

Aproximación al Diseño para la Mantenibilidad de productos modulares y su aplicación en etapas iniciales de diseño

David Serje Martínez¹

¹ Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia. Email: david.serje@javerianacali.edu.co

Resumen

El Diseño para la Mantenibilidad engloba múltiples perspectivas que finalmente impactan en los costos, tiempos y recursos asociados al mantenimiento. Los métodos tradicionales empleados para este enfoque a menudo se soportan sobre aproximaciones cualitativas (basados en recomendaciones) o cuantitativas (basados en métricas) que requieren de fases de diseño detallado o de complejos modelos matemáticos para su correcta aplicación. El presente trabajo, pretende aportar una nueva aproximación metodológica hacia el Diseño para la Mantenibilidad de productos modulares, visto desde las etapas incipientes de diseño. Se propone un método sistemático resumido en seis pasos, basado en la integración de conocimientos empíricos y analíticos. La metodología desarrollada es aplicada a un caso de estudio de un producto orientado al sector de construcción y minería, mostrando ser una herramienta de apoyo en para la incorporación efectiva de criterios de mantenibilidad en el diseño modular.

Palabras clave: Mantenibilidad; Diseño conceptual; Arquitectura modular; Producto.

Abstract

Design for Maintainability incorporates multiple perspectives that finally impact on costs, times and resources associated with maintenance. The traditional methods used for this design approach are often supported by qualitative (recommendations based) or quantitative (metrics based) methods that require detailed design phases or complex mathematical models for their correct application. The present work aims to provide a new methodological approach towards the design for the maintainability of modular products, from initial design stages. A systematic approach is proposed, which is covered through six steps, and it's based on the integration of empirical and analytical knowledge. The suggested methodology is applied to a case study of a product oriented to the construction and mining sector, showing to be a support tool for the effective incorporation of maintainability criteria in the design of modular products.

Keywords: Maintainability; Conceptual Design; Modular architecture; Product.

1. Introducción

En los últimos años, la creciente competencia global y los mercados que cambian rápidamente comprometen a los diseñadores y fabricantes a ofrecer excelentes productos innovadores con calidad y flexibilidad mejoradas, tiempo de comercialización con costos competitivos. Estos requisitos van más allá del diseño tradicional basado en forma y función y necesitan consideraciones especiales para analizar su influencia en todas las etapas del desarrollo del producto. Para este propósito, las técnicas DFX se desarrollaron desde

la década de 1960, donde se desarrollaron algunas pautas de fabricación para su uso durante el diseño del producto, que luego evolucionaron hacia el diseño para la fabricación (DFM) y el diseño para el ensamblaje (DFA) [1, 2, 3]. Más recientemente, también se agregaron a estas pautas o métricas las preocupaciones frente a la sostenibilidad, el desmontaje, el ciclo de vida y los costos, que a menudo se denominan diseño para X (DFX).

Entre estas estrategias, el diseño para la mantenibilidad (DFMt) busca facilitar las tareas de mantenimiento

para que el producto pueda mantenerse durante todo su ciclo de vida útil a un costo razonable y sin ninguna dificultad [4]. Lo anterior, tiene un gran impacto en la vida útil del sistema y pudiera llegar a ser una importante fuente de ingresos para fabricantes y distribuidores. También puede proporcionar una ventaja competitiva sostenible en el mercado para todas las partes involucradas, al tiempo que asegura también la lealtad del cliente [5]. En este punto, resulta importante destacar que la tarea de aplicar análisis de mantenibilidad en las fases iniciales de diseño se considera una tarea compleja y difícil dada la incidencia de factores relacionados directamente a la tarea a ejecutar por el sistema o producto (con información disponible limitada, o requerimientos de ingeniería poco claros) y factores relacionables a la toma de decisiones (conforme a la experticia y diversidad del equipo de diseño) en un entorno de incertidumbre para usuarios e ingenieros.

