATTHEW: "A Validation Study of an Automated Concept Generator Design Tool," En: *Proceedings of IDETC/CIE 2006. ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, p. 12, 2006a, Disponible en: <http://function.basiceeng.umn.edu/delabsite/publications/conferences/DETC06-99489.pdf>.
- BRYANT, CARI R.; PIEPER, ERIC; WALTHER, BRANDON; KURTOGLU, TOLGA; STONE, ROBERT B.; MCADAMS, DANIEL A. y CAMPBELL, MATTHEW: "Software Evaluation of an Automated Concept Generator Design Tool," En: *Proceedings of the 2006 ASEE Annual Conference*, p. 15, 2006b, Disponible en: <http://function.basiceeng.umn.edu/delabsite/publications/conferences/ASEE-2006-1758-w-authors.pdf>.
- BS, (BRITISH STANDARD): "Guide to managing product design," 1989.
- CABARROCAS, JOAN: *Disseny Conceptual basat en la síntesi funcional de sistemes d'accionament amb multiples modes d'operació*, 188pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor Ingeniero Industrial)**, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 1999.
- CABARROCAS, JOAN y RIBA, CARLES: "Contribuciones a la síntesis funcional de sistemas mecánicos en la fase de diseño conceptual," En: *XIII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos*, **2**, pp. 734–741, 1997.

- CAI, CL; XIAO, RB y YANG, P: "The method for analysing and disposing of functional interaction in axiomatic design," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **224** (2), pp. 401–409, 2010.
- CAO, D. X. y FU, M. W.: "A Knowledge-Based Prototype System to Support Product Conceptual Design," *Computer-Aided Design & Applications*, **8** (1), pp. 129–147, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.3722/cadaps.2011.129-147>.
- CASCINI, GAETANO y ROTINI, FEDERICO: "Innovation in Product Design From CAD to Virtual Prototyping", *From Computer-Aided (Detailed) Design to Automatic Topology and Shape Generation*, pp. 15–35, London: Springer-Verlag, 2011.
- CHAKRABARTI, AMARESH y BLESSING, LUCIENNE TM: *An Anthology of Theories and Models of Design*: Springer, 2014.
- CHAKRABARTI, AMARESH y BLIGH, THOMAS P.: "An approach to functional synthesis of solutions in mechanical conceptual design. Part I: Introduction and knowledge," *Research in Engineering Design*, **6** (3), pp. 127–141, 1994, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01607275>.
- "An Approach to Functional Synthesis of Solutions in Mechanical Conceptual Design. Part III: Spatial Configuration," *Research in Engineering Design* (2), pp. 116–124, 1996.
- CHAKRABARTI, AMARESH; BLIGH, THOMAS P. y HOLDEN, TONY: "Towards a decision support framework for the embodiment phase of mechanical design," *Artificial Intelligence in Engineering* (7), 1992.
- CHANDRASEGARAN, SENTHIL K; RAMANI, KARTHIK; SRIRAM, RAM D; HORVÁTH, IMRÉ; BERNARD, ALAIN; HARIK, RAMY F y GAO, WEI: "The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems," *Computer-aided design*, **45** (2), pp. 204–228, 2013.
- CHAUDHA, ANKUR; JAIN, RAJEEV; SINGH, A. R. y MISHRA, P. K.: "Integration of Kano's Model into quality function deployment(QFD)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **53** (5), pp. 689–698, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2867-0>.
- CHAUR, JAIRO: *Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa*, 360pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ingeniería)**, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2004.
- CHEN, CHUN-CHIH y CHUANG, MING-CHUEN: "Integrating the Kano model into a robust design approach to enhance customer satisfaction with product design," *International Journal of Production Economics*, **114** (2), pp. 667–681, 2008.

- CHEN, HUI-CHUAN; LEE, HSIN-YI, TZONG-RU (JIUN-SHEN) AND LIN y WU, HSIAO-CHEN: “Application of TRIZ and the Kano method to home life industry innovation,” *International Journal of Innovation and Learning* 2010, **7** (1), pp. 64–84, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJIL.2010.029474>.
- CHEN, YONG; LIU, ZE-LIN y XIE, YOU-BAI: “A knowledge-based framework for creative conceptual design of multi-disciplinary systems,” *Computer-Aided Design & Applications*, **44** (2), pp. 146–153, 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2011.02.016>.
- CHRISTOPHE, F; BERNARD, A y COATANÉA, É: “RFBS: A model for knowledge representation of conceptual design,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **59** (1), pp. 155–158, 2010.
- CHRISTOPHE, FRANÇOIS: *Semantics and knowledge engineering for requirements and synthesis in conceptual design: Towards the automation of requirements clarification and the synthesis of conceptual design solutions*, 123pp., **Ph.D. dissertation (completed for the degree of Doctor of Science (Technology))**, Aalto University School of Engineering, Helsinki, Finland, 2012.
- CHUCHOŁOWSKI, N; WOLFENSTETTER, T; WICKEL, MC; KRCMAR, H y LINDEMANN, U: “Towards Cycle-oriented Traceability in Engineering Change Management,” *DS*, **77**, pp. 1491–1500, 2014.
- COLL, JUDIT; PAZ, HUÁSCAS y RIBA, CARLES: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Diseño para el servicio y entorno*, pp. 123–135, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- COLOMBO, GIORGIO y MANDORLI, FERRUCCIO: “Innovation in Product Design From CAD to Virtual Prototyping”, *Evolution in Mechanical Design Automation and Engineering Knowledge Management*, pp. 55–78, London: Springer-Verlag, 2011.
- CROSS, NIGEL: *Developments in design methodology*: John Wiley & Sons, 1984.
- *Engineering design methods: strategies for product design*: John Wiley & Sons, cuarta edición, 2008.
- CROSTACK, H.-A.; KLUTE, S. y REFFLINGHAUS, R.: “A Multi-dimensional Model for Structuring Stakeholder Requirements,” En: Alain BERNARD ed. *Global Product Development Proceedings of the 20th CIRP Design Conference*: Springer, 2010.
- DELGOSHAEI, PARASTOO; AUSTIN, MARK A y VERÓNICA, DANIEL A: “A semantic platform infrastructure for requirements traceability and system assessment,” En: *The Ninth International Conference on Systems (ICONS 2014)*, pp. 215–219, 2014.
- DIETER, GEORGE E.: *Engineering design - A materials and processing approach*: Mc Graw-Hill International Editions, tercera edición, 2000.
- DYM, C. y LITTLE, P.: *El Proceso de Diseño en Ingeniería. Cómo desarrollar soluciones efectivas*, México: Limusa Wiley, 2002.

- EAGAN, ROBERT J.; ALLEN, BETH E.; CAUDILL, CORBETT D.; HOWARD, RONALD A.; HUNTER, J. STUART; MAGEE, CHRISTOPHER L.; OSTRACH, SIMON y ROUSE, WILLIAM B.: *Theoretical Foundations for Decision Making in Engineering Design*, Washington, D.C.: National Academy of Sciences, National Academies Press, 2001, Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/10566.html>.
- *Approaches to Improve Engineering Design*, Washington, D.C.: National Academy of Sciences, National Academies Press, 2002, Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/10502.html>.
- EDER, W. ERNST: “Comparison of several design theories and methods with the legacy of Vladimir Hubka,” Technical report, 2012.
- EHRICH, ANDREW BARATZ y HAYMAKER, JOHN RIKER: “Multiattribute interaction design: An integrated conceptual design process for modeling interactions and maximizing value,” *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, **26** (01), pp. 85–101, 2012.
- ERGINEL, NIHAL: “Construction of a fuzzy QFD failure matrix using a fuzzy multiple-objective decision model,” *Journal of Engineering Design*, **21** (6), pp. 677–692, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09544820902810261>.
- FARIAS, PAOLA; ACA, JOAQUIN; MOLINA, ARTURO; MAURY, HERIBERTO y RIBA, CARLES: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Evolución de los modelos del proceso de diseño*, pp. 21–36, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- FERRER, INÉS: *Contribución metodológica en técnicas de diseñar para fabricación*, 235pp., **Tesis Doctoral**, Universitat de Girona, Girona, España, 2007.
- FERRER, INÉS; DE CIURANA, QUIM y RÍOS, JOSÉ: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Flujo de información en el proceso de diseño*, pp. 63–74, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- FINGER, SUSAN y DIXON, JOHN R.: “A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part I: Descriptive, Prescriptive, and Compute-Based Models of Design Processes,” *Research in Engineering Design* (1), pp. 51–67, 1989.
- FREY, DANIEL D.; HERDER, PAULIEN M.; WIJNIA, YPE; SUBRAHMANIAN, ESWARAN; KATSIKOPOULOS, KONSTANTINOS y CLAUSING, DON P.: “An Evaluation of the Pugh Controlled Convergence Method,” En: ASME ed. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2007.
- FUCCI, MASSIMO: “Innovation in Product Design From CAD to Virtual Prototyping”, *The Evolution of Digital Tools for Product Design*, pp. 1–14, London: Springer-Verlag, 2011.

- GIACHETTI, RONALD E.: "A Decision Support Systems for Material and Manufacturing Process Selection.," *Journal of Intelligent Manufacturing* (9), pp. 265–276, 1997.
- GIACHETTI, RONALD E.; YOUNG, ROBERT E.; ROGGATZ, AXEL; EVERSHEIM, WALTER y PERRONE, GIOVANNI: "A methodology for the reduction of imprecision in the engineering process," *European Journal of Operational Research*, pp. 1–26, 1997.
- GOEL, ASHOK K.; MCADAMS, DANIEL A. y STONE, ROBERT B.: *Biologically Inspired Design: Computational Methods and Tools*: Springer-Verlag Londres, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-5248-4>.
- GRIMA, PEDRO: *Aportaciones metodológicas al diseño de productos robustos*, 136pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor Ingeniero Industrial)**, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 1993.
- GUIDAT, CLAUDINE; ; BOLY, VINCENT y NOEL-ARNOULD, CHRISTINE: "L'analyse de la valeur: outil de base pour une nouvelle démarche d'amélioration de produits intégrant technique, marketing, ergonomie, design, sécurité et normalisation," En: *Congrès international Valeur & Design*, 1993.
- HAAS, RAINER y MEIXNER, OLIVER: "An Illustrated Guide to the ANALYTIC HIERARCHY PROCESS," 2011, Disponible en: www.boku.ac.at/mi/ahp/ahptutorial.pdf.
- HAIK, YOUSEF y SHAHIN, TAMER: *Engineering Design Process*, Stamford: Cengage Learning, segunda edición, 2011.
- HAMBALI, A.; SAPUAN, S. M.; RAHIM, A. S.; ISMAIL, N. y NUKMAN, Y.: "Concurrent Decisions on Design Concept and Material Using Analytical Hierarchy Process at the Conceptual Design Stage," *Concurrent Engineering*, **19** (2), pp. 111–121, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1063293X11408138>.
- HAUSER, J. R. y CLAUSING, D.: "The house of quality," *Harvard Business Review*, pp. 63–73, 1988.
- HE, BIN y FENG, PEIEN: "Guiding conceptual design through functional space exploration," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **66** (9-12), pp. 1999–2011, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4476-6>.
- HECHAVARRÍA, JESÚS R.: *Optimización del diseño de redes de distribución de agua bajo criterios técnico-económicos*, 143pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas)**, Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, 2009.
- HELMS, BERGEN: *Object-Oriented Graph Grammars for Computational Design Synthesis*, 179pp., **Ph.D. dissertation (zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs)**, Technische Universität

- München, München, Alemania, 2013.
- HELMS, BERGEN; SHEA, KRISTINA y HOISL, FRANK: "A Framework for Computational Design Synthesis Based on Graph-Grammars and Function-Behavior-Structure," En: *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2009)*, pp. 841–851: ASME, 2009.
- HIRTZ, JULIE; STONE, ROBERT B.; MCADAMS, DANIEL A.; SZYKMAN, SIMON y WOOD, KRISTIN L.: "A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts," February, 2002, Disponible en: http://function.basiceng.umn.edu/delabsite/publications/journals/Reconciled_FB-RED.pdf.
- HUBKA, VLADIMIR; ANDREASEN, MYRUP y EDER, ERNST W.: *Practical Studies in systematic design*, Londres: Butterworths, 1988.
- HUBKA, VLADIMIR y EDER, ERNST W.: *Theory of Thecnical Systems*, Berlín: Springer-Verlag, 1984.
- *Engineering Design*, Zürich, Switzerland: Heurista, 1992.
- *Design Science: introduction to the needs, scope and organization of engineering design knowledge*: Springer Science & Business Media, 2012.
- HUNDAL, M.: "A Systematic Method for Developing Function Structures, Solutions and Concept Variants," *Mechanism and Machine Theory*, **25** (3), pp. 243–256, 1990.
- HUTCHESON, RYAN S.; MCADAMS, DANIEL A.; STONE, ROBERT B. y TUMER, IREM Y.: "A Function-Based Methodology for Analyzing Critical Events," En: *Proceedings of IDETC/CIE 2006. ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, p. 12, 2006, Disponible en: <http://function.basiceng.umn.edu/delabsite/publications/conferences/DETC2006-99535.pdf>.
- JIANXIN, DENG y MING, SHAO: "Method for Functional Design of Axiomatic Design Based on Connections," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **24** (3), pp. 364–371, 2011.
- JIN, YAN y LI, WEI: "Design Concept Generation: A hierarchical Coevolutionary Approach.," *Journal of Mechanical Design*, **129**, pp. 1012–1022, 2007, DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2757190>.
- JUSTEL, D.; PÉREZ, E.; VIDAL, R.; GALLO, A. y VAL, E.: "Estudio de Métodos de Selección de Conceptos," En: *XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 2007.
- KANER, MAYA y KARNI, REUVEN: "Engineering design of a service system: An empirical study," *Information Knowledge Systems Management*, **6** (3), pp. 235–263, 2007.

- KANO, NORIAKI; SERAKU, NOBUHIKO; TAKAHASHI, FUMIO y TSUJI, SHIN-ICHI: "Attractive Quality and Must-Be Quality," *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, **14** (2), pp. 147–156, abril, 1984, Disponible en: <http://ci.nii.ac.jp/naid/110003158895/en/>.
- KIM, DUCK YOUNG y XIROUCHAKIS, PAUL: "CO2DE: a decision support system for collaborative design," *Journal of Engineering Design*, **21** (1), pp. 31–48, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09544820802132444>.
- KIRAN, C. PHANEENDRA; CLEMENT, SHIBU y AGRAWAL, V. P.: "Design for X-Abilities of a Mechatronic System-A Concurrent Engineering and Graph Theory Based Approach," *Concurrent Engineering*, **19** (1), pp. 55–70, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1063293X11403509>.
- KIRKMAN, DAVID P: "Requirement decomposition and traceability," *Requirements Engineering*, **3** (2), pp. 107–114, 1998, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02919970>.
- KOMOTO, HITOSHI y TOMIYAMA, TETSUO: "A framework for computer-aided conceptual design and its application to system architecting of mechatronics products," *Computer-Aided Design*, **44** (10), pp. 931–946, 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2012.02.004>.
- KOPENA, JOSEPH B.; CERA, CHRISTOPHER D. y REGLI, WILLIAM C.: "Engineering Design Knowledge Management for Conceptual Design," *American Association for Artificial Intelligence*, 2004, Disponible en: <http://edge.cs.drexel.edu/assemblies/publications/iaai04-submission.pdf>.
- KWONG, C.K.; CHEN, Y.; CHAN, K.Y. y LUO, X.: "A generalised fuzzy least-squares regression approach to modelling relationships in QFD," *Journal of Engineering Design*, **21** (5), pp. 601–613, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09544820802563234>.
- LAHONDE, N.; OMHOVER, J.-F. y AOUSSAT, A.: "Proposition of a Methodology for Developing a Database of Design Methods," En: Alain BERNARD ed. *Global Product Development Proceedings of the 20th CIRP Design Conference*: Springer, 2010.
- LASTRE, ARLYS M.: *Optimización de la distribución y corte de piezas de forma Geométrica irregular en chapas*, 177pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas)**, Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, 2010.
- LE MASSON, PASCAL y WEIL, BENOIT: "Design theories as languages of the unknown: insights from the German roots of systematic design (1840 1960)," *Research in Engineering Design*, **24** (2), pp. 105–126, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00163-012-0140-2>.
- LEE, YU-CHENG; SHEU, LIANG-CHYAU y TSOU, YUAN-GAN: "Quality function deployment implementation based on Fuzzy Kano model: An application in PLM system," *Computers & Industrial Engineering*,

- 55** (1), pp. 48–63, 2008.
- LEÓN, JAIME ALFONSO: *Metodología para la detección de requerimientos subjetivos en el diseño de producto*, 300pp., **Tesis (en opción al grado de Doctor en Ingeniería)**, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2005.
- LEÓN, RUTH MARIBEL: *Sistémica aplicada al diseño de productos en Venezuela: El diseño conceptual como parámetro de partida para el diseño de nuevos productos*, 699pp., **Tesis (en opción al grado de Doctor)**, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2009.
- LI, BING; CHEN, YUAN; ZHANG, JUFAN y HU, YING: “Modeling and representation of a computer-aided conceptual design system,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, **26** (11), pp. 3515–3524, 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-012-0868-7>.
- LI, WENQIANG; LI, YAN; WANG, JIAN y LIU, XIAOYING: “The process model to aid innovation of products conceptual design,” *Expert Systems with Applications* (37), pp. 3574–3587, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.10.034>.
- LIU, HONGXUN; HUO, ZHU; CAO, GUOZHONG; ZHANG, CHENGYE y ZHANG, SHUMIN: “A Sustainable Model of Function Decomposition Based on Effect,” En: Denis CAVALLUCCI; Roland DE GUIO y Gaetano CASCINI (eds.) *4th IFIPWG5.4 Working Conference, CAI 2011*, Building Innovation Pipelines through Computer-Aided Innovation, pp. 1–6: Springer-Verlag, 2011.
- MA, JIN; HU, JIE; ZHENG, KAI y PENG, YING-HONG: “Knowledge-based functional conceptual design: Model, representation, and implementation,” *Concurrent Engineering*, **21** (2), pp. 103–120, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1063293x13487358>.
- MATTHEWS, P.C.; BLESSING, L.T.M. y WALLACE, K.M.: “The introduction of a design heuristics extraction method,” *Advanced Engineering Informatics*, **16** (1), pp. 3–19, 2002, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1474-0346\(02\)00002-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-0346(02)00002-2).
- MAURY, HERIBERTO: *Aportaciones metodológicas al diseño conceptual: Aplicación a los sistemas continuos de manipulación y procesamiento primario de materiales a granel*, 318pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor Ingeniero Industrial)**, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2000.
- MAURY, HERIBERTO; GÓMEZ, HUMBERTO; RIBA, CARLES; COLL, JUDIT y GENOVESE, PABLO: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Arquitectura de producto y modularidad*, pp. 49–61, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- MAURY, HERIBERTO y RIBA, CARLES: “Theoretical Foundations for Knowledge-Based Conceptual Design of Complex Systems,” **3675**, pp. 166–185, 2005.

- MC-MAHON, C.: “The Multiple Traditions of Design Research,” En: Alain BERNARD ed. *Global Product Development Proceedings of the 20th CIRP Design Conference*: Springer, 2010.
- MEJÍA, RICARDO y MOLINA, ARTURO: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Tecnologías de información para ingeniería concurrente*, pp. 193–206, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- MISTREE, F.; SMITH, W.F.; BRAS, B.A.; ALLEN, J.K. y MUSTER, D.: “Decision-Based Design: A Contemporary Paradigm for Ship Design,” *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, **98**, 1990.
- MOMANI, AMER MOHAMMAD: *A framework for function specifications-to-conceptual form translation tool in function-oriented mechanical design systems*, 203pp., **Ph.D. dissertation (in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy)**, University of Pittsburgh, Pittsburgh, E.U.A. 2005.
- MOREIRA, DIOCLÉCIO: *Modelado y desarrollo de un modelo computacional de síntesis interactivo y multirrelacional para guiar la actividad de diseño en la fase conceptual*, 408pp., **Tesis Doctoral**, Universitat Jaume I, Castellón, España, 2007.
- MULLUR, ANOOP A.; MATTSON, CHRISTOPHER A. y MESSAC, ACHILLE: “New Decision Matrix Based Approach for Concept Selection Using Linear Physical Programming,” En: *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, Disponible en: http://eislabs.gatech.edu/pubs/conferences/2003-asme-detc-zeng-pb/DETC-2003-CIE-48241_Paper_SZeng.pdf.
- NADEU, JEAN-PIERRE: “De l’analyse fonctionnelle à la créativité technique et à l’innovation,” 2002.
- NASR, EMAD ABDOUEL y KAMRANI, ALI K.: *Computer Based Design and Manufacturing: An Information-Based Approach*, Houston: Springer Science + Business Media, LLC, 2007.
- ÖLVANDER, J.; LUNDÉN, B. y GAVEK, H.: “A computerized optimization framework for the morphological matrix applied to aircraft conceptual design,” *Computer Aided Design*, **41**, pp. 187–196, 2009, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2008.06.005>.
- ONABAJO, A. y WEBER-JAHNKE, J. H.: “Stratified Modelling and Analysis of Confidentiality Requirements,” En: *Hawaii International Conference on System Sciences, Proceedings of the 41st Annual*, pp. 232–232, Jan, 2008, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/HICSS.2008.414>.
- OTTO, PETER: “Fuzzy Method for the Optimal Emulation of Expert Decision Behavior and System Modeling,” 2009, DOI: <http://dx.doi.org/10.1.1.145.1759>, CiteSeerX - Scientific Literature Digital Library and Search Engine [<http://citeseerx.ist.psu.edu/oai2>] (United States) ER.

- OUERTANI, M. Z.; BAÏNA, S.; GZARA, L. y MOREL, G.: “Traceability and management of dispersed product knowledge during design and manufacturing,” *Computer-Aided Design*, **43** (5), pp. 546–562, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2010.03.006>.
- OZKAYA, IPEK y AKIN, ÖMER: “Use of requirement traceability in collaborative design environments,” *CoDesign*, **1** (3), pp. 155–167, 2005, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15710880500227958>.
- PAHL, GERHALD y BEITZ, WOLFGANG: *Engineering Design. A Systematic Approach*, Londres: Springer-Verlag, segunda edición, 1996.
- PAHL, GERHALD; BEITZ, WOLFGANG; FELDHUSEN, JORG y GROTE, KARL-HEINRICH: *Engineering Design. A Systematic Approach*, Londres: Springer-Verlag, tercera edición, 2007.
- PAPADAM, ANGÉLICA: *Quality Function Deployment. Una herramienta para la introducción de nuevos productos en un mercado cambiante*, 52pp., Tesis (en opción al título de Master en Administración de Empresas), Universidad de Belgrano. Escuela de Economía y Negocios Internacionales. Buenos Aires, Argentina, 2005.
- PÉREZ, ROBERTO; AHUETT, HORACIO; MOLINA, ARTURO y RODRÍGUEZ, C.: “El Diseño Modular en el contexto del desarrollo de Máquinas Herramienta Reconfigurables,” *Revista Ingeniería Mecánica*, **8** (2), pp. 51–58, 2005.
- PÉREZ, ROBERTO; GUERRA, DAVID; MOLINA, ARTURO; AL-ASHAAB, AHMED y RODRÍGUEZ, KARINA: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Evolución de los sistema de apoyo a la ingeniería. Del CAD a los sistemas basados en conocimiento.*, pp. 21–36, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- PINCHEFSKY, JANIS: *A methodology and supporting framework for functional modeling and configuration in conceptual Design*, 218pp., **Ph.D. dissertation (in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Industrial Systems Engineering)**, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, E.U.A. 1996.
- PUGH, S.: *Total Design: integrated methods for successful product engineering*, Wokingham, England.: Addison-Wesley Publishing Co. 1991.
- PUGNA, ADRIAN; TĂUCEAN, ILIE; TĂMĂȘILĂ, MATEI y NEGRU-STRĂUTI, GABRIELA: “Kano’s tridimensional model for quality evaluation,” *Buletinul AGIR* (2-3), pp. 11–19, abril-septiembre, 2009, Disponible en: <http://www.agir.ro/buletine/445.pdf>, DOI: <http://dx.doi.org/10.1.1.569.1604>.

- RAHARJO, HENDRY: *Some further studies on improving QFD methodology and analysis*, 236pp., **Ph.D. dissertation (submitted for the degree of Doctor of Philosophy)**, National University of Singapore.
- RAHARJO, HENDRY; BROMBACHER, AARNOUT C.; GOH, T. N. y BERGMAN, BO: “On integrating Kano’s model dynamics into QFD for multiple product design,” *Quality and Reliability Engineering International*, **26** (4), pp. 351–363, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1065>.
- RASHID, MD MAMUNUR: “A review of State-of-Art on Kano Model for Research Direction,” *International Journal of Engineering Science and Technology*, **2** (12), pp. 7481–7490, 2010.
- RASHID, MD MAMUNUR; TAMAKI, JUN’ICHI; ULLAH, A.M.M. SHARIF y KUBO, AKIHIKO: “A proposed computer system on Kano model for new product development and innovation aspect: A case study is conducted by an attractive attribute of automobile,” *International Journal of Engineering, Science and Technology*, **2** (9), pp. 1–12, 2010.
- “A Kano Model Based Linguistic Application for Customer Needs Analysis,” *International Journal of Engineering Business Management*, **3** (2), pp. 29–36, 2011.
- REYMEN, ISABELLE M.M.J.: *Improving Design Processes through Structured Reflection A Domain-independent Approach*, 179pp., **Ph.D. dissertation**, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Holanda, 2001.
- RIBA, CARLES: *Diseño Concurrente*, Barcelona: Edicions UPC, 2002.
- RIBA, CARLES; DOMÈNECH, CARLES; RODRÍGUEZ, WLADIMIR y MAURY, HERIBERTO: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Diseño de configuración*, pp. 87–106, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- RIBA, CARLES; PÉREZ, ROBERTO; ACA, JOAQUÍN; VALVERDE, ANDRÉS; AHUETT, HORACIO y MOLINA, ARTURO: “A Modularity Framework for Concurrent Design of Reconfigurable Machine Tools,” *Lecture Notes in Computer Science*, **3190**, pp. 87–95, 2004.
- RIBA, CARLES; PÉREZ, ROBERTO; SÁNCHEZ, JORGE L.; DOMÍNGUEZ, MARÍA D.; ACA, JOAQUÍN y MOLINA, ARTURO: “A Concurrent Approach to Design of Reconfigurable Machine Tools to Process Bamboo,” *Lecture Notes in Computer Science*, **3675**, pp. 210–217, 2005.
- RICHARDSON III, JENKINS L.; SUMMERS, JOSHUA D. y MOCKO, GREGORY M.: “Function Representations in Morphological Charts: An Experimental Study on Variety and Novelty of Means Generated,” En: *21st CIRP Design Conference, Daejeon, South Korea*, **26**, 2011.
- RIHTARSIC, JANEZ; ZAVBI, ROMAN y DUHOVNIK, JOZE: “Application of wirk elements for the synthesis of alternative conceptual solutions,” *Research in Engineering Design*, **23** (3), pp. 219–234, 2012, DOI:

- <http://dx.doi.org/10.1007/s00163-012-0127-z>.
- RODRÍGUEZ, LUIS: *Diseño: Estrategia y Práctica*, México: Siglo XXI, 2004.
- RODRÍGUEZ, MARISELA: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Innovación y creatividad*, pp. 137–145, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- ROOZENBURG, N. y EEKELS, J.: *Product design: Fundamentals and Methods*, Delft: Wiley, 1995.
- SAATY, THOMAS L.: “Decision making with the analytic hierarchy process,” *International Journal of Services Sciences*, **1** (1), pp. 83–98, 2008, DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJSSci.2008.01759>.
- SALAZAR, ALFONSO: *Estudio de la innovación tecnológica en el proceso de diseño y desarrollo de producto: aplicación a las PyMEs de la industria auxiliar del automóvil: caso comparativo Estado de México y Cataluña.*, 443pp., **Tesis (en opción al grado de Doctor)**, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2012.
- SARBACKER, SHAWN D y ISHII, KOSUKE: “A framework for evaluating risk in innovative product development,” En: *Proceedings of the ASME DETC97: ASME Design Engineering Technical Conference*, Citeseer, 1997.
- SAUERWEIN, ELMAR; BAILOM, FRANZ; MATZLER, KURT y HINTERHUBER, HANS H: “The Kano model: How to delight your customers,” En: *International Working Seminar on Production Economics*, **1**, pp. 313–327, Innsbruck, 1996.
- SAVINO, MATTEO M. y MAZZA, ANTONIO: “Product Traceability Information: An Approach for Information Linking,” pp. 2462–2471, 2012.
- SAWADA, HIROYUKI y YAN, XIU-TIAN: “Applying generic constraint solving techniques in providing insights into engineering design,” En: *Proceedings of International Conference on Engineering Design*, 2001.
- SCARAVETTI, DOMINIQUE: *Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire*, 204pp., **Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur**, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Bordeaux, Francia, 2004.
- SCHMIDT, LINDA C. y CAGAN, JONATHAN: “Recursive annealing: A computational model for machine design,” *Research in Engineering Design*, **7** (2), pp. 102–125, 1995, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01606905>.
- “GGREADA: A graph grammar-based machine design algorithm,” *Research in Engineering Design*, **9** (4), pp. 195–213, 1997, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01589682>.
- SELL, RAIVO; TAMRE, MART; LEHTLA, MADIS y ROSIN, ARGO: “A conceptual design method for the general electric vehicle,” *Estonian Journal of Engineering*, **14** (1), pp. 3–16, 2008, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00163-012-0127-z>.

- org/10.3176/eng.2008.1.01.
- SERRANO, JULIO; BRUSCAS, GARCIA M. y ROMERO, FERNANDO: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Diseño para fabricación y montaje*, pp. 107–121, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- SHADMEHRI, NILOOFAR: *Methode de conception prescriptive des produits “A fin de transmettre les valeurs humaines par le design de produit”*, 241pp., **Thèse de Doctorat Spécialité Design Industriel**, Université D’Angers, Angers, Francia, 2009.
- SHAO, X.Y.; CHU, X.Z.; GAO, L. y QIU, H.B.: “A novel methodology to manage uncertainty for multidisciplinary design and optimization in conceptual design,” *Advanced Materials Research*, **44-46**, pp. 225–232, 2008.
- SHIN, JONG-HO; JUN, HONG-BAE; KIRITSIS, DIMITRIS y XIROUCHAKIS, PAUL: “A decision support method for product conceptual design considering product lifecycle factors and resource constraints,” *Int J Adv Manuf Technol*, **52**, pp. 865–886, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2798-9>.
- SIMEÓN, ROLANDO ESTEBAN: *Diseño optimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos*, 171pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas)**, Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, 1999.
- SMITH, GREGORY; RICHARDSON, JENKINS; SUMMERS, JOSHUA D y MOCKO, GREGORY M: “Concept exploration through morphological charts: an experimental study,” *Journal of Mechanical Design*, **134** (5), pp. 051004–1–051004–10, 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4006261>.
- SREEDHARAN, SRINAND: *Tools for innovation and conceptual design*, 169pp., **Ph.D. dissertation (in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy)**, Texas A&M University, Texas, E.U.A. 2003.
- STANKOVIĆ, TINO: *Grammatical evolution of technical processes*, 206pp., **Doctoral Thesis**, University of Zagreb, Zagreb, Croacia, 2011.
- STANKOVIĆ, TINO; SHEA, KRISTINA; STORGA, MARIO y MARJANOVIĆ, DORIAN: “Grammatical evolution of technical processes,” En: *Proceedings of the ASME international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference (IDETC/CIE 2009)*. San Diego, California, 2009.
- STONE, ROBERT B.: *Towards a Theory of Modular Design*, 289pp., **Ph.D. dissertation (in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy)**, University of Texas at Austin, Austin, E.U.A.

- 1997.
- STONE, ROBERT B. y WOOD, KRISTIN L.: “Development of a Functional Basis for Design,” *Journal of Mechanical Design*, **122** (4), pp. 359–370, 2000, Disponible en: http://function.basiceng.umn.edu/delabsite/publications/journals/FB-JMD_final.pdf.
- STONE, ROBERT B.; WOOD, KRISTIN L. y CRAWFORD, RICHARD H.: “A Heuristic Method to Identify Modules from a Functional Description of a Product,” En: *Proceedings of DETC '98, DET98/DTM-5642*, 1998.
- STONE, ROBERT B; WOOD, KRISTIN L y CRAWFORD, RICHARD H: “A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures,” *Design Studies*, **21** (1), pp. 5–31, 2000, Disponible en: <http://function.basiceng.umn.edu/delabsite/publications/journals/Heuristic-DS.pdf>.
- STORGA, M: “Traceability in product development,” En: *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia, 2004*.
- SUH, NAM PYO: *The Principles of Design*: Oxford University Press, 1990.
- *Axiomatic design: advances and applications*, New York, Oxford: Oxford University Press, 2001.
- SUMMERS, JOSHUA D; VARGAS-HERNÁNDEZ, NOÉ; ZHAO, ZUOZHI; SHAH, JAMI J y LACROIX, ZOÉ: “Comparative study of representation structures for modeling function and behavior of mechanical devices,” *Proceedings of DETC2000: Computers in Engineering*, pp. 775–787, 2001.
- SUTINEN, KRISTER; ALMEFELT, LARS y MALMQVIST, JOHAN: “Implementation of requirements traceability in systems engineering tools,” *Proceedings of Product Models 2000*, pp. 313–328, 2000.
- TAGUE, NANCY R.: *The Quality Toolbox*: ASQ Quality Press, segunda edición, 2005.
- TOMIYAMA, T.; GU, P.; JIN, Y.; LUTTERS, D.; KIND, CH. y KIMURA, F.: “Design methodologies: Industrial and educational applications,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **58** (2), pp. 543–565, 2009, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.003>.
- TSENG, KEVIN C. y EL-GANZOURY, WALEED: “An intelligent system based on concurrent engineering for innovative product design at the conceptual design stage,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **63** (5-8), pp. 421–447, 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-3932-7>.
- ULLMAN, DAVID G.: *The mechanical design process*, New York: McGraw-Hill, 1992.
- *The mechanical design process*, New York: McGraw-Hill Higher Education, cuarta edición, 2010.
- ULRICH, K. y EPPINGER, S.: *Product Design and Development*, New York: McGraw-Hill, 1995.

- UM, DUGAN: *Solid Modeling and Applications*: Springer, 2015.
- VAN-AKEN, JOAN ERNST: “Valid knowledge for the professional design of large and complex design processes,” Report 04.11, Eindhoven Centre for Innovation Studies, Department of Technology Management Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands, 2004.
- VDI-2221: “Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products,” 1987.
- VDI-2222: “Methodic Development of Solution Principles,” 1997.
- VDI-2225: “Technisch-wirtschaftliches Konstruieren,” 1997.
- VILA, CARLOS y CONTERO, MANUEL: “Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora”, *Herramientas para la interacción y comunicación*, pp. 229–236, Barcelona, España: Edicions UPC, 2006.
- VIÑAS, DAVID; TRESSERRAS, JOSEP; GONZÁLEZ, PAULA y VILLELA, ANDRÉS: “QFD Aplicado: Competitividad e Innovación de Cara al Mercado,” En: *XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica de INGEGRAF*, Barcelona, 2006.
- WALLACE, KEN y CLARKSON, J.: “An Introduction to the Design Process,” January, 1999, Disponible en: http://pergatory.mit.edu/2.007/Resources/design/design_process.pdf.
- WALLACE, KEN M.: “Educating Engineers in Design Lessons Learnt from the Visiting Professors Scheme,” 2004, Disponible en: http://www.raeng.org.uk/education/vps/pdf/design_engineering.pdf.
- WALLACE, KEN M. y BLESSING, LUCIËNNE T.M.: “Observations on some german contributions to engineering design - In memory of Professor W. Beitz,” *Research in Engineering Design* (12), 2000.
- WANG, LIN; NG, WEE KEONG y SONG, BIN: “Extended DCSP Approach on Product Configuration with Cost Estimation,” *Concurrent Engineering*, **19** (2), pp. 123–138, 2011.
- WHITNEY, DANIEL.E.: “Manufacturing by Design,” *Harvard Business Review*, **66** (4), pp. 83–91, 1988.
- WIEGERAAD, S.J.H.W.: *Development of a Design History Information System. Capturing and Re-Using the Knowledge Behind the Product*, 164pp., **Ph.D. dissertation**, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Holanda, 1999.
- WIESNER, STEFAN; PERUZZINI, MARGHERITA; HAUGE, JANNICKE BAALSRUD y THOBEN, KLAUS-DIETER: “Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges”, *Requirements Engineering*, pp. 103–132, Cham: Springer International Publishing, 2015, DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-13776-6_5.
- WITHANAGE, CHATHURA; PARK, TAEZOON y CHOI, HAE-JIN: “A Concept Evaluation Method for Strategic Product Design with Concurrent Consideration of Future Customer Requirements,” *Concurrent*

- Engineering*, **18** (4), pp. 275–289, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/0.1177/1063293X10389796>.
- WOOD, KRISTIN L. y GREER, JAMES L.: *Function-based synthesis methods in engineering design*, Formal engineering design synthesis: Cambridge University Press, 2001.
- WYNN, M.T.; OUYANG, C.; TER HOFSTEDE, A.H.M. y FIDGE, C.J.: “Data and process requirements for product recall coordination,” *Computers in Industry*, **62** (7), pp. 776–786, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2011.05.003>.
- YACUZZI, ENRIQUE y MARTÍN, FERNANDO: “Aplicación del método de Kano en el diseño de un producto farmacéutico,” report, Universidad del CEMA, 2002.
- YANG, K. y ZHANG, H.: “Compatibility analysis and case studies of Axiomatic Design and TRIZ,” *TRIZ Journal*, 2000.
- YUAN, YANLI y GUAN, TIANMIN: “Design of Individualized Wheelchairs Using AHP and Kano Model,” *Advances in Mechanical Engineering*.
- ZAMENOPOULOS, THEODORE: “A complexity theory of design intentionality,” *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, pp. 1–21, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0890060411000023>.
- ZENG, Y. y GU, P.: “A science-based approach to product design theory Part I: formulation and formalization of design process,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **15** (4), pp. 331–339, 1999.
- ZHU, DAUW-SONG; LIN, CHIH-TE; TSAI, CHUNG-HUNG y WU, JI-FU: “A study on the evaluation of customers’ satisfaction - the perspective of quality,” *International Journal for Quality research*, **4** (2), pp. 105–116, 2010.
- ZIMMER, L. y ZABLIT, P.: “Global aircraft predesign based on constraint propagation and interval analysis,” En: *Proceedings of CEAS Conference on multidisciplinary Aircraft design and Optimisation*, 2001.
- ZULTNER, RICHARD E y MAZUR, GLENN H.: “The Kano model: recent developments,” En: *Transactions from The Eighteenth Symposium on Quality Function Deployment*, pp. 109–116, 2006.

LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

Caracteres latinos

A_E	Alcance de la especificación inicial
A_{cc}	Acción
AHP	<u>Analytic Hierarachy Process</u>
AMFE	<u>Análisis Modal de Fallos y Efectos</u>
AutoCAD	Programa de diseño asistido por computadora para dibujo en dos y tres dimensiones desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk
AutoLISP	Lenguaje de programación derivado del lenguaje Lisp, es utilizado para generar rutinas orientadas al uso específico de AutoCAD
$avfe$	Autovector matriz del fogón eficiente para biomasa
$avmc$	Autovector matriz del molino de cuchillas
$avmv$	Autovector matriz del molino de viento
BD	Bases de datos
BD^F	Base de datos de las funciones
BS	<u>British Standard</u> (Norma Británica)
CAD	<u>Computer Aided Design</u> (Diseño Asistido por Computadora)
CADProcessDesigner	Editor de estructuras funcionales (software)
CAE	<u>Computer Aided Engineering</u> (Ingeniería Asistida por Computadora)
CAM	<u>Computer Aided Manufacturing</u> (Fabricación Asistida por Computadora)
CEDEMA	Centro de Desarrollo de la Maquinaria
C_{EI}	Cualidades de la especificación inicial
C_F	Flujos de conexión
C_o	Indicador de eficiencia del costo
C_{oid}	Valor del costo ideal
C_{onm}	Valor del costo para cada función n con la solución m
CODISE-TZR	Diseño y selección de conceptos a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales (Software)
CR	Característica del requerimiento
C^{RFE}	Cualidades de los requerimientos funcionales estratificados
C_{RF}	Cualidades de los requerimientos funcionales
$C\phi_A$	Vector de cualidades
D/B	Base de datos
DF_G	Descomposición de la función global
DFA	<u>Design for Assembly</u> (Diseño para el ensamble)
DFE	<u>Design For Environment</u> (Diseño para el entorno)
DFE	<u>Design for Functionability</u> (Diseño para la función)
DFM	<u>Design For Manufacturability</u> (Diseño para la manufactura)
DFR	<u>Design For Reliability</u> (Diseño para la confiabilidad)

DHT	<u>Design History Tool</u>
D^P	Desempeño del producto
DRL	<u>Design Rationale Language</u>
ECTR	Evaluación conceptual por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales
E_f	Alcance de la especificación inicial
EF_P	Estructuras funcionales
E_i	Especificación inicial
E_l	Indicador de consumo eléctrico
ELA	Empresa de Logística Agropecuaria
E_{lid}	Valor del consumo eléctrico ideal
E_{lnm}	Valor del consumo eléctrico para cada función n con la solución m
EM	Energía mecánica
E_P	Estratificación del producto
ER	Cualidades del requerimiento
E^T	Especificaciones técnicas del producto
E.T.S.I.	Escuela Técnica Superior de Ingenieros
f	Funciones
F_G	Función global
F_P	Funciones genéricas
f_{le}	Flujos de entrada
f_{ls}	Flujos de salida
FBS	<u>Function Behavior State</u>
GECOND	Módulo de Generación de Variantes de Conceptos de Diseño para Proyectos de Diseño Mecánico (software)
GRProject	Gestor de Requerimientos Funcionales para Proyectos de Diseño Mecánico (software)
IBIS	<u>Issue Based Information System</u>
ISO	<u>Internacional Standard Organization</u> (Organización Internacional de Normas)
K	Vector K
Mag	Magnitud
$Mcfe$	Matriz calculada del fogón eficiente para biomasa
$Mcmc$	Matriz calculada del molino de cuchillas
$Mcmv$	Matriz calculada del molino de viento
Mfc	Matriz de funciones cualitativas
MFE	Matriz del fogón eficiente para biomasa
$MFFE$	Matriz final del fogón eficiente para biomasa
$MFMC$	Matriz final del molino de cuchillas
$MFMV$	Matriz final del molino de viento
MMC	Matriz del molino de cuchillas
MME	Matriz morfológica extendida
MMV	Matriz del molino de viento
MO	Modo de operación
MOCS	Métrica para el ordenamiento de los conceptos de solución
$Msfc$	Matriz sintetizada de funciones cualitativas
N_r	Necesidad real
OR	<u>Operational Research</u>
P	Producto
PHI	Procedural Hierarchy of Issues
P_r	Indicador de productividad
P_{rid}	Valor de la productividad ideal
P_{rnm}	Valor de la productividad para cada función n con la solución m

p_k^p	Propiedad del producto
PS	Principios de solución
QFD	Quality Function Development (Desarrollo de la Función de Calidad)
QOC	Question Option Criterion
R	Requerimiento
R^F	Especificaciones de diseño o requerimientos funcionales
R_E^{FP}	Requerimientos funcionales estratificados
R_I^{FP}	Requerimientos funcionales iniciales del producto
SINCOS	Módulo de Síntesis Conceptual de Soluciones (software)
S^D	Soluciones de diseño
TCS	Tamaño del campo teórico de soluciones
T^E	Proceso de transformación de la evaluación
TRIZ	Theory of Inventive Problem Solving
A_{cc}	Proceso de transformación de la síntesis
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Norma Alemana para Ingenieros)
W_i	Valores de pesos
Y_{id}	Valor deseado de la función objetivo
Y_v	Valor de la función objetivo
Z	Valor de Múltiple Criterio que toma en cuenta la distancia de Tchebysheff aumentado

Caracteres griegos

δ	Valor booleano
ξ	Vector de las funciones con cualidades para la trazabilidad
ξ_S	Vectores de las funciones con cualidades para la trazabilidad sintetizada
ϕ	Matriz de requerimientos funcionales
ϕ_A	Matriz ampliada de requerimientos funcionales
ϕ_S	Matriz sintetizada de requerimientos funcionales

ANEXOS

ANEXO 1. EVOLUCIÓN DE LA TEORÍA DEL DISEÑO

Tabla 1.1. Algunos trabajos representativos en la evolución de la teoría del diseño (adaptado de Chaur (2004); Pahl *et al.* (2007)).