Trabajos previos en esta línea investigan parámetros funcionales y los relacionan con costos de mantenimiento [6], emplean componentes acoplados e índices de confiabilidad [7, 8] o aplican algunas metodologías como QFD [9] o TRIZ [10] para establecer la estrategia conceptual de mantenimiento aplicable conforme a los requerimientos actuales.

Bajo otro enfoque, los productos modulares o concebidos bajo esta filosofía de diseño parten de una similitud en los componentes que lo integran, siendo agrupados conforme a heurística o principios de arquitectura [11, 12]. Lo anterior, permite que los productos modulares desde su concepción promuevan reparaciones o sustituciones rápidas, reduciendo el requerimiento de almacenamiento y mejorando la mantenibilidad en general [13]. Pese a lo anterior, aún existen algunos retos para mejorar la integración de directa de diseño conceptual de productos modulares y la mantenibilidad de estos; constituyéndose en un insumo vital para la industria, considerando las tendencias actuales de los fabricantes a ofrecer sus productos en conjunto con su servicio postventa.

En este artículo se realiza una primera aproximación a una metodología general que puede aplicarse durante el diseño conceptual sin el uso de métricas complejas o modelos matemáticos.

2. Modularidad y Mantenibilidad

2.1. Diseño Modular

El diseño modular se centra en producir unidades que realizan una o más funciones discretas que al ser conectados entre sí permiten al sistema unificado proporcionar una variedad de funciones o capacidades

[15]. A menudo, se hace énfasis en la minimización de las interacciones entre componentes para poder diseñar y producir esos componentes de forma independiente [14].

Un aspecto importante de los productos modulares es la creación de una unidad central básica a la que se pueden instalar diferentes elementos o módulos, permitiendo así producir una variedad de versiones del mismo módulo. El núcleo debe tener capacidad suficiente para hacer frente a todas las variaciones esperadas en rendimiento y uso [11].

El diseño de productos modulares generalmente se basa en algún tipo de índice de similitud, agrupando componentes basándose en heurísticas funcionales, estandarización de interfases o partiendo de derivaciones como principios de arquitectura. Algunas estrategias de diseño modular consideran el costo de ensamblaje y fabricación de un módulo particular para todo el producto [14]. Otros han ampliado el análisis de los módulos incorporando el costo total de mantenimiento de los módulos [6]. Dado que la modularidad promueve una rápida reparación y/o reemplazo, mejor accesibilidad, reducción del almacenamiento de componentes y su consecuente administración, entre otros, se puede mejorar la mantenibilidad general [13]. De hecho, la modularidad de un sistema no sólo posee ventajas en el mantenimiento sino que también influye en la planificación y ejecución de actividades futuras en un sistema.

2.2. Diseño para Mantenibilidad

La mantenibilidad ha pasado de ser un concepto a una disciplina científica reconocida desde el punto de vista del diseño y la gestión de ingeniería [16]. La mantenibilidad en general se refiere a la facilidad con la que se puede mantener un equipo o sistema en condiciones operativas (un estado efectivo y eficiente) [17].

El objetivo básico del diseño para la mantenibilidad (DFMt) es asegurar que el producto pueda mantenerse durante todo su ciclo de vida útil a un costo razonable y sin ninguna dificultad. Para este propósito, los requisitos de mantenibilidad se pueden clasificar tanto en forma cualitativa como cuantitativa para un sistema o equipo. Los requisitos cualitativos pueden considerarse como pautas de diseño que describen características generales como [1, 18, 19]:

- El diseño deberá excluir la posibilidad de daños al equipo durante el mantenimiento y servicio. El diseño deberá hacer uso de un fusible mecánico y eléctrico (los cuales fallan para proteger el resto del sistema).