Autor	Teoría o Metodología	País	Año
Redtenbacher	<u>Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbau.</u>	Alemania	1852
Reuleaux	<u>Konstruktionslehre für den Maschinenbau.</u>	Alemania	1854
Reuleaux	<u>Teoretische Kinematik: Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens.</u>	Alemania	1875
Bach	<u>Die Maschinenelemente.</u>	Alemania	1881
Riedler	<u>Maschinenzeichnen.</u>	Alemania	1913
Erkens	<u>Beiträge zu Konstruktionserziehung.</u>	Alemania	1928
Kesselring	<u>Die starke Konstruktion.</u>	Alemania	1942
Wögerbauer	<u>Die Technik des Konstruierens.</u>	Alemania	1943
Zwicky	<u>The Morphological Method of Analysis and Construction.</u>	EUA[1]	1948
Nieman	<u>Machinelemente.</u>	Alemania	1950
Kesselring	<u>Technische Kompositionslehre.</u>	Alemania	1954
Altshuller	<u>Theory of Inventive Problem Solving.</u>	URSS	1956
Matousek	<u>Konstruktionslehre des allgemeinen Maschinenbaus.</u>	Alemania	1957
Marples	<u>The decisions of engineering design.</u>	GB	1960
Asimow	<u>Introduction to design.</u>	EUA	1962
Leyer	<u>Maschinenkonstruktionslehre.</u>	Alemania	1963-71
Alexander	<u>Notes on Synthesis of Form.</u>	EUA	1964
Watts	<u>The elements of design.</u>	GB	1966
Luckman	<u>The Social Construction of Reality: A Treatise in the Sociology of Knowledge.</u>	GB	1967
Rodenacker	<u>Methodisches Konstruieren.</u>	Alemania	1970
Archer	<u>Systematic method for designing.</u>	GB	1971
French	<u>Conceptual Design for engineers.</u>	GB	1971
Tudela	<u>Conocimiento y Diseño.</u>	México	1971
Hubka y WDK School	<u>Design Science.</u>	Alemania	1973
Koller	<u>Eine Algorithmisch-physikalisch orientierte Konstruktionsmethodik.</u>	Alemania	1973
VDI-GKE	<u>VDI Guideline 2221: Systematic Approach to the design of technical systems and products.</u>	Alemania	1973
Hansen	<u>Konstruktionswissenschaft - Grundlagen und Methoden.</u>	Alemania	1974
Munari	<u>¿Cómo nacen los objetos?</u>	Italia	1974
Roth	<u>Aufbau und handhabung von Konstruktionskatalogen.</u>	Alemania	1974
Burdek	<u>Design: Geschichte, Theorie und Praxis der Produktgestaltung.</u>	Alemania	1976
Olsson	<u>Systematisk Konstruktion.</u>	Suecia	1976
Sohlenius et al	<u>Prodevent (Orderstyrd, kundanpassad produktframtagning).</u>	Suecia	1976
Pahl y Beitz	<u>Engineering Design a Systematic Approach.</u>	Alemania	1977-07
Maldonado	<u>El diseño industrial reconsiderado.</u>	España	1977
Taguchi	<u>Off-line Quality Control.</u>	Japón	1977-78
Suh	<u>Axiomatic Design.</u>	EUA	1978
Yoshikawa	<u>General Design Theory.</u>	Japón	1980
Jones	<u>Design methods, seeds of human futures.</u>	GB	1980
Kano	<u>Attractive Quality and Must-be Quality.</u>	Japón	1982
Boothroyd y Dewhurst	<u>DFM/DFA.</u>	EUA	1983

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 1.1.

Autor	Teoría o Metodología	País	Año
Pugh	<u>Total Design.</u>	GB	1985
Ullman	<u>The Mechanical Design Process.</u>	EUA	1986-11
Clausing	<u>QFD Total Quality Development.</u>	EUA	1988
Cross	<u>Engineering Design Methods.</u>	GB	1989
BS 7000	<u>BS 7000 British Standard, Guide to managing product design.</u>	GB	1989
Takeda	<u>Modeling Design Process. Analysis of Design Protocol by Functional Evolution Process Model.</u>	Japón	1990
Cooper	<u>Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products.</u>	Canadá	1990
Roozenburg y Eekels	<u>Product design, Fundamentals and Methods.</u>	Alemania	1991
Chakrabarti	<u>Towards a decision-support framework for mechanical conceptual design.</u>	GB	1991
Andreasen	<u>Chromosome model.</u>	Dinamarca	1992
Dixon y Poli	<u>Engineering Design and Design for Manufacturing.</u>	EUA	1995
Ulrich y Eppinger	<u>Product Design and Development.</u>	EUA	1995
Prasad	<u>Concurrent Engineering Fundamentals.</u>	EUA	1997
Stone	<u>Towards a Theory of Modular Design.</u>	EUA	1997
Wallace	<u>An introduction to the design process.</u>	GB	1998
Dieter	<u>Engineering design - A materials and processing approach.</u>	EUA	2000
Maury	Aplicación de las técnicas de Ingeniería Concurrente al Diseño Mecánico.	España	2000
Reymen	<u>Improving design processes through structured reflection: A domain independent approach.</u>	Holanda	2001
Riba	Diseño Concurrente.	España	2002
Nadeau	<u>De l'analyse fonctionnelle à la créativité technique et à l'innovation."</u>	Francia	2002
Scaravetti	<u>Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide a la decisión en conception préliminaire.</u>	Francia	2004
Chaur	Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa.	España	2005
León	Metodología para la detección de requerimientos subjetivos en el diseño de producto.	España	2005
Ferrer	Contribución metodológica en técnicas de diseñar para fabricación.	España	2007
Moreira	Modelado y desarrollo de un modelo computacional de síntesis interactivo y multirrelacional para guiar la actividad de diseño en la fase conceptual.	España	2007
Raharjo	<u>Some further studies on improving QFD methodology and analysis.</u>	Singapur	2008
León	Sistémica aplicada al diseño de productos en Venezuela: El Diseño Conceptual como parámetro de partida para el diseño de nuevos productos.	España	2009
Shadmehri	<u>Methode de conception prescriptive des produits "A fin de transmettre les valeurs humaines par le design de produit".</u>	Francia	2009
Salazar	Estudio de la innovación tecnológica en el proceso de diseño y desarrollo de producto: aplicación a las PyMEs de la industria auxiliar del automóvil, caso comparativo Estado de México y Cataluña.	España	2012
Helms	<u>Object-Oriented Graph Grammars for Computational Design Synthesis.</u>	Alemania	2013
Fin de la tabla 1.1.			

ANEXO 2. MODELO DE PAHL Y BEITZ

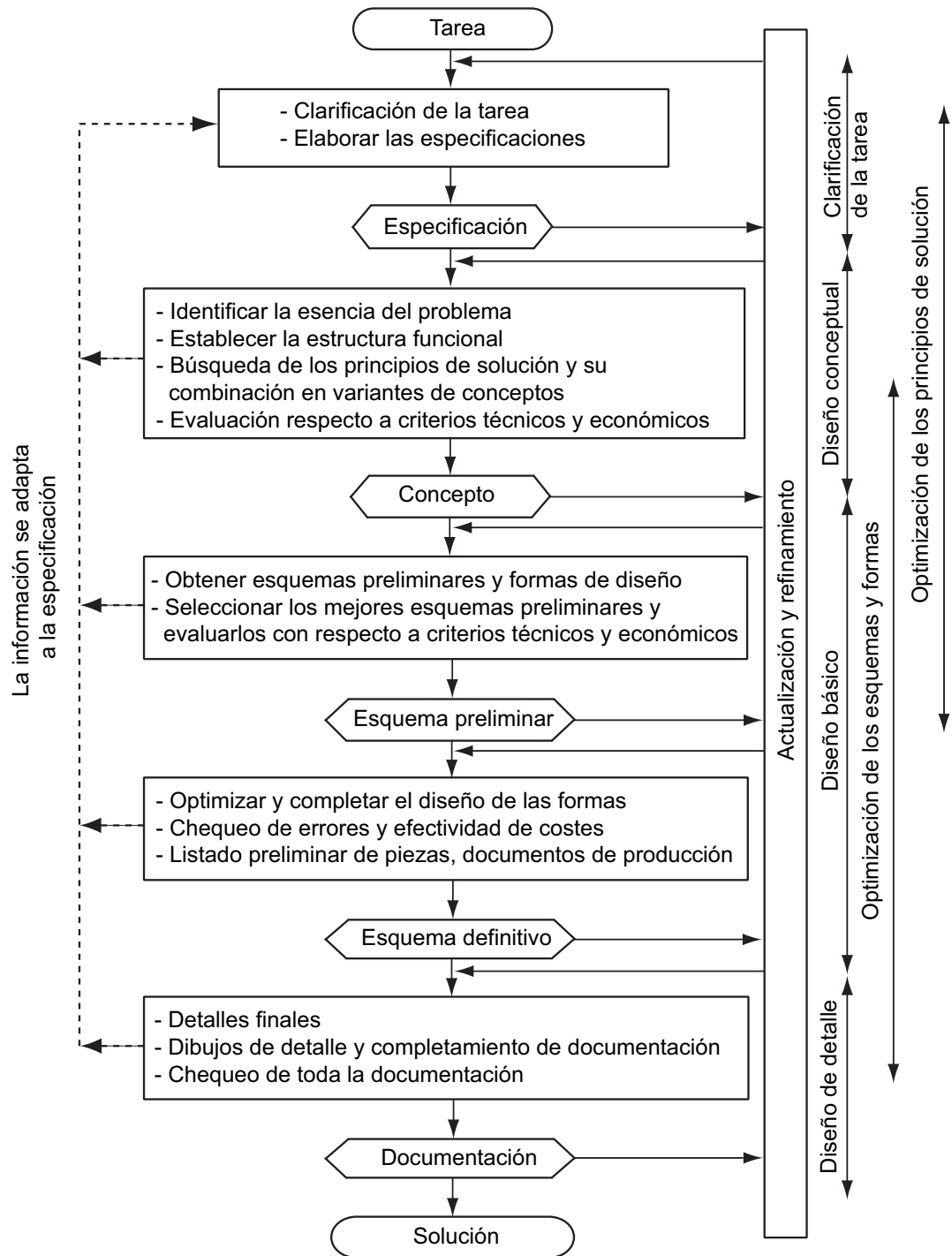


Figura 2.1. Modelo prescriptivo de Pahl y Beitz (traducido de Pahl *et al.* (2007)).

ANEXO 3. BASE FUNCIONAL DE STONE

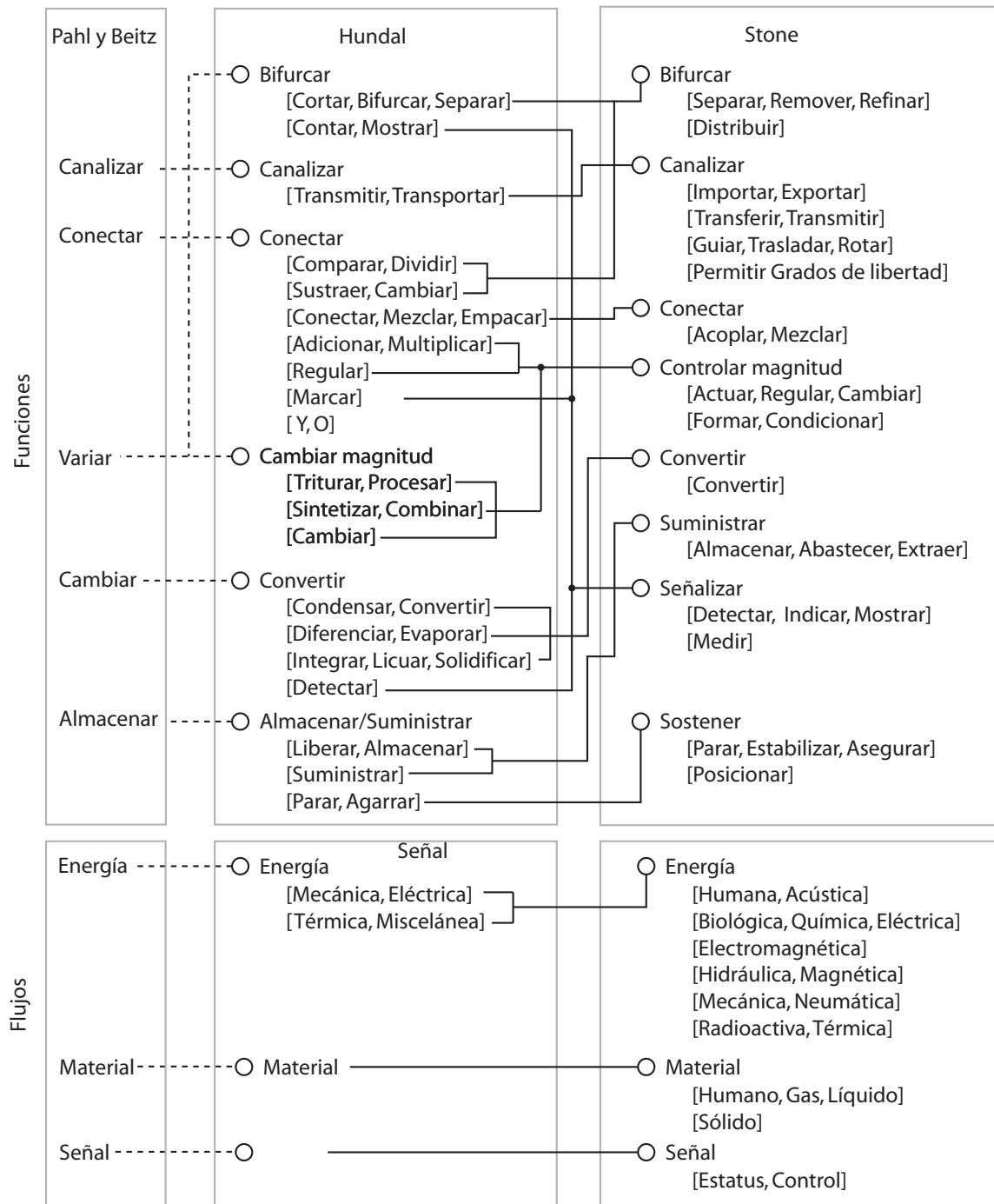


Figura 3.1. Base funcional de referencia utilizada (traducido de Stone y Wood (2000)).

ANEXO 4. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

En este anexo se presentan las herramientas computacionales desarrolladas para el proceso de síntesis conceptual de soluciones a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales.

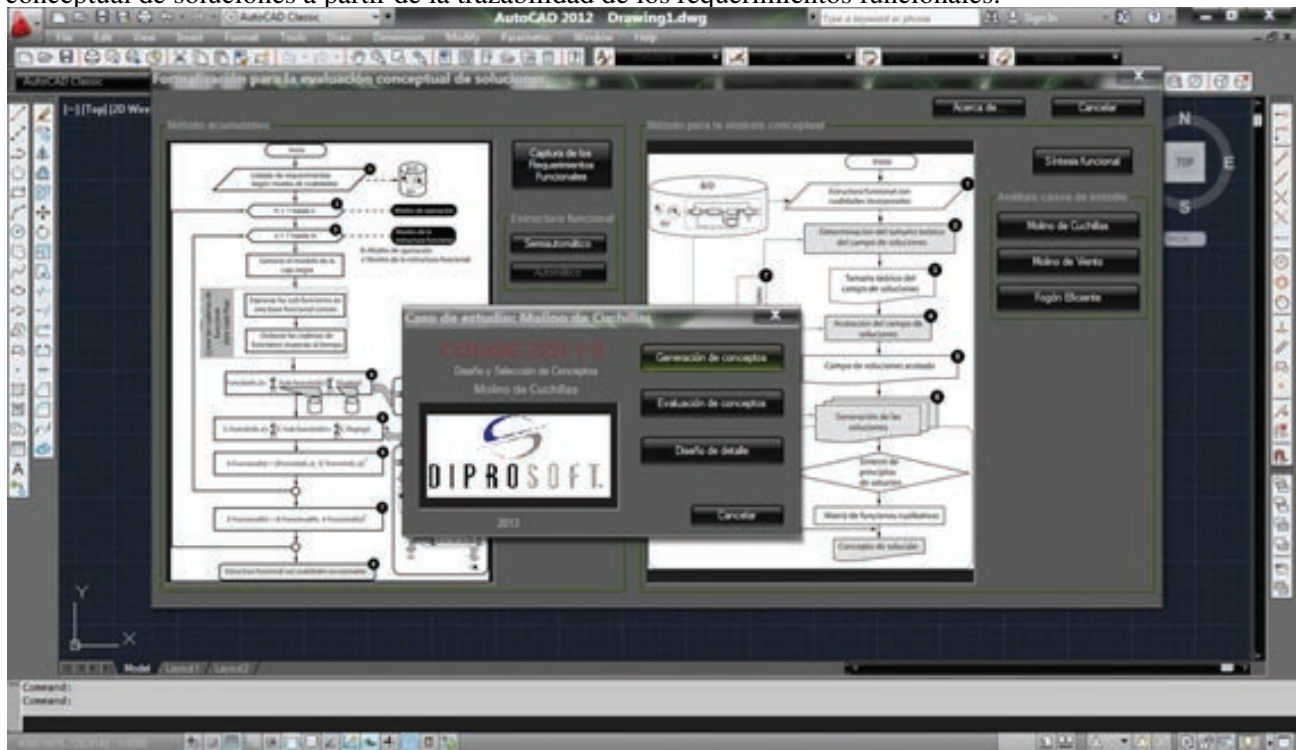


Figura 4.1. Diálogo del software CODISE-TZR.

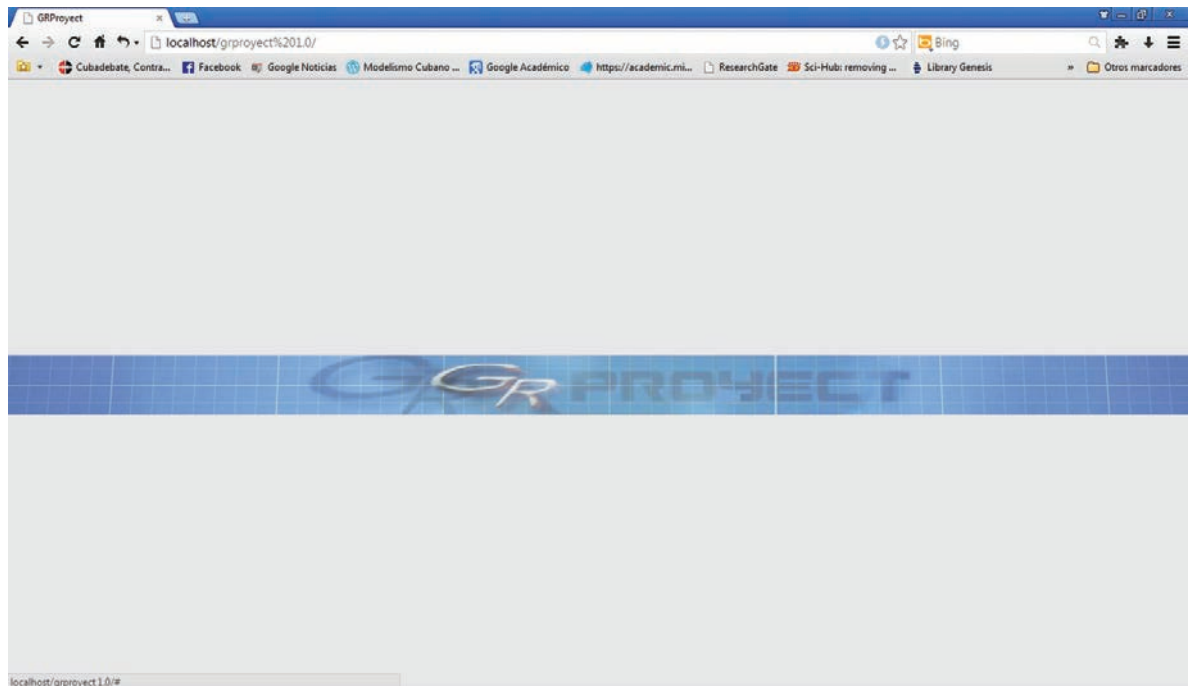


Figura 4.2. Entorno Web del software GRProject.