- Minimizar la necesidad de herramientas especiales.
- Minimizar el número de diferentes tipos de sujetadores o componentes no estándar.
- Sobre diseñar componentes, diseñar con margen de seguridad adecuado.
- Proporcionar redundancia, al tiempo que se evita componentes innecesarios.
- Diseñar sistemas modulares.
- Las referencias de las piezas se ubicarán junto a cada componente de manera legible y permanente.
- Utilizar guías, tamaños o formas para garantizar que las piezas removibles se vuelvan a ensamblar en la posición correcta.
- Diseñar interfaces robustas.
- Proporcionar manijas para unidades removibles que pesen más de 10 libras o cuya forma las haga difíciles de manejar.
- Evitar bordes, esquinas o protuberancias cortantes que puedan causar lesiones al personal.
- No utilizar materiales que afecten la salud de las personas. Emplear materiales que resistan las condiciones ambientales y que no prolonguen las actividades de mantenimiento.

Los criterios cuantitativos de mantenibilidad se basan en la medición del tiempo estimado de reparación de módulos individuales en un equipo. Algunas métricas se pueden expresar como [20, 21]: Tiempo Medio de Reparación (MTTR) como tiempo de mantenimiento correctivo que se utiliza posteriormente para calcular la disponibilidad y el tiempo de inactividad del sistema. El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) es el tiempo transcurrido previsto entre fallas inherentes de un sistema durante la operación. Se podrían definir otras métricas a partir de indicaciones económicas, técnicas y organizativas en diferentes niveles. Este tipo de datos podría recopilarse como datos estadísticos para evaluar y comparar diferentes tipos de módulos/componentes o unidades funcionales según una tecnología elegida. La mayoría de estos datos sólo se pueden recopilar en etapas avanzadas de diseño con componentes o módulos detallados y requieren de información de confiabilidad o costos para su determinación.

3. Metodología propuesta

Como se mencionó previamente, muchas de las técnicas existentes son de naturaleza reactiva, por lo cual sólo pueden ser empleadas en fases operacionales del producto. En etapas iniciales de diseño, se recomienda una aproximación de métodos sistemáticos combinado con conocimiento empírico y analítico conforme a la Figura 1.

Paso 1: Definir o desarrollar la Especificación de Diseño de Producto o Sistema de acuerdo con las

necesidades actuales. Esto es el documento básico de referencia y control para el diseño, fabricación y prueba del producto, y engloba la identificación del producto y del mercado, al igual que propiedades funcionales, operativas, de fabricación entre otras propiedades internas/externas.

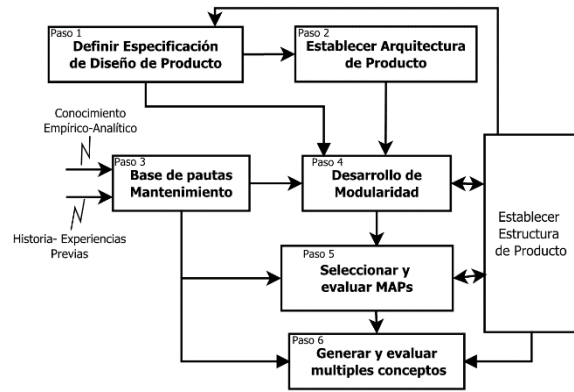


Figura 1. Metodología de diseño recomendada. Fuente: elaboración propia.

En este aspecto, y basados en enfoques realizados por Tjiparuro y Thompson [13], Mital et al. [22], Dhillon [21] y otros [5, 23, 18], en el presente trabajo se redefinen y simplifican los elementos de diseño requeridos durante el proceso conceptual a los siguientes (ver Figura 2): Estandarización, Modularidad, Simplicidad, Diagnosticabilidad, Accesibilidad, Facilidad de Servicio y Confiabilidad. Estos elementos de diseño son explicados en forma detallada en la Tabla 1.

Estos elementos de diseño deben priorizarse de acuerdo con el tipo y naturaleza de producto, por lo cual pueden compararse empleando una matriz de comparación por pares.

Paso 2: Establezca la arquitectura del producto e investigue múltiples alternativas haciendo uso de la creatividad y la experiencia.

Paso 3: Desarrollar o investigar una base de pautas o guías de mantenimiento adecuadas a la tipología de producto. Lo anterior, se consolida también con conocimiento empírico o analítico, experiencias previas para respaldar los criterios y elementos o características de diseño.