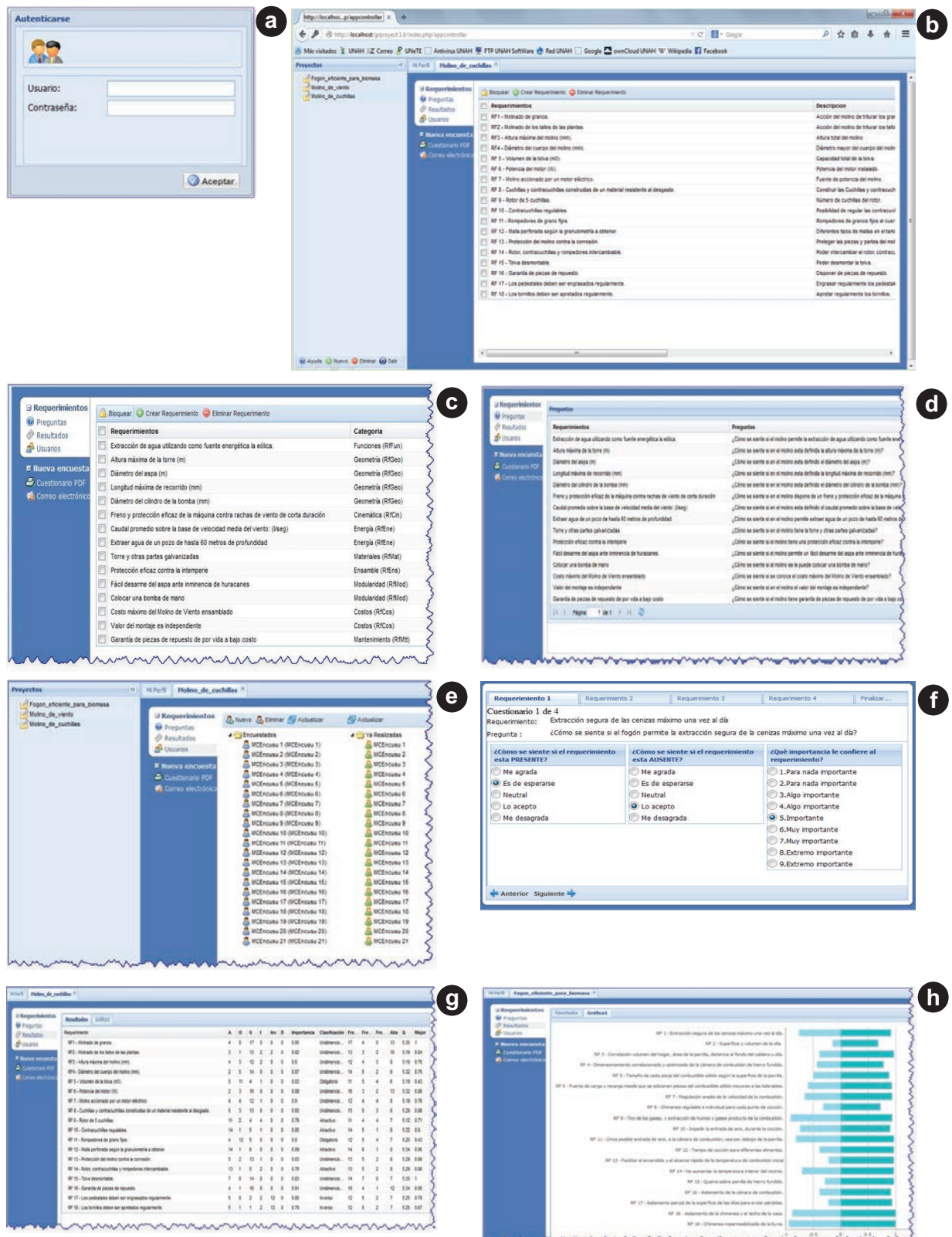


Figura 4.3. Diálogos del software GRProject.

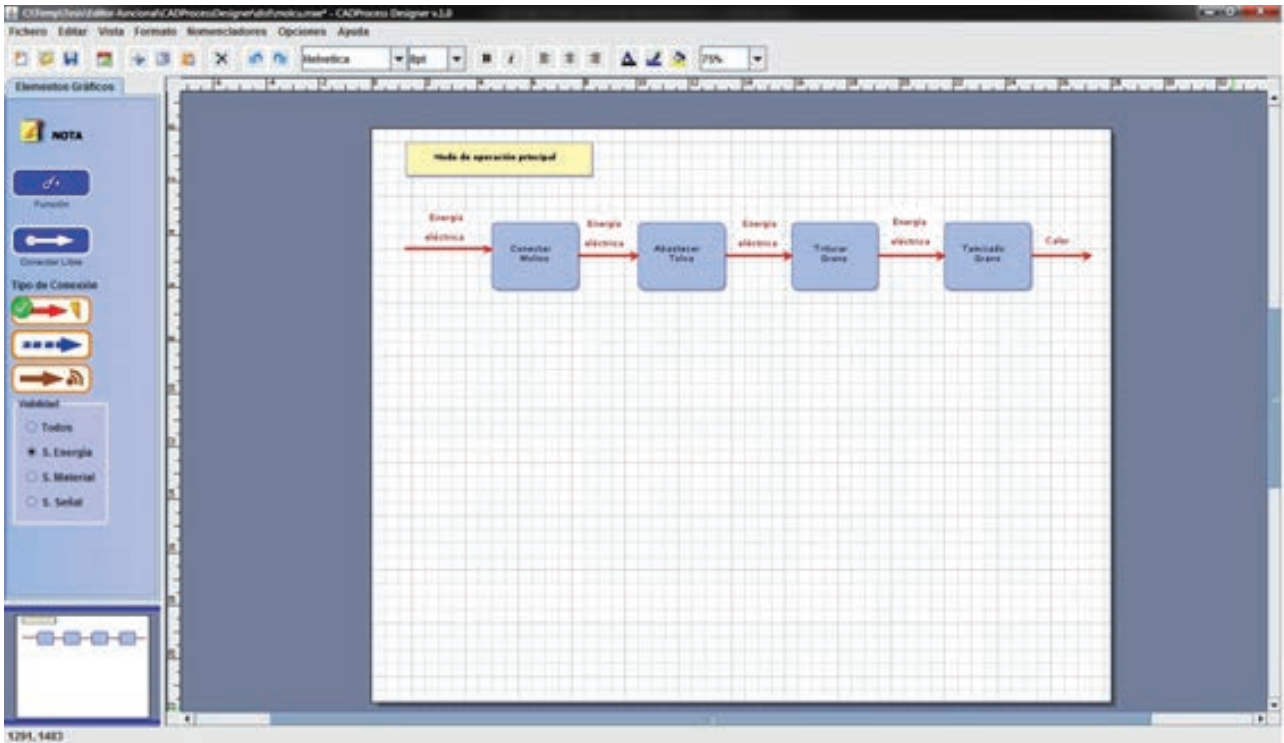


Figura 4.4. Interfaz del software CADProcessDesigner.

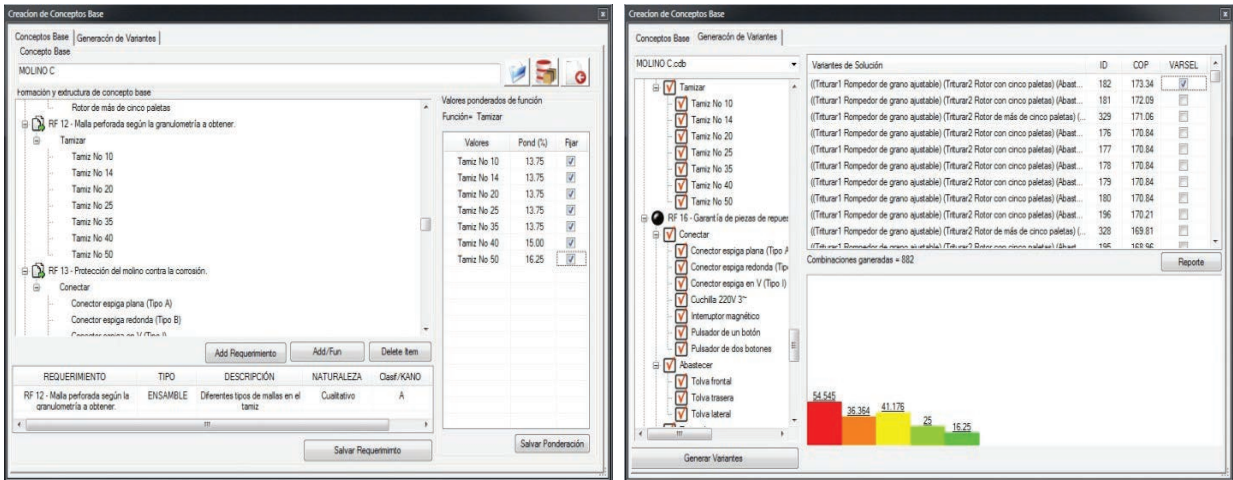


Figura 4.5. Diálogos del software GECOND.

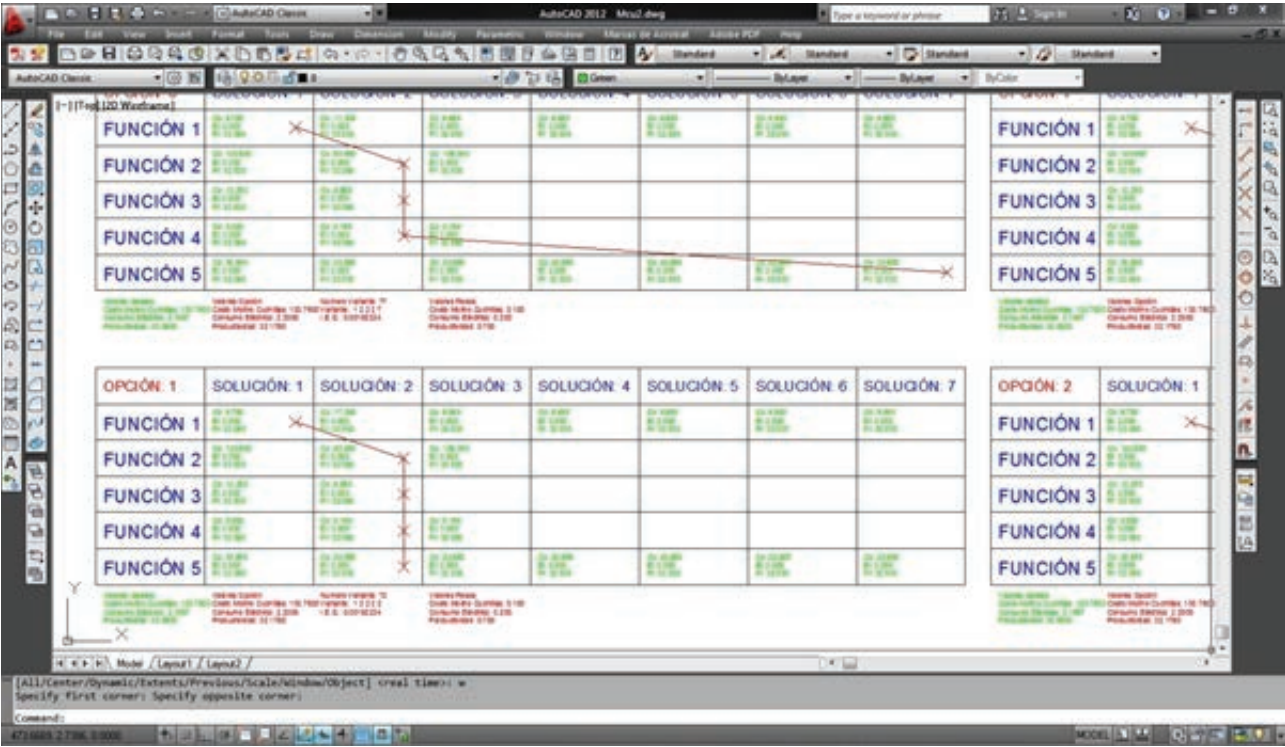


Figura 4.6. Salida en pantalla del software SINCOS.

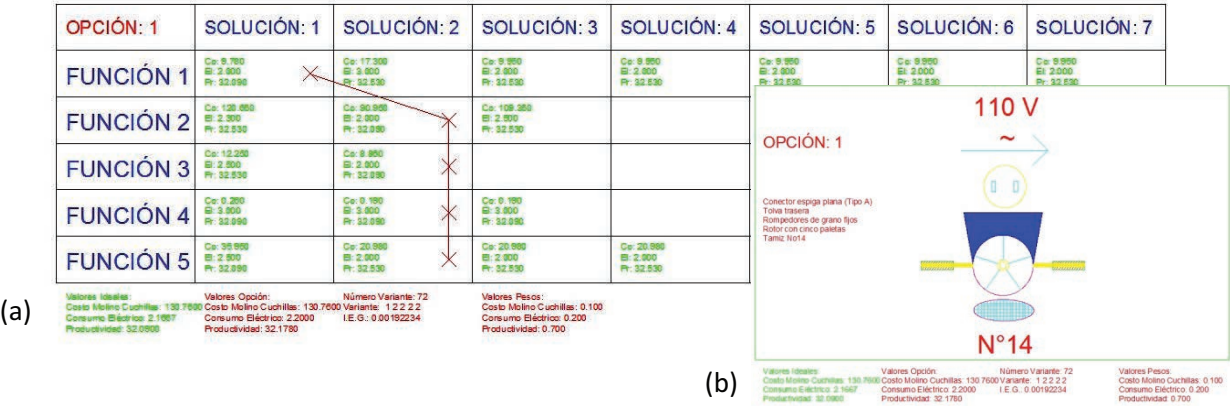


Figura 4.7. Principio de solución (a) y esquema conceptual (b) del molino de cuchillas, obtenidos a partir del uso de la aplicación SINCOS.

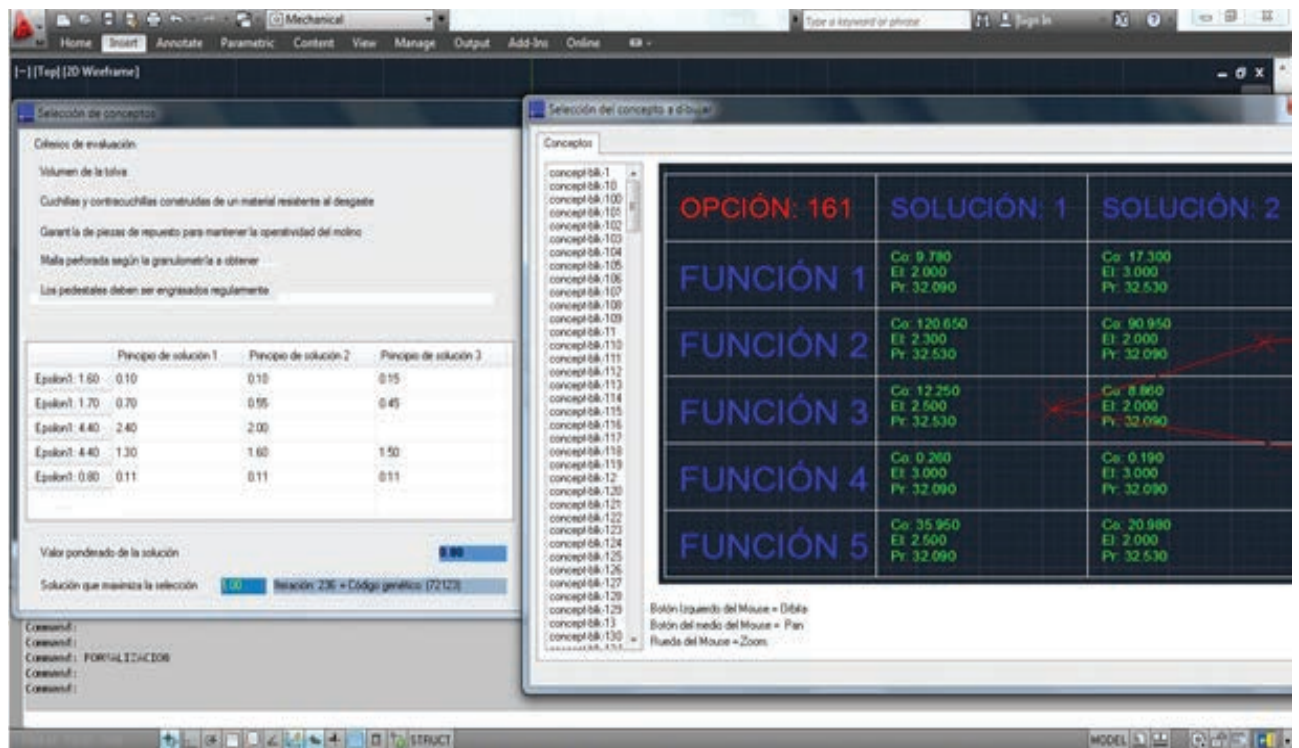


Figura 4.8. Diálogos de la evaluación de conceptos.

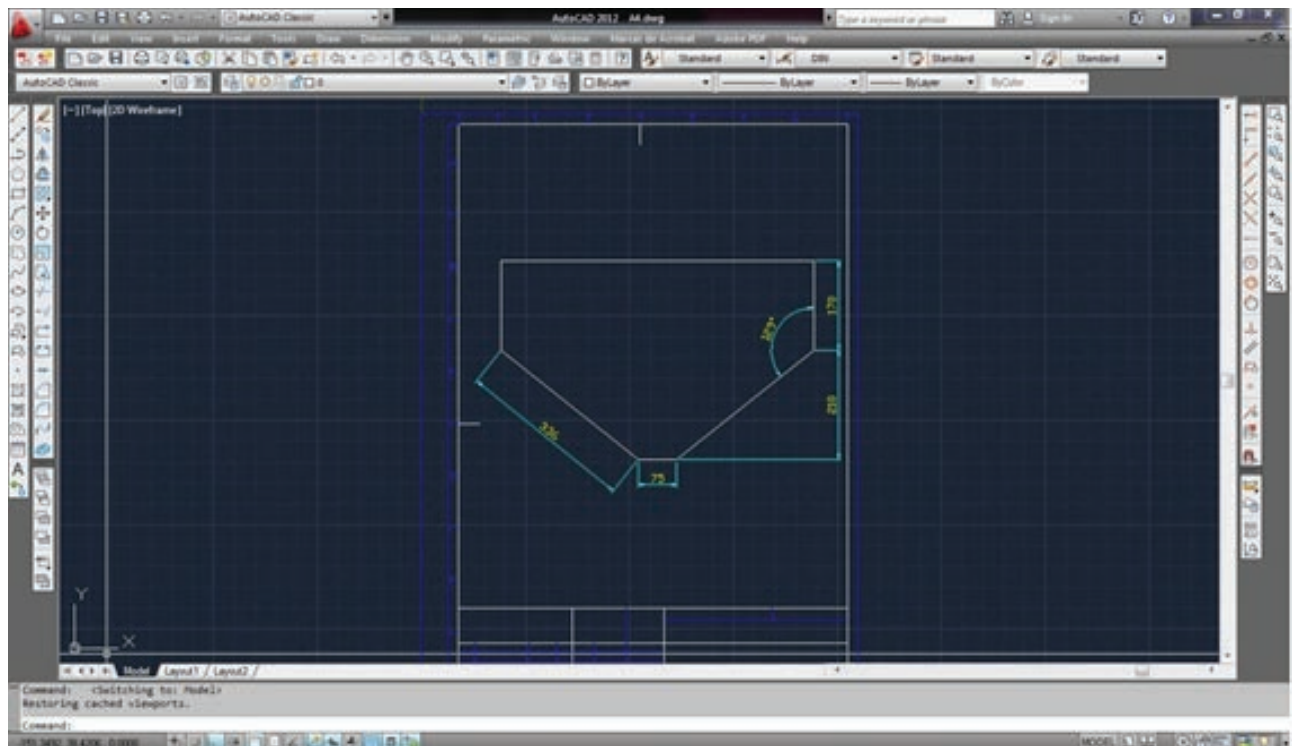


Figura 4.9. Salida en pantalla del diseño de detalle.

ANEXO 5. CASO DE ESTUDIO “MOLINO DE VIENTO”

En este anexo se presentan de forma resumida los resultados correspondientes al caso de estudio “Diseño de un molino de viento”.

Captura y representación de los requerimientos funcionales

Tabla 5.1. Listado de requerimientos funcionales para el diseño de un molino de viento.

No.	Concepto	Requerimiento	N\D	Descripción	Naturaleza
1	Funciones	Extracción de agua utilizando como fuente energética la eólica	Necesidad	Es la función principal	Cualitativo
2	Geometría	Altura máxima de la torre (m)	Necesidad	Acorde a las velocidades predominantes del aire	Cuantitativo
3	Geometría	Diámetro del aspa (m)	Necesidad	El diámetro del aspa usualmente varía entre 1.5 y 2 metros	Cuantitativo
4	Geometría	Longitud máxima del recorrido (mm)	Necesidad	Está determinada por el desplazamiento vertical del émbolo que succiona el agua	Cuantitativo
5	Geometría	Diámetro del cilindro de la bomba (mm)	Necesidad	Depende del sistema hidráulico a utilizar	Cuantitativo
6	Cinemática	Freno y protección eficaz de la máquina contra rachas de viento de corta duración	Necesidad	Lograr el frenado de la máquina ante la ocurrencia de rachas de viento de corta duración	Cuantitativo
7	Energía	Caudal promedio sobre la base de la velocidad media del viento: (l/seg)	Deseo	Permite determinar el tiempo de llenado del depósito de agua	Cuantitativo
8	Energía	Extraer agua de un pozo de hasta 60 metros de profundidad	Deseo	Dispositivos hidráulicos que permitan la extracción del agua en profundidades de hasta 60 metros	Cuantitativo
9	Materiales	Torre y otras partes galvanizadas	Deseo	Los materiales deben ser sometidos a un proceso de galvanizado	Cualitativo
10	Ensamble	Protección eficaz contra la intemperie	Deseo	Las piezas no galvanizadas deben disponer de una eficaz protección contra la intemperie	Cualitativo
11	Modularidad	Fácil desarme del aspa ante la inminencia de huracanes	Necesidad	Desarmar el aspa de una forma fácil y rápida ante la inminencia de huracanes	Cualitativo
12	Modularidad	Colocar una bomba de mano	Deseo	Bomba de mano para la extracción de agua ante la ausencia de viento	Cualitativo
13	Costos	Costo máximo del molino de viento ensamblado	Necesidad	Está definido el costo máximo del molino una vez ensamblado	Cuantitativo
14	Costos	Valor del montaje es independiente	Necesidad	El costo de montaje debe ser independiente al de ensamblado	Cuantitativo
15	Mantenimiento	Garantía de por vida de piezas de repuesto a bajo costo	Necesidad	Garantía de recambios y compra de piezas de repuesto a un bajo costo	Cuantitativo

La matriz de requerimientos funcionales (ϕ) del molino de viento se expone en la expresión (5.1).

$$\phi = \begin{bmatrix} \text{“Funciones”} & \text{“Extracción de agua utilizando como fuente energética la eólica”} & \text{“Necesidad”} & \text{“Es la función principal”} & \text{“Cualitativo”} \\ \text{“Geometría”} & \text{“Altura máxima de la torre (m)”} & \text{“Necesidad”} & \text{“Acorde a las velocidades predominantes del aire”} & \text{“Cuantitativo”} \\ \text{“Geometría”} & \text{“Diámetro del aspa (m)”} & \text{“Necesidad”} & \text{“El diámetro del aspa usualmente varía entre 1.5 y 2 metros”} & \text{“Cuantitativo”} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{“Costos”} & \text{“Valor del montaje es independiente”} & \text{“Necesidad”} & \text{“El costo de montaje debe ser independiente al de ensamblado”} & \text{“Cuantitativo”} \\ \text{“Mantenimiento”} & \text{“Garantía de piezas de repuesto de por vida a bajo costo”} & \text{“Necesidad”} & \text{“Garantía de recambios y compra de piezas de repuesto a un bajo costo”} & \text{“Cuantitativo”} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales

Tabla 5.2. Resultados concentrados de los valores obtenidos para el parámetro estadístico Q; de la diferencia Abs (a-b); y de la clasificación de los requerimientos Kano en la encuesta a usuarios.