Paso 4: Desarrollar la modularidad del producto o sistema aplicando métodos para mejorar la capacidad y/o funcionalidad como [24, 11, 6, 25]. Por ejemplo, la matriz de estructura de diseño (DSM) puede contemplar el flujo de información, energía, materiales o funciones que interactúan entre componentes y a partir de ello, poder establecer la estructura del

producto para posteriormente revisar, iterar o mejorar la calidad.

Paso 5: Seleccionar y evaluar los Principios de Arquitectura Modular (MAP) adecuados para aplicar con el fin de mejorar la capacidad y/o funcionalidad.

Paso 6: Generar y evaluar múltiples conceptos a través de un análisis morfológico para explorar posibilidades que puedan surgir de diferentes estructuras funcionales, módulos, etc.

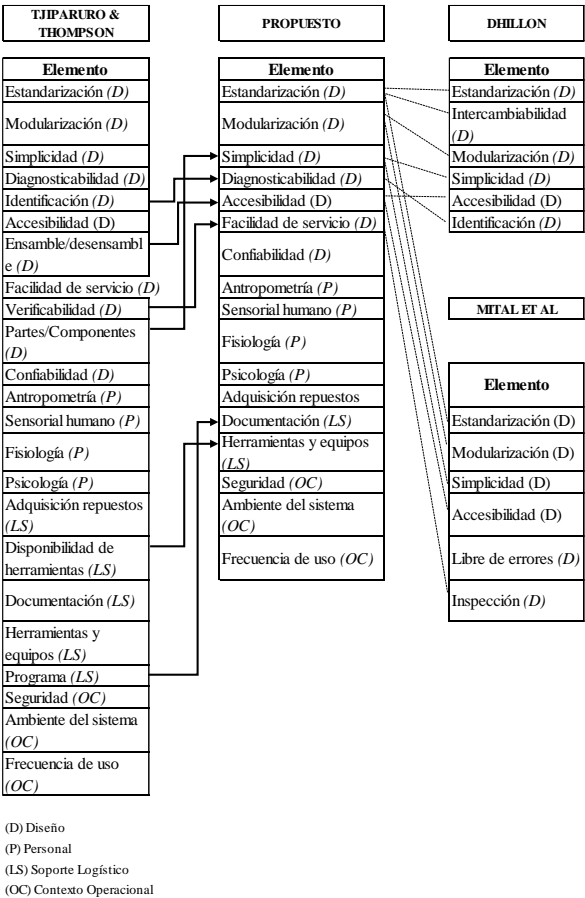


Figura 2. Categorías y elementos para la mantenibilidad. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Elementos de diseño de para mantenibilidad, filosofía, definición y características facilitadoras.

Atributo	Filosofía y definición	Características facilitadoras
Estandarización	<i>"La estandarización permite reemplazar fácilmente los componentes defectuosos"</i> . Intercambiabilidad entre componentes coincidentes al reemplazar un artículo defectuoso, es decir, no se requiere reprocesos físicos para lograr el ajuste y se necesita una cantidad mínima de movimientos para lograr el funcionamiento adecuado. Variedad mínima de repuestos.	Maximizar el uso de piezas comunes o estándar en diferentes productos; minimizar el número de diferentes tipos de componentes, conjuntos o equipos; Tolerancias dimensionales y funcionales correctas en los repuestos, uso del mismo estilo de codificación en la máxima medida.
Modularización	<i>"Cuanto mayor sea el grado de modularidad introducido en el diseño, más fácil será sustituir un componente"</i> . Dividir el sistema o producto en unidades física y funcionalmente distintas para permitir su extracción y reemplazo. Reparar o reemplazar unidades funcionales en el menor tiempo posible para restaurar el funcionamiento general del sistema.	Empacado funcional de unidades.
Simplicidad	<i>"Un diseño más simple es inherentemente más fácil de mantener"</i> . Número reducido de piezas, incluidos componentes redundantes. También implica simplicidad en las características físicas de las piezas o conjuntos.	Minimum number of parts, absolute function for each part. Simple shapes, weight.
Diagnosticabilidad	<i>"El lugar de mantenimiento deberá conocerse de antemano"</i> . Detección, localización y aislamiento de fallos en el menor tiempo posible. Uso de etiquetado, grabado y marcado adecuado de piezas y puntos críticos. Características que permiten determinar el estado (operable, inoperable o degradado) de un elemento.	Intercambio funcional, monitoreo de parámetros para detectar fallas, incluidas alarmas e instalación de equipo de prueba incorporado. Etiquetado adecuado e instrucciones para una correcta identificación. Puntos de prueba principales ubicados adecuadamente junto a los controles y pantallas aplicables, adecuadamente rotulados, agrupados, accesibles e iluminados.
Accesibilidad	<i>"Todos los componentes susceptibles de inspección, mantenimiento o ajuste deben ser de fácil acceso, evitando su colocación en un conjunto incorrecto"</i> . Apertura/fijación fácil y rápida de piezas o componentes acoplados garantizando un montaje correcto.	Bisagras, sujetadores cautivos, soportes removibles o deslizantes, puertas de acceso del tamaño adecuado. Mecanismos de liberación rápida y estándar en sujetadores, cables y conectores. Uso al mínimo de soldadura o uniones soldadas. Bajo peso y volumen de componentes. Asegure características infalibles para evitar un montaje incorrecto.
Facilidad de servicio	<i>"Diseñar el sistema de tal manera que sea posible una previsión adecuada del mantenimiento"</i> . Características que promueven la retención de la condición prevista (resistencia al desgaste, lubricación de por vida, lubricación de larga duración y revestimiento de superficie).	Requisitos de servicio mínimos. Uso de materiales resistentes al desgaste, autolubricantes, lubricantes de larga duración y recubrimiento de superficies. Puntos de ajuste y/o lubricación accesibles, conocidos y rotulados. Incluye la capacidad del producto para continuar funcionando después de la falla de un componente considerado.
Confiabilidad	<i>"Componentes o conjuntos robustos que utilizan menos de su capacidad total"</i> . Utilice componentes o conjuntos con tasas de falla más bajas que funcionen en condiciones de bajo esfuerzo. Componentes y materiales que cumplen con los estándares de calidad.	Menores tasas de falla para piezas y cualquier otro componente o conjunto del sistema. Se deben conocer las tasas de falla de piezas, componentes y conjuntos, y sus modos de falla correspondientes.

Fuente: elaboración propia.

4. Caso de estudio

Para comprender la aplicación del marco metodológico propuesto, se implementó una integración de DFMt con diseño modular en un presurizador de cabina para minería, construcción y otras industrias. Los sistemas de filtración y presurización se utilizan en cabinas cerradas de equipos móviles y estacionarios para reducir el polvo respirable y otros contaminantes y proporcionar la más alta calidad de aire al operador del equipo [26, 27].

4.1. Especificación de diseño del producto

Según una investigación de mercado, los requisitos se enumeran y clasifican de la siguiente manera según la prioridad (*F*) requisito fijo que debe cumplirse; (*S*) deseable fuertemente; (*W*) deseable; (*N*) no considerado.

Propósito

(*F*) Proporciona el flujo de aire fresco, con la calidad y la presión necesarios a la cabina cerrada de forma automática y sin supervisión una vez que ha comenzado su operación.

Propiedades determinadas funcionalmente

(*F*) Filtración de aire fresco con un valor de informe de eficiencia mínimo (MERV) de 16 o aire de partículas de alta eficiencia (HEPA) cuando sea necesario.
 (*F*) Flujo de aire desde 25 hasta 140cfm.
 (*F*) Lograr una presión estática mínima de 0.26" H₂O.
 (*S*) Alta eficiencia energética.

Propiedades operativas

(*F*) Opera con diferentes fuentes de alimentación según disponibilidad (110V AC, 12V DC, 24V DC).
 (*F*) Bajo consumo de energía (<300W).
 (*W*) Configuración simple (interfaces básicas, curva de aprendizaje baja).
 (*S*) Facilidad de montaje y desmontaje.
 (*S*) MTTR y MTBF bajos.
 (*W*) Esperanza de vida mínima de 4 años o 20.000h.