No.	Requerimiento	A	O	U	I	Inv.	D	T	Q		Abs.	SE	Imp.	Mejor	Peor	C1	C2	Clas.
1	Extracción de agua utilizando como fuente energética la eólica	4	1	19	0	0	0	24	5,60	<	15	Si	0,94	0,96	-0,83	0,90	0,79	U
2	Altura máxima de la torre (m)	2	1	17	3	1	0	24	5,39	<	14	Si	0,76	0,83	-0,78	0,62	0,59	U
3	Diámetro del aspa (m)	2	1	16	5	0	0	24	6,02	<	11	Si	0,79	0,75	-0,71	0,59	0,56	U
4	Longitud máxima del recorrido (mm)	6	1	13	4	0	0	24	6,30	<	7	Si	0,71	0,79	-0,58	0,56	0,41	A
5	Diámetro del cilindro de la bomba (mm)	3	3	16	2	0	0	24	5,41	<	13	Si	0,77	0,79	-0,79	0,61	0,61	U
6	Freno y protección eficaz de la máquina contra rachas de viento de corta duración	3	1	20	0	0	0	24	5,21	<	17	Si	0,86	0,96	-0,88	0,83	0,76	U
7	Caudal promedio sobre la base de la velocidad media del viento: (l/seg)	4	1	17	2	0	0	24	5,69	<	13	Si	0,86	0,88	-0,75	0,75	0,64	U
8	Extraer agua de un pozo de hasta 60 metros de profundidad	5	0	15	4	0	0	24	6,02	<	10	Si	0,73	0,83	-0,63	0,61	0,46	A
9	Torre y otras partes galvanizadas	4	0	15	5	0	0	24	6,02	<	10	Si	0,77	0,79	-0,63	0,61	0,48	A
10	Protección eficaz contra la intemperie	2	0	19	3	0	0	24	5,29	<	16	Si	0,67	0,88	-0,79	0,59	0,53	U
11	Fácil desarme del aspa ante la inminencia de huracanes	0	1	23	0	0	0	24	4,17	<	22	Si	0,89	0,96	-1,00	0,85	0,89	U
12	Colocar una bomba de mano	14	0	4	6	0	0	24	6,32	<	8	Si	0,69	0,75	-0,17	0,52	0,12	A
13	Costo máximo del molino de viento ensamblado	6	1	15	2	0	0	24	6,33	<	9	Si	0,70	0,88	-0,67	0,61	0,47	A
14	Valor del montaje es independiente	5	1	12	5	1	0	24	5,96	<	7	Si	0,61	0,74	-0,57	0,45	0,35	I
15	Garantía de por vida de piezas de repuesto a bajo costo	0	0	24	0	0	0	24	3,61	<	24	Si	0,93	1,00	-1,00	0,93	0,93	A

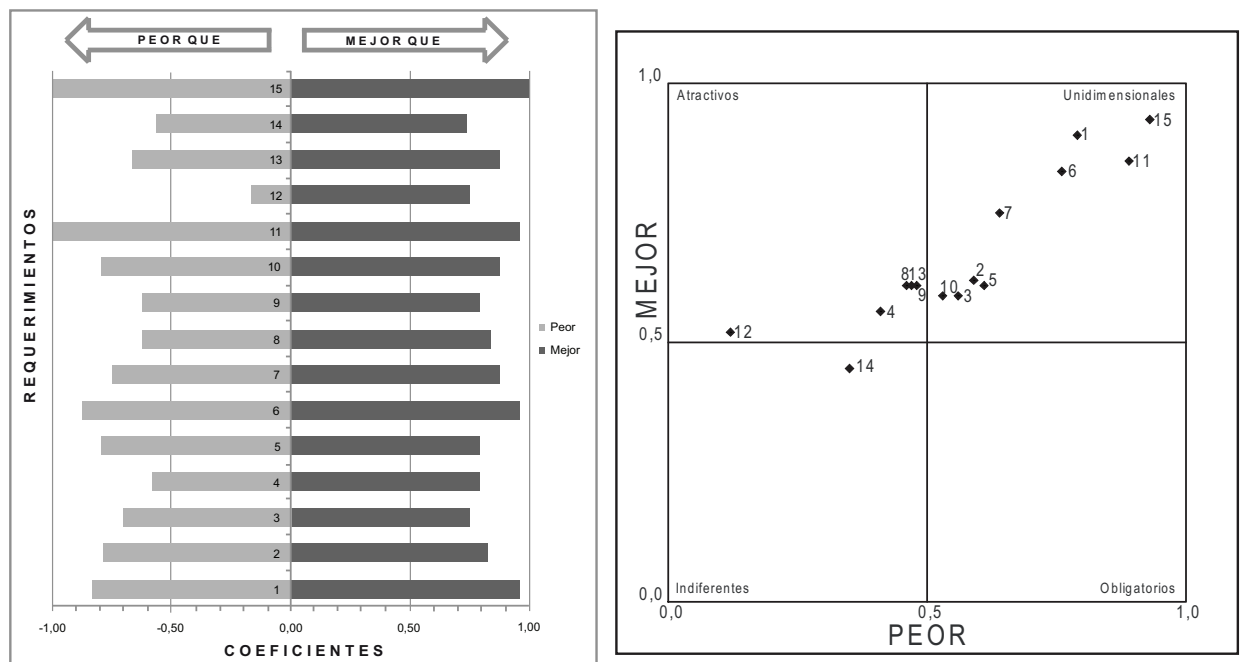
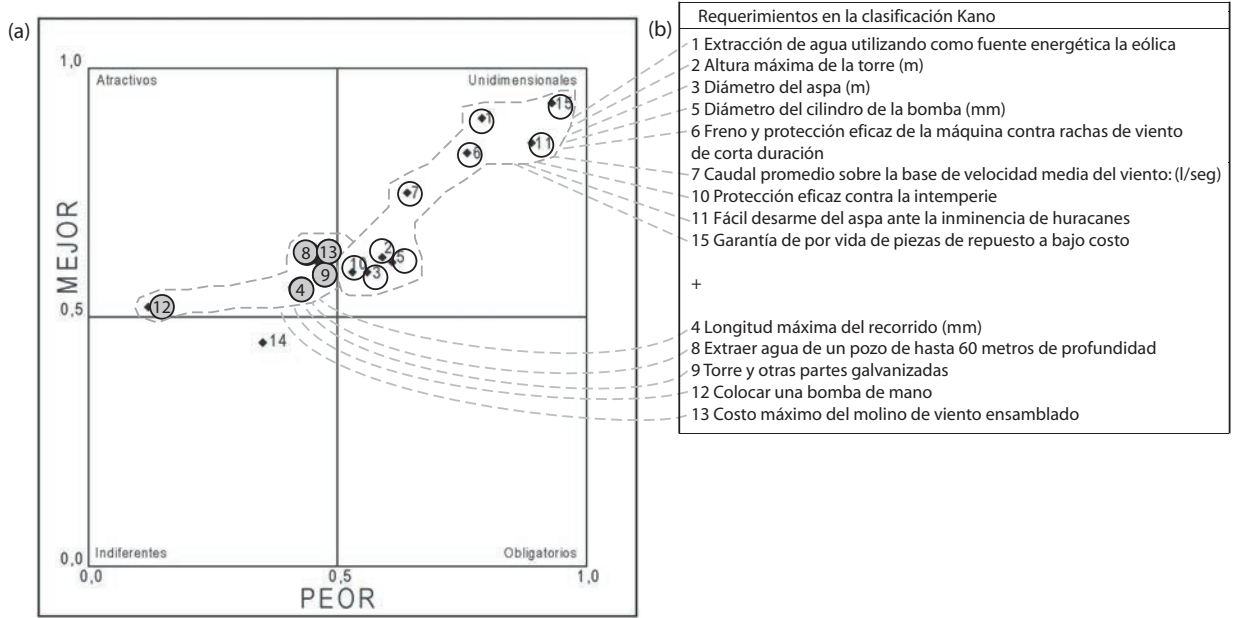


Tabla 5.3. Combinaciones necesarias de los requerimientos funcionales para el diseño de un producto ampliado en base a los resultados obtenidos.

Tipo de producto	Requerimientos en la clasificación Kano
Producto ampliado	1 Extracción de agua utilizando como fuente energética la eólica
	2 Altura máxima de la torre (m)
	3 Diámetro del aspa (m)
	5 Diámetro del cilindro de la bomba (mm)
	6 Freno y protección eficaz de la máquina contra rachas de viento de corta duración
	7 Caudal promedio sobre la base de la velocidad media del viento: (l/seg)
	10 Protección eficaz contra la intemperie
	11 Fácil desarme del aspa ante la inminencia de huracanes
	15 Garantía de por vida de piezas de repuesto a bajo costo
	+
	4 Longitud máxima del recorrido (mm)
	8 Extraer agua de un pozo de hasta 60 metros de profundidad
	9 Torre y otras partes galvanizadas
	12 Colocar una bomba de mano
	13 Costo máximo del molino de viento ensamblado

**Figura 5.2.** Clasificación de los requerimientos en base a un producto ampliado.

Los vectores (K_n) , con la información descrita en la fila (i) de la matriz de requerimientos funcionales (ϕ) del molino de viento, se exponen en la expresión (5.2).

$$K_1 = \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} \\ \text{"Extracción de agua utilizando como fuente energética la eólica"} \\ \text{"Necesidad"} \\ \text{"Es la función principal"} \\ \text{"Cualitativo"} \\ \text{"U"} \end{bmatrix}^T \quad K_2 = \begin{bmatrix} \text{"Geometría"} \\ \text{"Altura máxima de la torre (m)"} \\ \text{"Necesidad"} \\ \text{"Acorde a las velocidades predominantes del aire"} \\ \text{"Cuantitativo"} \\ \text{"U"} \end{bmatrix}^T \quad K_3 = \begin{bmatrix} \text{"Geometría"} \\ \text{"Diámetro del aspa (m)"} \\ \text{"Necesidad"} \\ \text{"Diámetro del aspa usualmente varía entre 1.5 y 2 metros"} \\ \text{"Cuantitativo"} \\ \text{"U"} \end{bmatrix}^T \quad (5.2)$$

La matriz de ampliada de requerimientos funcionales (ϕ_A), expuesta en la expresión (5.3), contiene los vectores (K_n) del molino de viento.

$$\phi_A = \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} & \text{"Extracción de agua utilizando como fuente energética la eólica"} & \text{"Necesidad"} & \text{"Es la función principal"} & \text{"Cualitativo"} & \text{"U"} \\ \text{"Geometría"} & \text{"Altura máxima de la torre (m)"} & \text{"Necesidad"} & \text{"Acorde a las velocidades predominantes del aire"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"U"} \\ \text{"Geometría"} & \text{"Diámetro del aspa (m)"} & \text{"Necesidad"} & \text{"El diámetro del aspa usualmente varía entre 1.5 y 2 metros"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"U"} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{"Costos"} & \text{"Valor del montaje es independiente"} & \text{"Necesidad"} & \text{"El costo de montaje debe ser independiente al de ensamblado"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"A"} \\ \text{"Mantenimiento"} & \text{"Garantía de de por vida de piezas repuesto a bajo costo"} & \text{"Necesidad"} & \text{"Garantía de recambios y compra de piezas de repuesto a un bajo costo"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"A"} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

El vector ($C\phi_A$), definido en la expresión (5.4), contiene el conjunto de cualidades del molino de viento.

$$C\phi_A = [U \ U \ U \ A \ U \ U \ U \ A \ A \ U \ U \ A \ A \ I \ U]^T \quad (5.4)$$

Modelación funcional del molino de viento

La Figura 10.3, muestra la estructura funcional del molino de viento.

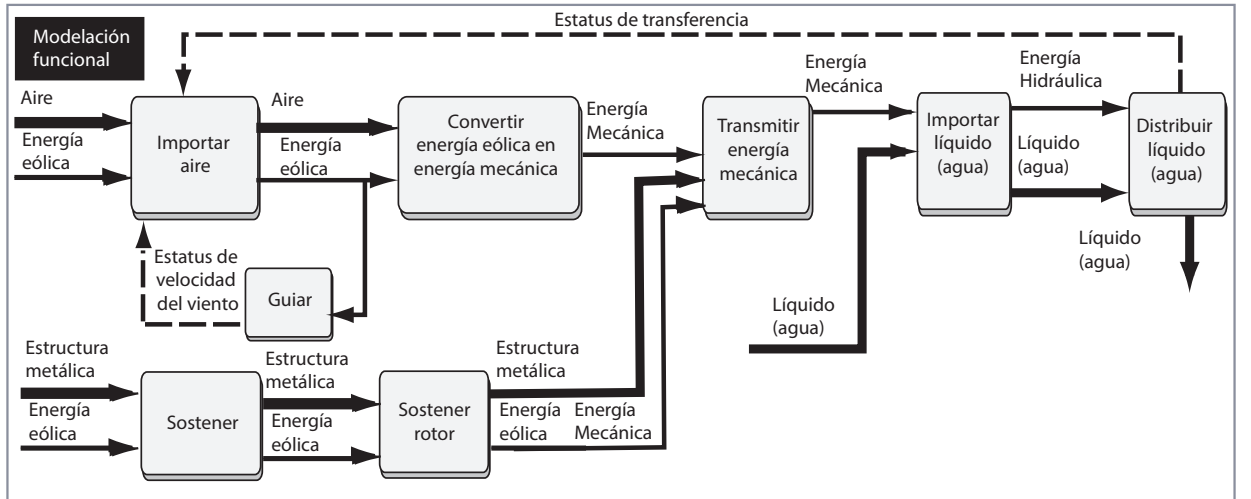


Figura 5.3. Determinación de la estructura funcional del molino de viento.

Matriz de funciones cualitativas del molino de viento (Mfc)

La trazabilidad de la representación funcional final del molino de viento se evidencia en una matriz de funciones cualitativas (M_{fc}) expresada en (5.5). La matriz ampliada de requerimientos funcionales del molino de viento

(ϕ_{An}) , se refleja en la expresión (5.6), que fuera obtenida a partir de los vectores (K_n) asociados a cada función. El vector de las funciones con cualidades para la trazabilidad (ξ_n) se expresa en (5.7).

$$M_{fc} = \begin{bmatrix} \text{"Sostener"} & \phi_{A1} & \begin{matrix} \text{"Estructura metálica"} \\ \text{"Energía eólica"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Estructura metálica"} \\ \text{"Energía eólica"} \end{matrix} \\ \text{"Sostener Rotor"} & \phi_{A2} & \begin{matrix} \text{"Estructura metálica"} \\ \text{"Energía eólica"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Estructura metálica"} \\ \text{"Energía mecánica"} \\ \text{"Energía eólica"} \end{matrix} \\ \text{"Importar aire"} & \phi_{A3} & \begin{matrix} \text{"Aire"} \\ \text{"Energía eólica"} \\ \text{"Estatus de transferencia"} \\ \text{"Estatus de"} \\ \text{velocidad del viento"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Aire"} \\ \text{"Energía eólica"} \end{matrix} \\ \text{"Transmitir"} & \phi_{A4} & \begin{matrix} \text{"Energía mecánica"} \\ \text{"Estructura metálica"} \\ \text{"Energía eólica"} \end{matrix} & \text{"Energía mecánica"} \\ \text{"Convertir energía eólica"} & \phi_{A5} & \begin{matrix} \text{"Aire"} \\ \text{"Energía eólica"} \end{matrix} & \text{"Energía mecánica"} \\ \text{"Guiar"} & \phi_{A6} & \text{"Energía eólica"} & \begin{matrix} \text{"Estatus de"} \\ \text{velocidad del viento"} \end{matrix} \\ \text{"Importar líquido (agua)"} & \phi_{A7} & \begin{matrix} \text{"Energía mecánica"} \\ \text{"Líquido (agua)"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Energía hidráulica"} \\ \text{"Líquido (agua)"} \end{matrix} \\ \text{"Distribuir líquido (agua)"} & \phi_{A8} & \begin{matrix} \text{"Energía mecánica"} \\ \text{"Líquido (agua)"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Líquido (agua)"} \\ \text{"Estatus de transferencia"} \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \phi_{A1} &= \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_9 & K_{10} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \end{bmatrix}^T \\ \phi_{A2} &= \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_6 & K_{10} \end{bmatrix}^T \\ \phi_{A3} &= \begin{bmatrix} K_2 & K_3 \end{bmatrix}^T \\ \phi_{A4} &= \begin{bmatrix} K_6 & K_{11} & K_{15} \end{bmatrix}^T \\ \phi_{A5} &= \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_6 & K_{13} \end{bmatrix}^T \\ \phi_{A6} &= \begin{bmatrix} K_6 & K_7 \end{bmatrix}^T \\ \phi_{A7} &= \begin{bmatrix} K_1 & K_4 & K_5 & K_7 & K_8 & K_{12} \end{bmatrix}^T \\ \phi_{A8} &= \begin{bmatrix} K_4 & K_8 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}
\xi_1 &= \left[\text{"Sostener"} \quad \phi_{A1} \quad \text{"Estructura metálica, Energía eólica"} \quad \text{"Estructura metálica, Energía eólica"} \right] \\
\xi_2 &= \left[\text{"Sostener rotor"} \quad \phi_{A2} \quad \text{"Estructura metálica, Energía eólica"} \quad \text{"Estructura metálica, Energía mecánica, Energía eólica,"} \right] \\
\xi_3 &= \left[\text{"Importar aire"} \quad \phi_{A3} \quad \text{"Aire, Energía eólica, Estatus de transferencia, Estatus de velocidad del viento"} \quad \text{"Aire, Energía eólica"} \right] \\
\xi_4 &= \left[\text{"Transmitir energía mecánica"} \quad \phi_{A4} \quad \text{"Energía mecánica, Estructura metálica, Energía eólica"} \quad \text{"Energía mecánica"} \right] \\
\xi_5 &= \left[\text{"Convertir energía eólica en energía mecánica"} \quad \phi_{A5} \quad \text{"Aire, Energía eólica"} \quad \text{"Energía mecánica"} \right] \\
\xi_6 &= \left[\text{"Guiar"} \quad \phi_{A6} \quad \text{"Energía eólica"} \quad \text{"Estatus de velocidad del viento"} \right] \\
\xi_7 &= \left[\text{"Importar líquido (agua)"} \quad \phi_{A7} \quad \text{"Energía mecánica, Líquido (agua)"} \quad \text{"Energía hidráulica, Líquido (agua)"} \right] \\
\xi_8 &= \left[\text{"Distribuir líquido (agua)"} \quad \phi_{A8} \quad \text{"Energía hidráulica, Líquido (agua)"} \quad \text{"Líquido (agua), Estatus de transferencia"} \right]
\end{aligned} \tag{5.7}$$

En el molino de viento varias funciones están asociadas a un mismo principio de solución; por tanto, la matriz (M_{fc}) es transformada en una matriz sintetizada de funciones cualitativas (M_{sfc}), expresada en (5.8).

$$M_{sfc} = \begin{bmatrix}
\text{"Sostener"} & \phi_{S1} & \text{"Estructura metálica"} & \text{"Estructura metálica"} \\
& & \text{"Energía eólica"} & \text{"Energía eólica"} \\
\text{"Sostener rotor"} & \phi_{S2} & \text{"Estructura metálica"} & \text{"Estructura metálica"} \\
& & \text{"Energía eólica"} & \text{"Energía mecánica"} \\
& & & \text{"Energía eólica"} \\
\text{"Importar aire"} & \phi_{S3} & \text{"Aire"} & \text{"Aire"} \\
& & \text{"Energía eólica"} & \text{"Energía eólica"} \\
& & \text{"Estatus de transferencia"} & \\
& & \text{"Estatus de velocidad del viento"} & \\
\text{"Convertir"} & \phi_{S4} = \phi_{A4} + \phi_{A5} & \text{"Aire"} & \\
& & \text{"Energía mecánica"} & \text{"Energía mecánica"} \\
& & \text{"Estructura metálica"} & \\
& & \text{"Energía eólica"} & \\
\text{"Guiar"} & \phi_{S5} & \text{"Energía eólica"} & \text{"Estatus de velocidad del viento"} \\
\text{"Distribuir"} & \phi_{S6} = \phi_{A7} + \phi_{A8} & \text{"Energía mecánica"} & \text{"Energía hidráulica"} \\
& & \text{"Líquido (agua)"} & \text{"Líquido (agua)"} \\
& & \text{"Energía hidráulica"} & \text{"Estatus de transferencia"}
\end{bmatrix} \tag{5.8}$$

La segunda columna de la matriz (M_{sfc}) incluye a la matriz sintetizada de requerimientos funcionales (ϕ_{Sn}), expresada en (5.9).

$$\begin{aligned}
\phi_{S1} &= [K_2 \quad K_3 \quad K_9 \quad K_{10} \quad K_{13} \quad K_{14} \quad K_{15}]^T \\
\phi_{S2} &= [K_2 \quad K_3 \quad K_6 \quad K_{10}]^T \\
\phi_{S3} &= [K_2 \quad K_3]^T \\
\phi_{S4} &= [K_2 \quad K_3 \quad K_6 \quad K_{11} \quad K_{15}]^T \\
\phi_{S5} &= [K_6 \quad K_7]^T \\
\phi_{S6} &= [K_1 \quad K_4 \quad K_5 \quad K_7 \quad K_8 \quad K_{12}]^T
\end{aligned} \tag{5.9}$$

La matriz (M_{sfc}) del molino de viento contiene los vectores de las funciones con cualidades para la trazabilidad sintetizada (ξS_n), expresados en (5.10).

$$\begin{aligned}
\xi S_1 &= \left[\text{"Sostener"} \quad \phi_{S1} \quad \text{"Estructura metálica, Energía eólica"} \quad \text{"Estructura metálica, Energía eólica"} \right] \\
\xi S_2 &= \left[\text{"Sostener Rotor"} \quad \phi_{S2} \quad \text{"Estructura metálica, Energía eólica"} \quad \text{"Estructura metálica, Energía mecánica, Energía eólica,"} \right] \\
\xi S_3 &= \left[\text{"Importar aire"} \quad \phi_{S3} \quad \text{"Aire, Energía eólica, Estatus de transferencia, Estatus de velocidad del viento"} \quad \text{"Aire, Energía eólica"} \right] \\
\xi S_4 &= \left[\text{"Convertir"} \quad \phi_{S4} = \phi_{A4} + \phi_{A5} \quad \text{"Aire, Energía mecánica, Estructura metálica, Energía eólica"} \quad \text{"Energía mecánica"} \right] \\
\xi S_5 &= \left[\text{"Guiar"} \quad \phi_{S5} \quad \text{"Energía eólica"} \quad \text{"Estatus de velocidad del viento"} \right] \\
\xi S_6 &= \left[\text{"Distribuir"} \quad \phi_{S6} = \phi_{A7} + \phi_{A8} \quad \text{"Energía mecánica, Líquido (agua)"} \quad \text{"Energía hidráulica, Líquido (agua), Estatus de transferencia"} \right]
\end{aligned} \tag{5.10}$$

Al integrarse las funciones del molino de viento en la matriz (M_{sfc}), quedan asociados los principios de solución a las funciones contenidas en la estructura funcional simplificada que se muestra en la Figura 10.4.