Propiedades de fabricación

(*F*) Utiliza componentes estándar cuando sea posible, construcción modular.
 (*S*) Cantidad mínima de piezas.
 (*W*) Tamaño compacto (1050x680x250mm máx.)
 (*W*) Bajo peso (40kg máx.).

Medio ambiente

(*S*) Múltiples temperaturas de operación (máx. 80°C).
 (*W*) Fácil limpieza.
 (*S*) Evita daños graves al medio ambiente causados por los materiales utilizados en el dispositivo.

4.2. Arquitectura del producto

La descomposición estructural física y funcional de un sistema de presurización estándar para cabinas cerradas se ilustra en la Figura 3.

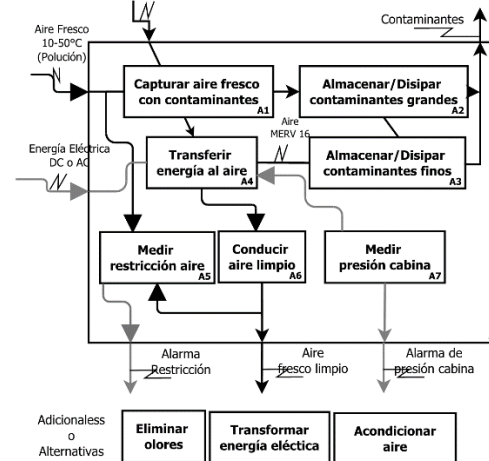


Figura 3. Descomposición funcional del producto. Fuente: elaboración propia.

4.3. Desarrollo de la modularidad

Se pueden establecer diferentes módulos (partiendo de las funciones en la Figura 3) conforme al flujo de aire y correlación entre componentes de acuerdo con las siguientes funciones (incluyendo las características de funcionalidad o capacidad con potencial de mejora):

- **Módulo 1:** Capturar aire fresco con contaminantes y Almacenar/Disipar contaminantes gruesos (Funciones A1, A2). Para mejorar la capacidad.
- **Módulo 2:** Almacenar/Disipar contaminantes finos (Función A3). Para mejorar la capacidad y la funcionalidad.
- **Módulo 3:** Transferir energía al aire (Función A4). Para mejorar la capacidad.
- **Módulo 4:** Conducir aire limpio (Función A6). Para mejorar la funcionalidad.
- **Módulo 5:** Medir la restricción de aire y la presión de la cabina (Funciones A5 y A7). Para mejorar la funcionalidad.

El diseño previo asegura la independencia de los requisitos funcionales permitiéndoles mapear directamente a los parámetros de diseño. Luego se puede desarrollar una matriz morfológica para explorar diferentes arreglos, considerando alternativas de solución como las siguientes:

- **Módulo 1:** Separador inercial, filtro de mangas, separador electrostático o filtro húmedo.
- **Módulo 2:** Filtro seco (MERV o HEPA), filtro de carbón activado, o filtro electrostático.

- **Módulo 3:** Ventilador axial, ventilador centrífugo, accionado por diferencial de presión de motor o de aire acondicionado existente.
- **Módulo 4:** Tubos o ducterías, mangueras flexibles, montaje directo.
- **Módulo 5:** Sensores de presión, flujo, partículas o gases contaminantes.

4.4. Seleccionar MAP's

Con una matriz de comparación por pares, se pueden comparar los principios de la arquitectura modular en función de la mejora requerida y su influencia en los atributos de diseño para definir los principios más apropiados a aplicar para garantizar el cumplimiento del diseño para mantenibilidad.

Después de evaluar los MAP, se puede desarrollar un gráfico de radar como se muestra en la Figura 4, donde se emplearán principios como modularidad y Ampliación del Bus para mejorar la funcionalidad en el caso de estudio actual.