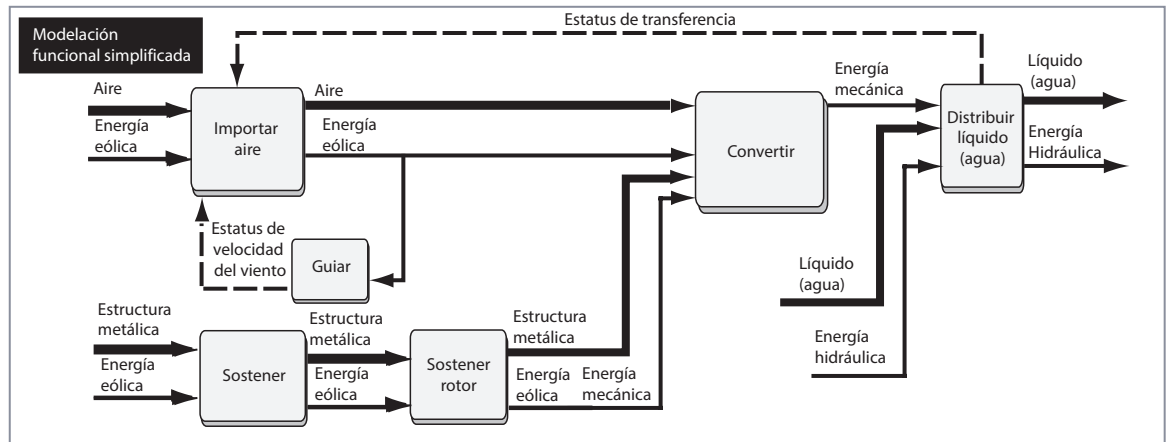


Figura 5.4. Estructura funcional simplificada del molino de viento.

Tamaño teórico del campo de soluciones

Tabla 5.4. Resumen de la base de conceptos para las funciones básicas de un molino de viento.




















No.	Nombre de la función	Número de conceptos	Nombre del concepto	Número de soluciones
1	Importar	1	Aspa	4
2	Sostener	2	Torre	4
3			Soporte superior	2
4	Convertir	1	Convertor	4
5	Guiar	1	Veleta	4
6	Distribuir	1	Sistema hidráulico	1

La determinación del tamaño del campo teórico de soluciones (*TCS*) se muestra en la expresión (5.11).

$$TCS = \prod_{p=1}^q PS_p = 4 * 4 * 2 * 4 * 4 * 1 = 512$$

(5.11)

Tabla 5.5. Matriz morfológica y soluciones factibles para el molino de viento.

		Soluciones			
		1	2	3	4
Sub-funciones	Sostener	Tubular de cemento y piedra 	Tubular abatible (Delta Yunion) 	Base cuadrada piramidal 	Tubular con tensores 
	Sostener rotor	Base cuadrada con tubo guía (Delta D-16) 	En forma de triángulo 		
	Importar	Forma trapecial común 	Forma Delta 	Variante triangular en tela 	De dos aspas forma combinada 
	Convertir	De bielas y contrapeso 	De engranajes 	De bielas y contrapeso 	De engranaje con contrapeso rotatorio 
	Guiar	Forma doble trapecial 	Triangular 	Trapezoidal 	Cola de Flecha 
	Distribuir	Con prensaestopas 			
		Combinación de los principios de solución			

Leyenda:

●

Variantes de solución.

●

 Variante de solución adoptada para la construcción.

La matriz morfológica extendida (M_{ME}) del molino de viento se muestra en la expresión (5.12)

$$M_{ME} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \text{"}\xi_1\text{"} \\ \text{"}\xi_2\text{"} \\ \text{"}\xi_3\text{"} \\ \text{"}\xi_4\text{"} \\ \text{"}\xi_5\text{"} \\ \text{"}\xi_6\text{"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Tubular de cemento y piedra"} \\ \text{"Base cuadrada con tubo guía (Delta D-16)"} \\ \text{"Forma trapecial común"} \\ \text{"De bielas y contrapeso"} \\ \text{"Forma doble trapecial"} \\ \text{"Con prensaestopas"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Tubular abatible (Delta yunior)"} \\ \text{"En forma de triángulo"} \\ \text{"Forma Delta"} \\ \text{"De engranajes"} \\ \text{"Triangular"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Base cuadrada Piramidal"} \\ \text{"Variante triangular en tela"} \\ \text{"De bielas y contrapeso"} \\ \text{"Trapecial"} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{"Tubular con tensores"} \\ \text{"De dos aspas forma combinada"} \\ \text{"De engranaje con contrapeso rotatorio"} \\ \text{"Cola de flecha"} \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Generación de las soluciones globales para el molino de viento

$$\begin{aligned} \text{Variante de Concepto 1} &= \text{Base cuadrada piramidal} + \text{Base cuadrada con tubo guía (Delta D-16)} + \\ &\quad \text{Forma trapecial común} + \text{De engranajes} + \text{Forma doble trapecial} + \\ &\quad \text{Con prensaestopas} \\ \text{Variante de Concepto 2} &= \text{Base cuadrada piramidal} + \text{Base cuadrada con tubo guía (Delta D-16)} + \\ &\quad \text{Forma Delta} + \text{De bielas y contrapeso} + \text{Triangular} + \text{Con prensaestopas} \\ \text{Variante de Concepto 3} &= \text{Base cuadrada piramidal} + \text{Base cuadrada con tubo guía (Delta D-16)} + \\ &\quad \text{Forma Delta} + \text{De engranajes} + \text{Trapecial} + \text{Con prensaestopas} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Los conceptos desarrollados son representados matemáticamente en las matrices de principios de solución (PS_n), formuladas en (5.14).

$$PS_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad PS_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad PS_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Evaluación conceptual por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales

Las expresiones descritas en (5.15) contienen los diferentes valores formalizados de los vectores (ξS_n).

Tabla 5.6. Criterios de evaluación para la comparación de los conceptos.

Criterio de evaluación	Peso relativo
a) Grado de complejidad en el ensamble de las diferentes partes que componen el producto	0,13
b) Fácil desarme del aspa en caso de huracanes o vientos de gran intensidad	0,14
c) Garantía de piezas de repuesto, para mantener la operatividad del molino	0,20
d) Costo de montaje del molino de viento	0,20
e) Peso del rotor	0,15
f) Número de piezas protegidas de la corrosión	0,18

$$\phi_{S1} = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_9 & K_{10} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \end{bmatrix}^T$$

$$C_{\phi_{S1}} = \begin{bmatrix} U & U & A & U & A & I & U \end{bmatrix}^T$$

$$\xi_{S1} = 0,40 + 0,40 + 0,20 + 0,40 + 0,20 + 0,10 + 0,40$$

$$\xi_{S1} = \mathbf{2,10}$$

$$\phi_{S2} = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_6 & K_{10} \end{bmatrix}^T$$

$$C_{\phi_{S2}} = \begin{bmatrix} U & U & U & U \end{bmatrix}^T$$

$$\xi_{S2} = 0,40 + 0,40 + 0,40 + 0,40$$

$$\xi_{S2} = \mathbf{1,60}$$

$$\phi_{S3} = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 \end{bmatrix}^T$$

$$C_{\phi_{S3}} = \begin{bmatrix} U & U \end{bmatrix}^T$$

$$\xi_{S3} = 0,40 + 0,40$$

$$\xi_{S3} = \mathbf{0,80}$$

$$\phi_{S4} = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_6 & K_{11} & K_{13} & K_{15} \end{bmatrix}^T$$

$$C_{\phi_{S4}} = \begin{bmatrix} U & U & U & U & A & U \end{bmatrix}^T$$

$$\xi_{S4} = 0,20 + 0,20 + 0,20 + 0,20$$

$$\xi_{S4} = \mathbf{2,20}$$

$$\phi_{S5} = \begin{bmatrix} K_6 & K_7 \end{bmatrix}^T$$

$$C_{\phi_{S5}} = \begin{bmatrix} U & U \end{bmatrix}^T$$

$$\xi_{S5} = 0,40 + 0,40$$

(5.15)

$$\xi_{S5} = \mathbf{0,80}$$

$$\phi_{S6} = \begin{bmatrix} K_1 & K_4 & K_5 & K_7 & K_8 & K_{12} \end{bmatrix}^T$$

$$C_{\phi_{S6}} = \begin{bmatrix} U & A & U & A & A \end{bmatrix}^T$$

$$\xi_{S6} = 0,40 + 0,20 + 0,40 + 0,40 + 0,20 + 0,20$$

$$\xi_{S6} = \mathbf{1,80}$$

Tabla 5.7. Distribución de los valores de los vectores (ξ_{S_n}) y principios de solución seleccionados para las variantes 1, 2 y 3 del molino de cuchillas.

Variante 1	1	2	3	4	Variante 2	1	2	3	4
$\xi_{S1} = \mathbf{2,10}$	0,30	0,50	0,70	0,60	$\xi_{S1} = \mathbf{2,10}$	0,30	0,50	0,70	0,60
$\xi_{S2} = \mathbf{1,60}$	0,90	0,70			$\xi_{S2} = \mathbf{1,70}$	0,90	0,70		
$\xi_{S3} = \mathbf{0,80}$	0,30	0,20	0,20	0,10	$\xi_{S3} = \mathbf{0,80}$	0,30	0,20	0,20	0,10
$\xi_{S4} = \mathbf{2,20}$	0,30	0,80	0,60	0,50	$\xi_{S4} = \mathbf{2,20}$	0,30	0,80	0,60	0,50
$\xi_{S5} = \mathbf{0,80}$	0,20	0,20	0,30	0,10	$\xi_{S5} = \mathbf{0,80}$	0,20	0,20	0,30	0,10
$\xi_{S6} = \mathbf{1,80}$	1,80				$\xi_{S6} = \mathbf{1,80}$	1,80			

Variante 3	1	2	3	4
$\xi_{S1} = \mathbf{2,10}$	0,30	0,50	0,70	0,60
$\xi_{S2} = \mathbf{1,60}$	0,90	0,70		
$\xi_{S3} = \mathbf{0,80}$	0,30	0,20	0,20	0,10
$\xi_{S4} = \mathbf{2,20}$	0,30	0,80	0,60	0,50
$\xi_{S5} = \mathbf{0,80}$	0,20	0,20	0,30	0,10
$\xi_{S6} = \mathbf{1,80}$	1,80			

Tabla 5.8. Evaluación y comparación de las variantes de conceptos del molino de viento.

No.	Criterios de evaluación	Peso	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
			Mag.	Valor	Mag.	Valor	Mag.	Valor
1	Grado de complejidad en el ensamble de las diferentes partes que componen el producto	0,13	0,70	0,09	0,70	0,09	0,70	0,09
2	Fácil desarme del aspa en caso de huracanes o vientos de gran intensidad	0,14	0,90	0,13	0,90	0,13	0,90	0,13
3	Garantía de piezas de repuesto, para mantener la operatividad del molino	0,20	0,30	0,06	0,20	0,04	0,20	0,04
4	Costo de montaje del molino de viento	0,20	0,80	0,16	0,30	0,06	0,80	0,16
5	Peso del rotor	0,15	0,20	0,03	0,20	0,03	0,30	0,05
6	Número de piezas protegidas de la corrosión	0,18	1,80	0,32	1,80	0,32	1,80	0,32
		1,00		1,06		0,67		0,77

En el caso evaluado, la tabla 5.8 muestra que la variante 1 de molino de viento es la que posee el mayor peso de ponderación, lo que permite asegurar que es la que satisface en mayor medida los requerimientos del usuario.

ANEXO 6. CASO DE ESTUDIO “FOGÓN EFICIENTE PARA BIOMASA”

En este anexo se presentan de forma resumida los resultados correspondientes al caso de estudio “Diseño de un fogón eficiente para biomasa”.

Captura y representación de los requerimientos funcionales

Tabla 6.1. Listado de requerimientos funcionales para el diseño de un fogón eficiente para biomasa.

No.	Concepto	Requerimiento	N\D	Descripción	Naturaleza
1	Funciones	Extracción segura de las cenizas, como máximo una vez al día.	Necesidad	Poder extraer, de forma segura, las cenizas una vez al día.	Cuantitativo
2	Geometría	Superficie y volumen de la olla.	Deseo	Diseñar el fogón, teniendo en cuenta la superficie y volumen de la olla.	Cuantitativo
3	Geometría	Correlación entre el volumen del hogar, el área de la parrilla, y la distancia al fondo del caldero u olla.	Deseo	En el diseño se debe tener en cuenta, la correlación entre el volumen del hogar, el área de la parrilla, y la distancia al fondo del caldero u olla.	Cuantitativo
4	Geometría	Dimensionamiento correlacionado y optimizado de la cámara de combustión de hierro fundido.	Deseo	Definir en el diseño un dimensionamiento correlacionado y optimizado de la cámara de combustión de hierro fundido.	Cuantitativo
5	Geometría	Tamaño de cada pieza del combustible sólido según la superficie de la parrilla.	Deseo	El tamaño de cada pieza del combustible sólido debe ser según la superficie de la parrilla.	Cuantitativo
6	Geometría	Puerta de carga y recarga impide que se adicionen piezas del combustible sólido mayores a las tolerables.	Deseo	Que la puerta de carga y recarga limiten el tamaño de las piezas de combustible sólido.	Cuantitativo
7	Energía	Regulación amplia de la velocidad de la combustión.	Deseo	Poder regular la velocidad de la combustión.	Cuantitativo
8	Energía	Chimenea regulable e individual para cada punto de cocción.	Deseo	Que la chimenea sea regulable e individual para cada punto de cocción.	Cuantitativo
9	Energía	Tiro de los gases, y extracción de humos y gases producto de la combustión.	Necesidad	Garantizar la extracción de los gases, y extracción de humos y gases producto de la combustión.	Cualitativo
10	Energía	Impedir la entrada de aire durante la cocción.	Deseo	Que no entre aire en la cámara durante la cocción.	Cualitativo
11	Energía	Única posible entrada de aire a la cámara de combustión, por debajo de la parrilla.	Deseo	Que solo entre aire a la cámara de combustión por debajo de la parrilla.	Cualitativo
12	Energía	Tiempo de cocción para diferentes alimentos.	Deseo	Determinar el tiempo de cocción para diferentes alimentos.	Cuantitativo
13	Energía	Facilitar el encendido y el alcance rápido de la temperatura de combustión inicial.	Deseo	Que la cocina tenga un encendido fácil y alcance rápido la temperatura de combustión inicial.	Cuantitativo
14	Energía	No aumentar la temperatura interior del recinto.	Necesidad	Que al funcionar la cocina no aumente la temperatura interior del recinto.	Cualitativo
15	Materiales	Quema sobre parrilla de hierro fundido.	Deseo	Que la cocina tenga una parrilla de hierro fundido para la quema.	Cualitativo
16	Materiales	Aislamiento de la cámara de combustión.	Deseo	Que la cámara de combustión tenga aislamiento.	Cualitativo
17	Materiales	Aislamiento parcial de la superficie de las ollas para evitar pérdidas.	Deseo	Que la cocina disponga de un aislamiento parcial de la superficie de las ollas para evitar pérdidas.	Cualitativo
18	Materiales	Aislamiento de la chimenea y el techo de la casa.	Deseo	Que la chimenea esté aislada del techo de la casa.	Cualitativo
19	Materiales	Chimenea impermeabilizada de la lluvia.	Deseo	Que la chimenea esté impermeabilizada de la lluvia.	Cualitativo

La matriz de requerimientos funcionales (ϕ) del fogón eficiente para biomasa se expone en la expresión (6.1).

$$\phi = \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} & \text{"Extracción segura de las cenizas, como máximo una vez al día."} & \text{"Necesidad"} & \text{"Poder extraer de forma segura las cenizas una vez al día."} & \text{"Cuantitativo"} \\ \text{"Geometría"} & \text{"Superficie y volumen de la olla."} & \text{"Deseo"} & \text{"Diseñar el fogón teniendo en cuenta la superficie y volumen de la olla."} & \text{"Cuantitativo"} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{"Materiales"} & \text{"Chimenea impermeabilizada de la lluvia."} & \text{"Deseo"} & \text{"Que la chimenea esté impermeabilizada de la lluvia."} & \text{"Cuantitativo"} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales

Tabla 6.2. Resultados concentrados con valores obtenidos para el parámetro estadístico Q para la diferencia Abs (a-b) y para la clasificación de los requerimientos Kano en la encuesta a usuarios.

No.Requerimiento	A	O	U	I	Inv.D	T	Q	Abs.	SE	Imp.	Mejor	Peor	C1	C2	Clas.
1 Extracción segura de las cenizas, como máximo una vez al día.	5	0	24	3	0	0	32	6,57	<	19	Si	0,64	0,91	-0,75	0,58 0,48 A
2 Superficie y volumen de la olla.	12	0	3	7	10	0	32	6,27	>	2	No	0,61	0,68	-0,14	0,41 0,08 I
3 Correlación entre el volumen del hogar, el área de la parrilla, y la distancia al fondo del caldero u olla.	20	0	12	0	0	0	32	6,60	<	8	Si	0,59	1,00	-0,38	0,59 0,22 A
4 Dimensionamiento correlacionado y optimizado de la cámara de combustión de hierro fundido.	8	0	10	5	9	0	32	6,03	>	1	No	0,63	0,78	-0,43	0,49 0,27 I
5 Tamaño de cada pieza del combustible sólido según la superficie de la parrilla.	9	0	12	3	8	0	32	6,20	>	3	No	0,70	0,88	-0,50	0,62 0,35 A
6 Puerta de carga y recarga impide que se adicionen piezas del combustible sólido mayores a las tolerables.	9	0	16	2	5	0	32	6,44	<	7	Si	0,72	0,93	-0,59	0,67 0,43 A
7 Regulación amplia de la velocidad de la combustión.	9	0	20	2	1	0	32	6,57	<	11	Si	0,73	0,94	-0,65	0,68 0,47 A
8 Chimenea regulable e individual para cada punto de cocción.	12	0	10	8	2	0	32	6,27	>	2	No	0,67	0,73	-0,33	0,49 0,22 I
9 Tiro de los gases, y extracción de humos y gases producto de la combustión.	2	1	29	0	0	0	32	6,60	<	27	Si	0,91	0,97	-0,94	0,88 0,85 U
10 Impedir la entrada de aire durante la cocción.	6	1	22	2	1	0	32	6,55	<	16	Si	0,79	0,90	-0,74	0,71 0,58 U
11 Única posible entrada de aire a la cámara de combustión, por debajo de la parrilla.	5	0	25	1	1	0	32	6,59	<	29	Si	0,77	0,97	-0,81	0,75 0,62 U
12 Tiempo de cocción para diferentes alimentos.	20	0	11	1	0	0	32	6,60	<	9	Si	0,82	0,97	-0,34	0,80 0,28 A
13 Facilitar el encendido y el alcance rápido de la temperatura de combustión inicial.	24	0	7	1	0	0	32	6,60	<	17	Si	0,71	0,97	-0,22	0,69 0,16 A
14 No aumentar la temperatura interior del recinto.	8	0	21	1	2	0	32	6,57	<	13	Si	0,85	0,97	-0,70	0,82 0,60 A
15 Quema sobre parrilla de hierro fundido.	22	0	9	1	0	0	23	6,60	<	13	Si	0,72	0,97	-0,28	0,70 0,20 A
16 Aislamiento de la cámara de combustión.	19	0	11	2	0	0	32	6,59	<	8	Si	0,77	0,94	-0,34	0,72 0,26 A
17 Aislamiento parcial de la superficie de las ollas para evitar pérdidas.	22	0	8	2	0	0	32	6,59	<	14	Si	0,68	0,94	-0,25	0,63 0,17 A
18 Aislamiento de la chimenea y el techo de la casa.	3	0	29	0	0	0	32	6,60	<	26	Si	0,94	1,00	-0,91	0,94 0,85 U
19 Chimenea impermeabilizada de la lluvia.	2	0	30	0	0	0	32	6,60	<	28	Si	0,95	1,00	-0,94	0,95 0,89 U

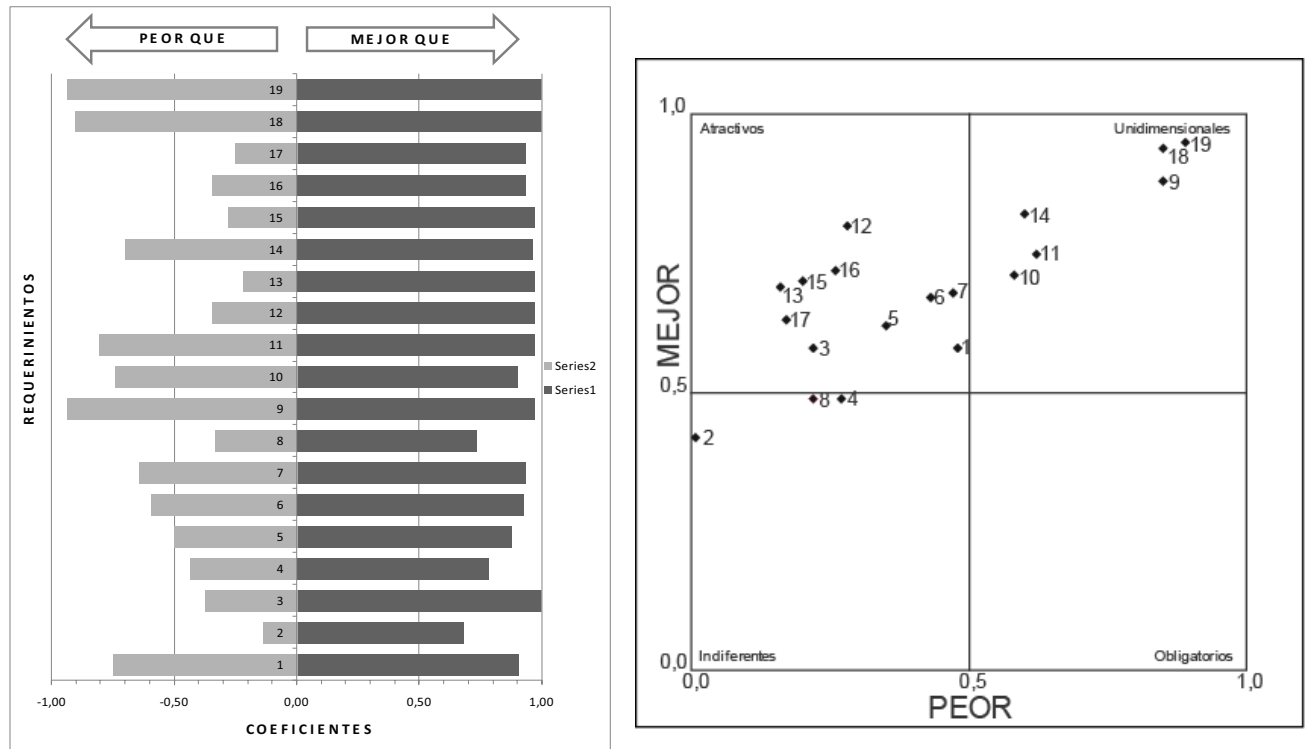


Figura 6.1. Valores obtenidos de la clasificación en “Mejor que” y “Peor que” y Gráfico de clasificación de los requerimientos en base a los valores de C1 y C2.

Tabla 6.3. Combinaciones necesarias de requerimientos funcionales para diferentes tipos de diseños en base a los resultados obtenidos.

Tipo de producto	Requerimientos en la clasificación de Kano
Producto básico	9 Tiro de los gases, y extracción de humos y gases producto de la combustión. 10 Impedir la entrada de aire durante la cocción. 11 Única posible entrada de aire a la cámara de combustión por debajo de la parrilla. 14 No aumentar la temperatura interior del recinto. 18 Aislamiento de la chimenea y el techo de la casa. 19 Chimenea impermeabilizada de la lluvia.
Producto esperado	9 Tiro de los gases, y extracción de humos y gases producto de la combustión. 10 Impedir la entrada de aire durante la cocción. 11 Única posible entrada de aire a la cámara de combustión por debajo de la parrilla. 14 No aumentar la temperatura interior del recinto. 18 Aislamiento de la chimenea y el techo de la casa. 19 Chimenea impermeabilizada de la lluvia. + 1 Extracción segura de las cenizas, como máximo una vez al día. 3 Correlación entre el volumen del hogar, el área de la parrilla, y la distancia al fondo del caldero u olla. 5 Tamaño de cada pieza del combustible sólido según la superficie de la parrilla. 6 Puerta de carga y recarga impide que se adicionen piezas del combustible sólido mayores a las tolerables. 7 Regulación amplia de la velocidad de la combustión. 12 Tiempo de cocción para diferentes alimentos. 13 Facilitar el encendido y el alcance rápido de la temperatura de combustión inicial. 15 Quema sobre parrilla de hierro fundido. 16 Aislamiento de la cámara de combustión 17 Aislamiento parcial de la superficie de las ollas para evitar pérdidas.



Figura 6.2. Clasificación de los requerimientos en base a un producto ampliado.

Los vectores , con la información descrita en la fila (i) de la matriz de requerimientos funcionales (ϕ) del un fogón eficiente para biomasa, se exponen en la expresión (6.2).

$$\begin{aligned}
 K_1 = & \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} \\ \text{"Extracción segura de las cenizas, como máximo una vez al día"} \\ \text{"Necesidad"} \\ \text{"Poder extraer de forma segura las cenizas una vez al día"} \\ \text{"Cuantitativo"} \\ \text{"A"} \end{bmatrix}^T \\
 K_2 = & \begin{bmatrix} \text{"Geometría"} \\ \text{"Superficie y volumen de la olla"} \\ \text{"Deseo"} \\ \text{"Diseñar el fogón teniendo en cuenta la superficie y volumen de la olla"} \\ \text{"Cuantitativo"} \\ \text{"I"} \end{bmatrix}^T \\
 K_3 = & \begin{bmatrix} \text{"Geometría"} \\ \text{"Correlación entre el volumen del hogar, el área de la parrilla, y la distancia al fondo del caldero u olla"} \\ \text{"Deseo"} \\ \text{"En el diseño tener en cuenta la correlación volumen del hogar, área de la parrilla, distancia al fondo del caldero u ollas"} \\ \text{"Cuantitativo"} \\ \text{"A"} \end{bmatrix}^T
 \end{aligned} \quad (6.2)$$

La matriz de ampliada de requerimientos funcionales (ϕ_A), expuesta en la expresión (6.3) contiene los vectores (K_n) del un fogón eficiente para biomasa.

$$\phi_A = \begin{bmatrix} \text{"Funciones"} & \text{"Extracción segura de las cenizas, como máximo una vez al día"} & \text{"Necesidad"} & \text{"Poder extraer, de forma segura, las cenizas una vez al día"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"A"} \\ \text{"Geometría"} & \text{"Superficie y volumen de la olla"} & \text{"Deseo"} & \text{"Diseñar el fogón teniendo en cuenta la superficie y volumen de la olla"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"I"} \\ \text{"Geometría"} & \text{"Correlación entre el volumen del hogar, el área de la parrilla, y la distancia al fondo del caldero u olla"} & \text{"Deseo"} & \text{"En el diseño tener en cuenta la correlación entre el volumen del hogar, el área de la parrilla, y la distancia al fondo del caldero u ollas"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"A"} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{"Materiales"} & \text{"Aislamiento de la chimenea y el techo de la casa"} & \text{"Deseo"} & \text{"Que la chimenea esté aislada del techo de la casa"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"A"} \\ \text{"Materiales"} & \text{"Chimenea impermeabilizada de la lluvia"} & \text{"Deseo"} & \text{"Que la chimenea esté impermeabilizada de la lluvia"} & \text{"Cuantitativo"} & \text{"A"} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

El vector $(C\phi_A)$, definido en la expresión (6.4), contiene el conjunto de cualidades del un fogón eficiente para biomasa.

$$C\phi_A = \begin{bmatrix} A & I & A & I & A & A & A & I & U & U & U & A & A & A & A & A & A & U & U \end{bmatrix}^T \quad (6.4)$$

Modelación funcional del fogón eficiente

La Figura 11.3, muestra la estructura funcional del fogón eficiente eficiente para biomasa.

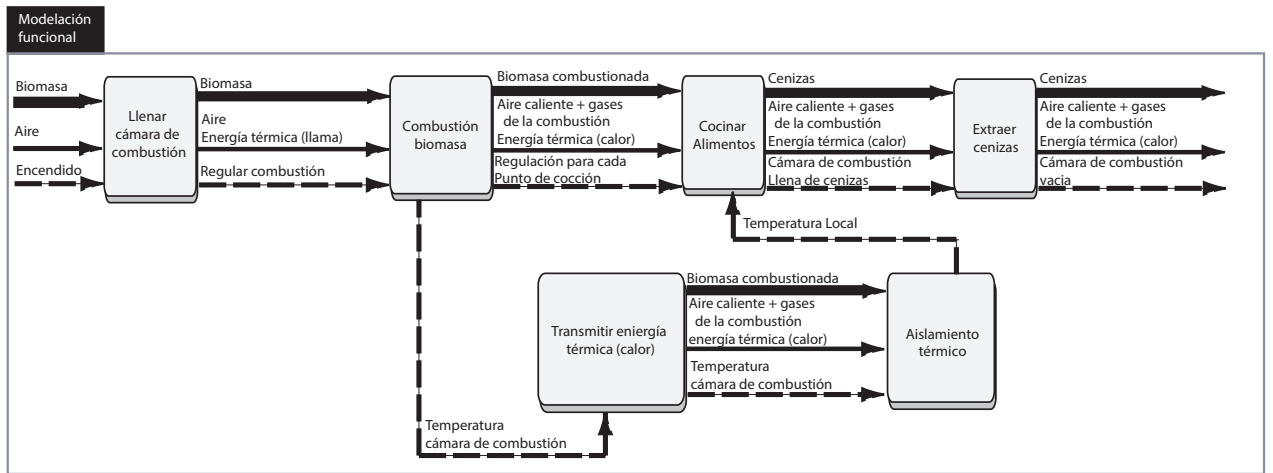


Figura 6.3. Determinación de la estructura funcional del fogón eficiente para biomasa.

Matriz de funciones cualitativas del fogón eficiente para biomasa (Mfc)

La trazabilidad de la representación funcional final del fogón eficiente se evidencia en una matriz de funciones cualitativas (M_{fc}) expresada en (6.5).

$$M_{fc} = \begin{bmatrix} \begin{array}{c} \text{"Llenar cámara de combustión"} \\ \\ \\ \\ \text{"Transmitir energía térmica (calor)"} \\ \\ \text{"Aislamiento térmico"} \end{array} & \begin{array}{c} \phi_{A1} \\ \\ \\ \\ \phi_{A5} \\ \\ \phi_{A6} \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{c} \text{"Biomasa"} \\ \text{"Aire"} \\ \text{"Encendido"} \end{array} \\ \\ \begin{array}{c} \text{"Biomasa"} \\ \text{"Aaire +"} \\ \text{Energía térmica (llama)} \\ \text{"Regular combustión"} \end{array} \\ \\ \begin{array}{c} \text{"Biomasa combustionada"} \\ \text{"Aire caliente + gases de la combustión"} \\ \text{"Energía térmica (calor)"} \\ \text{"Regulación para cada punto de cocción"} \\ \text{"Temperatura local"} \end{array} \\ \\ \begin{array}{c} \text{"Cenizas"} \\ \text{"Aire caliente + gases de la combustión"} \\ \text{"Energía térmica (calor)"} \\ \text{"Regulación para cada punto de cocción"} \\ \text{"Cámara de combustión llena de cenizas"} \end{array} \\ \\ \begin{array}{c} \text{"Cenizas"} \\ \text{"Aire caliente + gases de la combustión"} \\ \text{"Energía térmica (calor)"} \\ \text{"Regulación para cada punto de cocción"} \\ \text{"Cámara de combustión vacía"} \end{array} \\ \\ \begin{array}{c} \text{"Biomasa combustionada"} \\ \text{"Aire caliente + gases de la combustión"} \\ \text{"Energía térmica (calor)"} \\ \text{"Regulación para cada punto de cocción"} \\ \text{"Temperatura cámara de combustión"} \end{array} \\ \\ \begin{array}{c} \text{"Biomasa combustionada"} \\ \text{"Aire caliente + gases de la combustión"} \\ \text{"Energía térmica (calor)"} \\ \text{"Regulación para cada punto de cocción"} \\ \text{"Temperatura cámara de combustión"} \end{array} \end{array} \quad (6.5)$$

La matriz ampliada de requerimientos funcionales del un fogón eficiente para biomasa (ϕ_{An}), expresiones (6.6), obtenida a partir de los vectores (K_n) asociados a cada función.

$$\phi_{A1} = \begin{bmatrix} K_1 & K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_{13} \end{bmatrix}^T$$

$$\phi_{A2} = \begin{bmatrix} K_1 & K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_7 & K_8 & K_9 & K_{10} & K_{13} & K_{15} & K_{16} \end{bmatrix}^T$$

$$\phi_{A3} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 & K_7 & K_8 & K_9 & K_{10} & K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{17} \end{bmatrix}^T \quad (6.6)$$

$$\phi_{A4} = \begin{bmatrix} K_1 & K_3 & K_5 & K_6 \end{bmatrix}^T$$

$$\phi_{A5} = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_7 & K_8 & K_9 & K_{10} & K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \end{bmatrix}^T$$

$$\phi_{A6} = \begin{bmatrix} K_{14} & K_{16} & K_{17} & K_{18} & K_{19} \end{bmatrix}^T$$

El vector de las funciones con cualidades para la trazabilidad (ξ_n) se expresa en (6.7).

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \begin{bmatrix} \text{"Llenar cámara de combustión"} \quad \phi_{A1} \quad \text{"Biomasa"}; \text{"Aire, Encendido"} \quad \text{"Biomasa"} \\ \text{"Aire; Energía térmica (llama); Regular combustión"} \end{bmatrix} \\ \xi_2 &= \begin{bmatrix} \text{"combustión biomasa"} \quad \phi_{A2} \quad \text{"Aire, Energía térmica (llama), Regular combustión"} \\ \text{"Biomasa combustionada, Aire caliente + gases de la combustión, Energía térmica (calor), Regulación para cada punto de cocción, Temperatura cámara de combustión"} \end{bmatrix} \\ \xi_3 &= \begin{bmatrix} \text{"Cocinar alimentos"} \quad \phi_{A3} \quad \text{"Biomasa combustionada, Aire caliente + gases de la combustión, Energía térmica (calor), Regulación para cada punto de cocción, Temperatura local"} \\ \text{"Cenizas, Aire caliente + gases de la combustión, Energía térmica (calor), Regulación para cada punto de cocción, cámara de combustión llena de cenizas"} \end{bmatrix} \\ \xi_4 &= \begin{bmatrix} \text{"Extraer cenizas"} \quad \phi_{A4} = \phi_{A4} + \phi_{A5} \quad \text{"Cenizas, Aire caliente + gases de la combustión, Energía térmica (calor), Regulación para cada punto de cocción, cámara de combustión llena de cenizas"} \\ \text{"Cenizas, Aire caliente + gases de la combustión, Energía térmica (calor), Regulación para cada punto de cocción, cámara de combustión vacía"} \end{bmatrix} \quad (6.7) \\ \xi_5 &= \begin{bmatrix} \text{"Transmitir Energía térmica (calor)"} \quad \phi_{A5} \quad \text{"Biomasa combustionada, Aire caliente + gases de la combustión, Energía térmica (calor), Regulación para cada punto de cocción, Temperatura cámara de combustión"} \end{bmatrix} \\ \xi_6 &= \begin{bmatrix} \text{"Aislamiento térmico"} \quad \phi_{A6} = \phi_{A7} + \phi_{A8} \quad \text{"Biomasa combustionada, Aire caliente + gases de la combustión, Energía térmica (calor), Regulación para cada punto de cocción, Temperatura cámara de combustión"} \\ \text{"Temperatura local"} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Tamaño teórico del campo de soluciones

Tabla 6.4. Resumen de la base de conceptos para las funciones básicas de un fogón eficiente para biomasa.







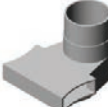
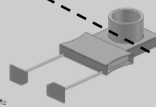
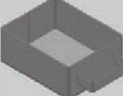
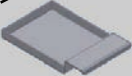
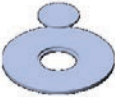



No.	Nombre de la función	Número de conceptos	Nombre del concepto	Número de soluciones
1	Llenar cámara de combustión	1	Parrilla	3
2	Combustión biomasa	1	Cámara de Combustión	3
3	Cocinar alimentos	2	Reguladores	2
4	Extraer cenizas	1	Cenicero	2
5	Transmitir energía calorífica	1	Hornilla	2
6	Aislamiento térmico	1	Aislante	2

La determinación del tamaño del campo teórico de soluciones (TCS) se muestra en la expresión (6.8).

$$TCS = \prod_{p=1}^q PS_p = 3 * 3 * 2 * 2 * 2 * 2 = 144$$

(6.8)

Tabla 6.5. Matriz morfológica y soluciones factibles para el fogón eficiente para biomasa.

Sub-funciones		Soluciones		
		1	2	3
	Llenar cámara de combustión	 Parrilla de hierro fundido	 Parrilla cerámica	 Parrilla acero
	Combustión biomasa	 Cámara acero con regulación de gases	 Cámara cónica con regulación de gases	 Cámara recta
	Cocinar alimentos	 Colector de gases fundido	 Colector de gases con regulador	
	Extraer cenizas	 Cenicero alto	 Cenicero bajo	
	Transmitir energía calorífica	 Tapa hornilla en forma de aros	 Tapa hornilla entera	
	Aislamiento térmico	 Aislante aserrín y cocón	 Aislante ladrillos	
	Combinación de los principios de solución			

Leyenda: ● Variantes de solución. ● Variante de solución adoptada para la construcción.

La matriz morfológica extendida (M_{ME}) del fogón eficiente para biomasa se muestra en la expresión (6.9)

$$M_{ME} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \text{"}\xi_1\text{"} & \text{"Parrilla de hierro fundido"} & \text{"Parrilla cerámica"} & \text{"Parrilla acero"} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{"}\xi_2\text{"} & \text{"Cámara acero con regulación de gases"} & \text{"Cámara cónica con regulación de gases"} & \text{"Cámara recta "} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{"}\xi_3\text{"} & \text{"Colector de gases fundido"} & \text{"Colector de gases con regulador"} & \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{"}\xi_4\text{"} & \text{"Cenicero alto"} & \text{"Cenicero bajo"} & \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{"}\xi_5\text{"} & \text{"Tapa hornilla en forma de aros"} & \text{"Tapa hornilla entera"} & \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{"}\xi_6\text{"} & \text{"Aislante aserrín y cocóa"} & \text{"Aislante ladrillos"} & \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Generación de las soluciones globales para el fogón eficiente

$$\begin{aligned} \text{Variante de Concepto 1} &= \text{Parrilla de hierro fundido} + \text{Cámara cónica con regulación de gases} + \\ &\quad \text{Colector de gases con regulador} + \text{Cenicero bajo} \\ &\quad + \text{Tapa hornilla entera} + \text{Aislante aserrín y cocóa} \\ \text{Variante de Concepto 2} &= \text{Parrilla de hierro fundido} + \text{Cámara acero con regulación de gases} + \\ &\quad \text{Colector de gases con regulador} + \text{Cenicero alto} \\ &\quad + \text{Tapa hornilla entera} + \text{Aislante aserrín y cocóa} \\ \text{Variante de Concepto 3} &= \text{Parrilla de hierro fundido} + \text{Cámara acero con regulación de gases} + \\ &\quad \text{Colector de gases con regulador} + \text{Cenicero bajo} \\ &\quad + \text{Tapa hornilla entera} + \text{Aislante aserrín y cocóa} \\ \text{Variante de Concepto 4} &= \text{Parrilla de hierro fundido} + \text{Cámara cónica con regulación de gases} + \\ &\quad \text{Colector de gases con regulador} + \text{Cenicero alto} \\ &\quad + \text{Tapa hornilla entera} + \text{Aislante aserrín y cocóa} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Los conceptos desarrollados para el fogón eficiente son representados matemáticamente en las matrices de principios de solución (PS_n), formuladas en (6.11).

$$PS_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad PS_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad PS_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad PS_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Evaluación conceptual por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales del fogón eficiente

Tabla 6.6. Criterios de evaluación para la comparación de los conceptos.

Criterio de evaluación	Peso relativo
a) Tamaño de cada pieza del combustible sólido según la superficie de la parrilla.	0,15
b) Correlación volumen del hogar, área de la parrilla, distancia al fondo del caldero u olla.	0,20
c) Regulación amplia de la velocidad de la combustión.	0,15
d) Tiempo de cocción para diferentes alimentos.	0,25
e) No aumentar la temperatura interior del recinto.	0,15
f) Aislamiento de la cámara de combustión	0,10

Las expresiones descritas en (6.12) contienen los diferentes valores formalizados de los vectores (ξS_n) .

$$\phi_{A1} = [K_1 \ K_3 \ K_4 \ K_5 \ K_6 \ K_{13}]^T$$

$$C_{\phi_{A1}} = [A \ A \ I \ A \ A \ A]^T$$

$$\xi_1 = 0,20 + 0,20 + 0,10 + 0,20 + 0,20 + 0,20$$

$$\xi_1 = \mathbf{1,10}$$

$$\phi_{A2} = [K_1 \ K_3 \ K_4 \ K_5 \ K_6 \ K_7 \ K_8 \ K_9 \ K_{10} \ K_{13} \ K_{15} \ K_{16}]^T$$

$$C_{\phi_{A2}} = [A \ A \ I \ A \ A \ A \ U \ U \ U \ A \ A \ A]^T$$

$$\xi_2 = 0,20 + 0,20 + 0,10 + 0,20 + 0,20 + 0,20 + 0,40 + 0,40 + 0,40 + 0,20 + 0,20 + 0,20$$

$$\xi_2 = \mathbf{3,00}$$

$$\phi_{A3} = [K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_7 \ K_8 \ K_9 \ K_{10} \ K_{11} \ K_{12} \ K_{13} \ K_{17}]^T \quad (6.12)$$

$$C_{\phi_3} = [A \ I \ A \ A \ I \ U \ U \ U \ A \ A \ A]^T$$

$$\xi_3 = 0,20 + 0,10 + 0,20 + 0,20 + 0,10 + 0,40 + 0,40 + 0,40 + 0,20 + 0,20$$

$$\xi_3 = \mathbf{2,60}$$

$$\phi_{A4} = [K_1 \ K_3 \ K_5 \ K_6]^T$$

$$C_{\phi_4} = [A \ A \ A \ A]^T$$

$$\xi_4 = 0,20 + 0,20 + 0,20 + 0,20$$

$$\xi_4 = \mathbf{0,80}$$

$$\phi_{A5} = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_7 & K_8 & K_9 & K_{10} & K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \end{bmatrix}^T$$

$$C_{\phi_5} = \begin{bmatrix} I & A & I & A & I & U & U & U & A & A & A & A \end{bmatrix}^T$$

$$\xi_5 = 0,10 + 0,20 + 0,10 + 0,20 + 0,10 + 0,40 + 0,40 + 0,40 + 0,20 + 0,20 + 0,20 + 0,20$$

$$\xi_5 = \mathbf{2,70}$$

$$\phi_{A6} = \begin{bmatrix} K_{14} & K_{16} & K_{17} & K_{18} & K_{19} \end{bmatrix}^T$$

$$C_{\phi_6} = \begin{bmatrix} A & A & A & U & U \end{bmatrix}^T$$

$$\xi_6 = 0,20 + 0,20 + 0,20 + 0,40 + 0,40$$

$$\xi_{S6} = \mathbf{1,40}$$

Tabla 6.7. Distribución de los valores de los vectores (ξ_{S_n}) y principios de solución seleccionados para las Variantes 1, 2 y 3 del fogón eficiente para biomasa.