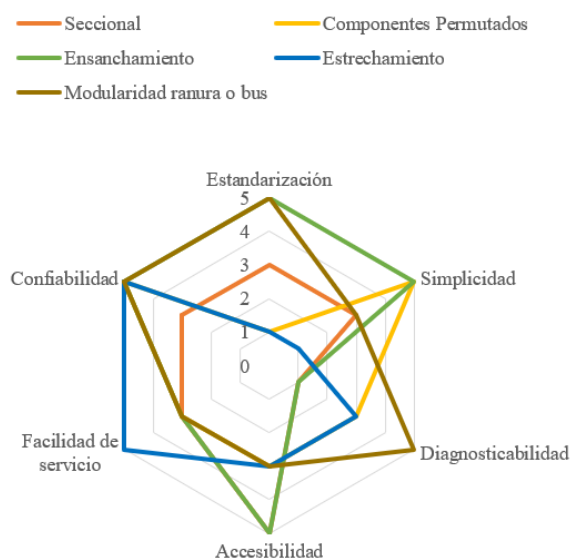


Figura 4. Principios de modularidad relevantes para la mantenibilidad que mejoran la funcionalidad. Fuente: elaboración propia.

4.5. Generación de conceptos y evaluación

A través de la combinación de las alternativas de solución indicadas en la matriz morfológica se pueden establecer varias propuestas de diseño, en cuyo caso incluyen la aplicación de principios de arquitectura modular que son congruentes con los requerimientos de mantenibilidad, permitiendo por ejemplo mejorar en casos como: Módulo 4, donde se mejora la funcionalidad mediante la modularidad del bus, permitiendo un montaje directo genérico a diferentes

unidades. El montaje estándar y simple mejora aún más la capacidad de mantenimiento al tiempo que permite que diferentes conceptos de diseño compartan la misma interfaz. Módulo 5: La funcionalidad se puede mejorar mediante la aplicación de Ensanchamiento, permitiendo que un módulo único satisfaga todas las variaciones posibles en diferentes requisitos de medición.

5. Conclusiones

Este estudio propone un enfoque sistemático basado en experiencias, conocimiento empírico y analítico sobre características de diseño, personal, logística y medio ambiente que tienen un impacto en la facilidad de mantenimiento del producto. La evaluación del impacto de diferentes principios de modularidad en los elementos de diseño y la mantenibilidad se realiza a través de un método de seis pasos que permite explorar varios conceptos con capacidad y/o funcionalidad mejorada para cada módulo desarrollado.

El método propuesto ofrece las siguientes ventajas sobre los enfoques tradicionales:

- Aplicación sencilla en la etapa inicial de diseño sin modelos matemáticos complejos.
- Se puede utilizar la aplicación de diferentes técnicas para establecer especificaciones de diseño o modularización adecuadas al tipo de producto o preferencia del usuario.
- Permite a los diseñadores y partes interesadas definir su prioridad en elementos de diseño como una mayor simplicidad o una mejor accesibilidad para los módulos. Este conocimiento se puede ampliar para caracterizar "perfiles de diseño" para segmentos industriales o tipos de productos específicos.
- Mediante la aplicación de principios de modularidad se pueden desarrollar varios conceptos de diseño con una mantenibilidad mejorada. Se deben explorar más principios como el apilamiento en serie y en paralelo, ya que tienen un impacto directo en la capacidad y en factores críticos en algunas industrias como la confiabilidad y la capacidad de servicio.

Trabajos futuros considerarán el impacto de estos principios de arquitectura modular en etapas de diseño posteriores y en el personal, el soporte logístico y el contexto operativo, ya que está claro que el mantenimiento depende de varios factores. Se pueden lograr ahorros considerables de dinero, tiempo y recursos mediante la aplicación de enfoques de diseño modular eficaces en las primeras etapas de desarrollo de productos.

6. Referencias

- [1] T.-C. Kuo, S. H. Huang and H.-C. Zhang, "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 41, p. 241–260, 2001.
- [2] G. Boothroyd, P. Dewhurst and W. A. Knight, *Product design for manufacture and assembly*, CRC press, 2010.
- [3] D. M. Anderson, *Design for manufacturability: how to use concurrent engineering to rapidly develop low-cost, high-quality products for lean production*, CRC press, 2014.
- [4] L. J. Gullo and J. Dixon, *Design for Maintainability*, John Wiley & Sons, 2021.
- [5] T. Markeset and U. Kumar, "Design and development of product support and maintenance concepts for industrial systems," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 9, p. 376–392, 2003.
- [6] Y.-T. Tsai, K.-S. Wang and S.-P. Lo, "A study of modularity operation of systems based on maintenance consideration," *Journal of Engineering Design*, vol. 14, p. 41–56, 2003.
- [7] A. Coulibaly, R. Houssin and B. Mutel, "Maintainability and safety indicators at design stage for mechanical products," *Computers in industry*, vol. 59, p. 438–449, 2008.
- [8] Y. Gao, Y. Feng and J. Tan, "Product modular design incorporating preventive maintenance issues," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 29, p. 406–420, 2016.
- [9] Z. Zhang and X. Chu, "A new approach for conceptual design of product and maintenance," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 23, p. 603–618, 2010.
- [10] T. Vaneker and T. van Diepen, "Design Support for Maintenance Tasks using TRIZ," *Procedia CIRP*, vol. 39, p. 67–72, 2016.
- [11] A. K. Kamrani and M. S. Sa'ed, *Product design for modularity*, Springer Science & Business Media, 2002.
- [12] J. Mesa, H. Maury, R. Arrieta, A. Bula and C. Riba, "Characterization of modular architecture principles towards reconfiguration: a first approach in its selection process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, p. 221–232, 2015.
- [13] Z. Tjiparuro and G. Thompson, "Review of maintainability design principles and their application to conceptual design," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 218, p. 103–113, 2004.
- [14] G. Pahl and W. Beitz, *Engineering design: a systematic approach*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] B. Nepal, L. Monplaisir and N. Singh, "A methodology for integrating design for quality in modular product design," *Journal of Engineering Design*, vol. 17, p. 387–409, 2006.
- [16] B. S. Blanchard, D. Verma and E. L. Peterson, *Maintainability: a key to effective serviceability and maintenance management*, vol. 13, John Wiley & Sons, 1995.
- [17] L. R. Greenman, "Maintainability Engineering Design Notebook, Revision 2, and Cost of Maintainability," 1975.
- [18] W. Mulder, J. Blok, S. Hoekstra and F. Kokkeler, "Design for maintenance: guidelines to enhance maintainability, reliability and supportability of industrial products," 2012.
- [19] D. Ullman, *The mechanical design process*, McGraw-Hill Higher Education, 2015.
- [20] C. E. N. EN, "15341: Maintenance—Maintenance Key Performance Indicators," 2007.
- [21] B. S. Dhillon, *Engineering maintainability: how to design for reliability and easy maintenance*, Gulf Professional Publishing, 1999.
- [22] A. Mital, A. Desai, A. Subramanian and A. Mital, *Product development: a structured approach to consumer product development, design, and manufacture*, Elsevier, 2014.
- [23] S. Kumar, I. A. Khan and O. P. Gandhi, "A theoretical framework for extraction and quantification of psychological attributes in design for maintainability: a team-inspired approach," *Research in Engineering Design*, vol. 26, p. 289–308, 2015.
- [24] R. B. Stone, K. L. Wood and R. H. Crawford, "A heuristic method for identifying modules for product architectures," *Design studies*, vol. 21, p. 5–31, 2000.
- [25] V. B. Kreng and T.-P. Lee, "QFD-based modular product design with linear integer programming—a case study," *Journal of Engineering Design*, vol. 15, p. 261–284, 2004.
- [26] A. B. Cecala, J. A. Organiscak, J. D. Noll and J. P. Rider, "Key components for an effective filtration and pressurization system for mobile mining equipment," *Mining Engineering*, vol. 66, 2014.
- [27] J. A. Organiscak and A. B. Cecala, "Key design factors of enclosed cab dust filtration systems. Report of Investigation 9677," *National Institute for Occupational Safety and Health*, 2008.