Variante 1	1	2	3	Variante 2	1	2	3
$\xi_{S1} = \mathbf{1,10}$	0,40	0,50	0,20	$\xi_{S1} = \mathbf{1,10}$	0,40	0,50	0,20
$\xi_{S2} = \mathbf{3,00}$	0,90	1,50	0,60	$\xi_{S2} = \mathbf{3,00}$	0,90	1,50	0,60
$\xi_{S3} = \mathbf{2,60}$	0,80	1,80		$\xi_{S3} = \mathbf{2,60}$	0,80	1,80	
$\xi_{S4} = \mathbf{0,80}$	0,30	0,50		$\xi_{S4} = \mathbf{0,80}$	0,30	0,50	
$\xi_{S5} = \mathbf{2,70}$	1,10	1,60		$\xi_{S5} = \mathbf{2,70}$	1,10	1,60	
$\xi_{S6} = \mathbf{1,40}$	0,80	0,60		$\xi_{S6} = \mathbf{1,40}$	0,80	0,60	

Variante 3	1	2	3	Variante 4	1	2	3
$\xi_{S1} = \mathbf{1,10}$	0,40	0,50	0,20	$\xi_{S1} = \mathbf{1,10}$	0,40	0,50	0,20
$\xi_{S2} = \mathbf{3,00}$	0,90	1,50	0,60	$\xi_{S2} = \mathbf{3,00}$	0,90	1,50	0,60
$\xi_{S3} = \mathbf{2,60}$	0,80	1,80		$\xi_{S3} = \mathbf{2,60}$	0,80	1,80	
$\xi_{S4} = \mathbf{0,80}$	0,30	0,50		$\xi_{S4} = \mathbf{0,80}$	0,30	0,50	
$\xi_{S5} = \mathbf{2,70}$	1,10	1,60		$\xi_{S5} = \mathbf{2,70}$	1,10	1,60	
$\xi_{S6} = \mathbf{1,40}$	0,80	0,60		$\xi_{S6} = \mathbf{1,40}$	0,80	0,60	

Tabla 6.8. Evaluación y comparación de las variantes de conceptos del fogón eficiente.

No.	Criterios de evaluación	Peso	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
			Mag.	Valor	Mag.	Valor	Mag.	Valor	Mag.	Valor
1	Tamaño de cada pieza del combustible sólido según la superficie de la parrilla	0,15	0,40	0,06	0,40	0,06	0,40	0,06	0,40	0,06
2	Correlación volumen del hogar, área de la parrilla, distancia al fondo del caldero u olla.	0,20	1,50	0,30	0,90	0,18	0,90	0,18	1,50	0,30
3	Regulación amplia de la velocidad de la combustión.	0,15	1,80	0,27	1,80	0,27	1,80	0,27	1,80	0,27
4	Tiempo de cocción para diferentes alimentos.	0,25	0,50	0,13	0,30	0,08	0,30	0,08	0,30	0,08
5	No aumentar la temperatura interior del recinto.	0,15	1,60	0,24	1,60	0,24	1,60	0,24	1,60	0,24
6	Aislamiento de la cámara de combustión	0,10	0,80	0,08	0,80	0,08	0,80	0,08	0,80	0,08
		1,00		1,08		0,91		0,91		1,03

En el caso evaluado, la tabla 6.8, muestra que la variante 1 de fogón eficiente es la que posee el mayor peso de ponderación, lo que permite asegurar que es de las cuatro, la que satisface en mayor medida los requerimientos del usuario.

ANEXO 7. MUESTRA DE LA ENCUESTA KANO PARA LOS USUARIOS DEL MOLINO DE CUCHILLAS

En este anexo se presenta una muestra del formulario de la encuesta Kano, realizada a los usuarios del molino de cuchillas.

ENCUESTA DE REQUERIMIENTOS FUNCIONALES PARA EL DISEÑO DE UN MOLINO DE CUCHILLAS

Consulta a usuarios

No. Encuesta _____

CUESTIONARIO

Por favor, para este requerimiento, se le solicita que seleccione la alternativa que mejor describa su actitud ante la pregunta y haga una evaluación del nivel de importancia de este requerimiento:

REQUERIMIENTOS FUNCIONALES DE FUNCIONES (RfFun)

REQUERIMIENTO 1: Molinado de granos

¿Cómo se siente si el molino permite el molinado de granos ?	1. Me agrada		Requerimiento 1	Nivel de importancia del requerimiento		
	2. Es de esperarse			Para nada importante	1	
	3. Neutral				2	
	4. Lo acepto				3	
	5. Me desagrada				4	
¿Cómo se siente si el molino NO permite el molinado de granos ?	1. Me agrada				5	
	2. Es de esperarse			6		
	3. Neutral			7		
	4. Lo acepto			8		
	5. Me desagrada		9			

REQUERIMIENTO 2: Molinado de los tallos de las plantas

¿Cómo se siente si el molino permite el molinado de los tallos de las plantas ?	1. Me agrada		Requerimiento 2	Nivel de importancia del requerimiento		
	2. Es de esperarse			Para nada importante	1	
	3. Neutral				2	
	4. Lo acepto				3	
	5. Me desagrada				4	
¿Cómo se siente si el molino NO permite el molinado de los tallos de las plantas ?	1. Me agrada				5	
	2. Es de esperarse			6		
	3. Neutral			7		
	4. Lo acepto			8		
	5. Me desagrada		9			

REQUERIMIENTOS FUNCIONALES DE GEOMETRÍA (RfGeo)

REQUERIMIENTO 3: Altura máxima del molino (mm)

¿Cómo se siente si está definida la altura máxima del molino (mm) ?	1. Me agrada		Requerimiento 3	Nivel de importancia del requerimiento		
	2. Es de esperarse			Para nada importante	1	
	3. Neutral				2	
	4. Lo acepto				3	
	5. Me desagrada				4	
¿Cómo se siente si NO está definida la altura máxima del molino (mm) ?	1. Me agrada				5	
	2. Es de esperarse			6		
	3. Neutral			7		
	4. Lo acepto			8		
	5. Me desagrada		9			

ANEXO 8. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES PARA DIFERENTES TIPOS DE DISEÑOS

Tabla 8.1. Combinaciones necesarias de requerimientos funcionales para diferentes tipos de diseños en base a los resultados Kano obtenidos.

Tipo de producto	Requerimientos en la clasificación de Kano
Producto básico	5 Volumen de la tolva (m3) 11 Rompedores de grano fijos
Producto esperado	5 Volumen de la tolva (m3) 11 Rompedores de grano fijos + 1 Molinado de granos 2 Molinado de los tallos de las plantas 3 Altura máxima del molino (mm) 4 Diámetro del cuerpo del molino (mm) 6 Potencia del motor (W) 7 Molino accionado por un motor eléctrico 8 Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste 13 Protección del molino contra la corrosión 15 Tolva desmontable 16 Garantía de piezas de repuesto
Producto ampliado	5 Volumen de la tolva (m3) 11 Rompedores de grano fijos + 1 Molinado de granos 2 Molinado de los tallos de las plantas 3 Altura máxima del molino (mm) 4 Diámetro del cuerpo del molino (mm) 6 Potencia del motor (W) 7 Molino accionado por un motor eléctrico 8 Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste 13 Protección del molino contra la corrosión 15 Tolva desmontable 16 Garantía de piezas de repuesto + 9 Rotor de 5 cuchillas 10 Contracuchillas regulables 12 Malla perforada según la granulometría a obtener 14 Rotor, contracuchillas y rompedores intercambiables 17 Los pedestales deben ser engrasados regularmente 18 Los tornillos deben ser apretados regularmente

ANEXO 9. EVALUACIÓN CONCEPTUAL DE VARIANTES DE DISEÑO CON LOS MÉTODOS AHP, DECISION MATRIX Y EL MÉTODO DE PUGH PARA EL CASO DEL MOLINO DE CUCHILLAS AHP

Para la evaluación conceptual de las soluciones del molino de cuchillas a partir del método AHP, se establecieron los criterios reflejados en la tabla 9.1 (cinco criterios para evaluar las alternativas de los molinos). Los criterios son evaluados entre sí para definir su grado de importancia y, posteriormente, evaluarse de forma independiente entre cada una de las variantes conceptuales del molino de cuchillas.

Tabla 9.1. Criterios de evaluación a partir del método AHP.

Criterios de evaluación	
Criterio 1	Volumen de la tolva.
Criterio 2	Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste.
Criterio 3	Garantía de piezas de repuesto, para mantener la operatividad del molino.
Criterio 4	Malla perforada según la granulometría a obtener.
Criterio 5	Los pedestales deben ser engrasados regularmente.

La tabla 9.2 establece el nivel de importancia entre los criterios, definiendo cuál es el más importante con respecto a los restantes y, además, expresa la intensidad de esta importancia, evaluada en función de una escala de valores que va del 1 al 9. En ella, el menor valor indica que un requerimiento con respecto al otro tiene “igual importancia”; el mayor valor de la escala significa que un requerimiento es “extremadamente importante” en relación con el otro.

Tabla 9.2. Nivel de importancia entre los criterios.

A	B	Más Impor- tante	Intensidad
Criterio 1	Criterio 2	A	9
	Criterio 3	B	7
	Criterio 4	B	9
	Criterio 5	A	1
Criterio 2	Criterio 3	A	9
	Criterio 4	A	3
	Criterio 5	A	1
Criterio 3	Criterio 4	A	9
	Criterio 5	A	1
Criterio 4	Criterio 5	A	1

Tabla 9.3. Matriz de comparación pareada.

Matriz	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5
Criterio 1	1	9	1/7	1/9	1
Criterio 2	1/9	1	9	3	1
Criterio 3	7	1/9	1	9	1
Criterio 4	9	1/3	1/9	1	1
Criterio 5	1	1	1	1	1

El vector (avmc), contenido en la expresión (9.1), es el autovector resultante del proceso de normalización e iteración de la matriz (Mcmc). El valor 0,2710 indica que el criterio de mayor importancia es el Criterio 3, correspondiente al de “Garantía de piezas de repuesto para mantener la operatividad del molino”. El Criterio 5, “Los pedestales deben ser engrasados regularmente”, es el de menor relación de importancia con respecto a los restantes criterios su valor corresponde a 0,0783.

$$\mathbf{M}_{cfe} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 9,0000 & 0,1429 & 0,1111 & 1,0000 \\ 0,1111 & 1,0000 & 9,0000 & 3,0000 & 1,0000 \\ 7,0000 & 0,1111 & 1,0000 & 9,0000 & 1,0000 \\ 9,0000 & 0,3333 & 0,1111 & 1,0000 & 1,0000 \\ 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad \mathbf{avmc} = \begin{bmatrix} 0,2113 \\ 0,2612 \\ 0,2710 \\ 0,1782 \\ 0,0783 \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

Las expresiones contenidas en las matrices de la (9.2) a la (9.6) muestran los diferentes valores calculados del comportamiento individual de los criterios para cada una de las variantes conceptuales del molino de cuchillas.

$$\mathbf{M}_{cfe1} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 0,2000 & 0,1111 \\ 5,0000 & 1,0000 & 0,1429 \\ 9,0000 & 7,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad \mathbf{avmc1} = \begin{bmatrix} 0,0545 \\ 0,1734 \\ 0,7720 \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

$$\mathbf{M}_{cfe2} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 5,0000 & 5,0000 \\ 0,2000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 0,2000 & 1,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad \mathbf{avmc2} = \begin{bmatrix} 0,7143 \\ 0,1429 \\ 0,1429 \end{bmatrix} \quad (9.3)$$

$$\mathbf{M}_{cfe3} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 0,2000 & 0,2000 \\ 5,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 5,0000 & 1,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad \mathbf{avmc3} = \begin{bmatrix} 0,0909 \\ 0,4545 \\ 0,4545 \end{bmatrix} \quad (9.4)$$

$$\mathbf{M}_{cfe4} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 7,0000 & 7,0000 \\ 0,1429 & 1,0000 & 1,0000 \\ 0,1429 & 1,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad \mathbf{avmc4} = \begin{bmatrix} 0,7778 \\ 0,1111 \\ 0,1111 \end{bmatrix} \quad (9.5)$$

$$\mathbf{M}_{cfe5} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad \mathbf{avmc5} = \begin{bmatrix} 0,3333 \\ 0,3333 \\ 0,3333 \end{bmatrix} \quad (9.6)$$

La expresión (9.7) contiene los autovectores de los diferentes criterios evaluados en cada variante conceptual. A partir de ellos se estructurará la matriz del molino de cuchillas (MMC) correspondiente con la expresión (9.8) que, al ser multiplicada en la ecuación (9.9) por el autovector calculado en (9.2), permitirá definir el diseño conceptual que, de forma más adecuada, dará satisfacción a los criterios de evaluación.

$$\mathbf{MMC} = \begin{bmatrix} \mathbf{avmc1} & \mathbf{avmc2} & \mathbf{avmc3} & \mathbf{avmc4} & \mathbf{avmc5} \end{bmatrix} \quad (9.7)$$

$$\mathbf{MMC} = \begin{bmatrix} 0,0545 & 0,7143 & 0,0909 & 0,7778 & 0,3333 \\ 0,1734 & 0,1429 & 0,4545 & 0,1111 & 0,3333 \\ 0,7720 & 0,1429 & 0,4545 & 0,1111 & 0,3333 \end{bmatrix} \quad (9.8)$$

$$\mathbf{MFMC} = \mathbf{MMC} * \mathbf{avmc} \quad (9.9)$$

$$\mathbf{MFMC} = \begin{bmatrix} \mathbf{0,3874} \\ 0,2430 \\ 0,3695 \end{bmatrix} \quad (9.10)$$

El valor de 0,3874, contenido en (MFMC) indica que el diseño conceptual del molino de cuchillas 1, es la variante que más satisface los criterios de evaluación por el método de AHP; por tanto, es la que da respuesta en mayor medida a los requerimientos del usuario.

Decision Matrix

Tomando como base los criterios establecidos en el análisis por el método de AHP, se implementa la Decision Matrix (Tabla 9.4). Para ello se establecen los pesos de los criterios y la magnitud asociada a cada variante, en función de una escala comprendida entre 0 y 4, donde el menor valor indica que el requerimiento tiene un pobre desempeño con respecto a los otros; el mayor valor de la escala significa que el requerimiento tiene el mejor desempeño en relación con los restantes.

Tabla 9.4. Análisis por Decision Matrix para las variantes conceptuales de molino de cuchillas.

Matriz de Decisiones							
Criterio	Peso	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
		Magn.	Val.	Magn.	Val.	Magn.	Val.
Volumen de la tolva	4	2	8	3	12	4	16
Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste	5	4	20	3	15	3	15
Garantía de piezas de repuesto para mantener la operatividad del molino	3	3	9	4	12	4	12
Malla perforada según la granulometría a obtener	2	2	4	3	6	2	4
Los pedestales deben ser engrasados regularmente	1	2	2	2	2	2	2
Total	15	13	43	15	47	15	49

El análisis de los resultados contenidos en la tabla 9.4 indica que la Variante 3 es la que tiene el valor más alto de la suma total, correspondiente a 49, lo que la hace ser la de mejor respuesta a los criterios de evaluación por el método de Decision Matrix; por tanto, es la que más satisface los requerimientos del usuario. En la figura 9.1 se muestran los valores gráficos de los resultados del análisis de las variantes conceptuales estudiadas y se puede apreciar que la Variante 3 es la de mayor valor, siendo este de 49.

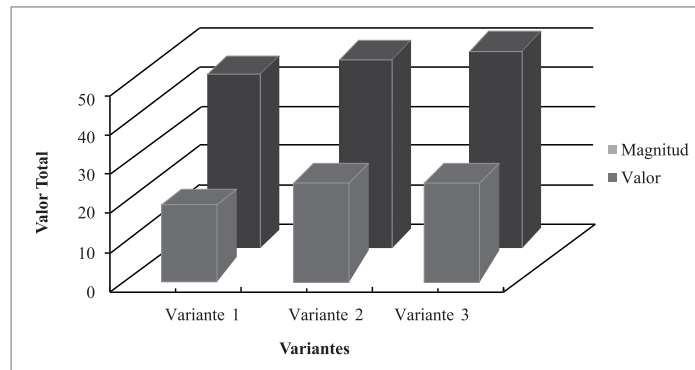


Figura 9.1. Valores gráficos del análisis de variantes de molino de cuchillas por Decision Matrix

Método de Pugh

Manteniendo los criterios establecidos en el análisis por los métodos de AHP y Decision Matrix, los resultados obtenidos por el Método de Pugh se muestran en la tabla 9.5. En él se define un patrón comparativo, al cual se la agrega un “Concepto 0”, que es una variante ideal utilizada como referencia para establecer las comparaciones del comportamiento de los criterios en los diseños conceptualizados con relación al patrón establecido.

En el Método de Pugh se asocia una escala de -1, 0 y 1 para establecer las relaciones de comparación entre el concepto patrón y la variante en análisis: se indica 0 si el concepto es valorado igual que el criterio patrón, 1 si el concepto es valorado como mejor que el patrón y -1 si el concepto es valorado como peor. Los resultados contenidos en la sumatoria de la tabla 9.5 indican que el Concepto 3 es el de mayor valor con respecto a los restantes, siendo este diseño el de mejor respuesta a los criterios de evaluación por el Método de Pugh. Según el mismo, este concepto corresponde con el molino de cuchillas que más satisface los requerimientos del usuario.

Tabla 9.5. Análisis de conceptos por el Método de Pugh.

Criterios	PATRÓN	1	2	3
	Concepto 0	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Volumen de la tolva.	1	0	0	1
Cuchillas y contracuchillas construidas de un material resistente al desgaste.	1	1	0	0
Garantía de piezas de repuesto para mantener la operatividad del molino.	1	-1	1	1
Malla perforada según la granulometría a obtener.	1	1	0	-1
Los pedestales deben ser engrasados regularmente.	1	0	0	0
$\Sigma +$	+5	+2	+1	+3
$\Sigma -$	-0	-1	-0	-0
Σ	5	1	1	3

ANEXO 10. PROTOTIPOS DE LOS CASOS DE ESTUDIOS

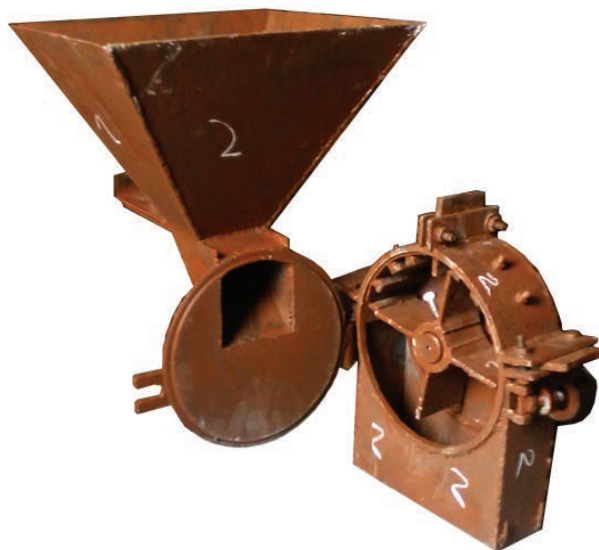


Figura 10.1. Prototipo inicial del molino de cuchillas.

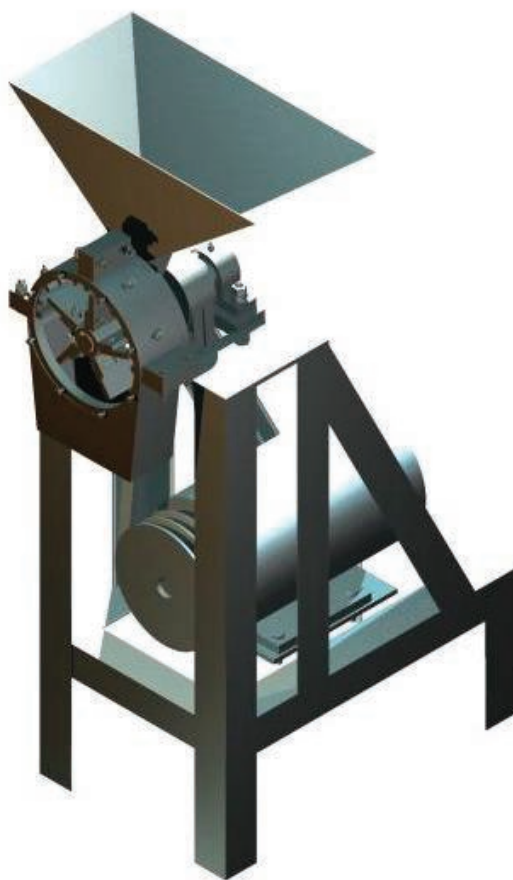


Figura 10.2. Prototipo de molino del cuchillas construido en base al diseño conceptual.



Figura 10.3. Prototipo inicial del fogón eficiente para biomasa.



Figura 10.4. Prototipo de fogón eficiente para biomasa construido en base al diseño conceptual.