

03-029

IMPLEMENTATION OF DFA-SPDP DESIGN FOR ASSEMBLY METHODOLOGY IN AN ACADEMIC CASE STUDY IN MONDRAGON UNIBERTSITATEA

Ezpeleta Lascurain, Iñigo ⁽¹⁾; *Justel Lozano, Daniel* ⁽¹⁾; *Bereau Mutuberria, Unai* ⁽¹⁾;
Zulaika Munain, Izaro ⁽²⁾; *Isasa Gabilondo, Inge* ⁽²⁾

⁽¹⁾ Mondragon Unibertsitatea, ⁽²⁾ Orona S.coop.

Design for assembly methodologies (DFA) help designers to consider a product's assembly process from the initial stages of design. The most widespread DFA methodologies (Boothroyd-Dewhurst, Hitachi Assemblability method, Lucas) do not consider the first three phases of product development (specifications, conceptual design, and detailed design) while a new methodology called DFA-SPDP does.

This article aims to advance in the validation of the DFA-SPDP methodology as a methodology that considers the three phases of product development and to infer the contributions that this methodology makes with respect to a generic design methodology. For this purpose, the DFA-SPDP methodology is implemented in an academic case study, the transmission of a ball collection machine. Thus, a student from Mondragon Unibertsitatea in his bachelor thesis applies DFA-SPDP methodology in the transmission design and compares its results with the design that a group of students made by applying a generic design process without considering the assembly in a specific way. The comparison of the results shows that the DFA-SPDP methodology improves the assembly time by 40%. In addition, the characteristics of the design developed through this methodology promote the criteria of Circular Economy.

Keywords: DFA methodologies; assembly time; product development; product design; circular economy

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA MONTAJE DFA-SPDP EN UN CASO DE ESTUDIO ACADÉMICO EN MONDRAGÓN UNIBERTSITATEA

Las metodologías de diseño para el montaje DFA ayudan a los diseñadores a considerar el proceso de montaje de un producto desde las fases iniciales del diseño. Las metodologías DFA más extendidas (Boothroyd-Dewhurst, Hitachi Assemblability method, Lucas) no consideran las tres primeras fases de desarrollo de un producto (especificaciones, diseño conceptual y diseño en detalle) mientras que una nueva metodología denominada DFA-SPDP sí las considera. Esta comunicación tiene como objetivo avanzar en la validación de la metodología DFA-SPDP como metodología que considera las tres fases de desarrollo de producto e inferir las aportaciones que realiza esta metodología respecto a una metodología genérica de diseño. Para ello, se implementa en un caso de estudio académico, la transmisión de una máquina recoge-pelotas. Así, un alumno de Trabajo Fin De Grado de Mondragón Unibertsitatea aplica la metodología DFA-SPDP en el diseño y compara sus resultados con el diseño que un grupo de alumnos de la misma universidad realizó aplicando un proceso genérico sin considerar el montaje de manera específica. La comparación de los resultados muestra que mediante la metodología DFA-SPDP se mejora en un 40% el tiempo de montaje. Además, las características del diseño desarrollado mediante esta metodología impulsan los criterios de Economía Circular.

Palabras clave: metodologías DFA; tiempo de montaje; desarrollo de producto; diseño de producto; economía circular

Correspondencia: Iñigo Ezpeleta Lascurain iezpeleta@mondragon.edu



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Las metodologías de diseño para el montaje (DFA) ayudan a los diseñadores a considerar el proceso de montaje de un producto desde las fases iniciales del diseño. En las últimas tres décadas, las metodologías DFA han resultado clave en la reducción de componentes de un artefacto y en la reducción de tiempos de desarrollo y montaje (Favi, Germani, & Marconi, 2017; Khalqih, Rahayu, & Rendra, 2017). En vista de que las tareas de montaje representan el 50% del tiempo total de producción y el 20% del coste de producción de una unidad (Lotter, 1989; Nof, Wilhelm, & Warnecke, 1997), las organizaciones industriales han tratado de reducir estos porcentajes mediante la implementación de las metodologías DFA en sus productos. Por ello, los últimos años algunos autores han tratado de mejorar las metodologías DFA de forma que estas se implementen desde la fase de diseño conceptual de un producto (Cabello Ulloa et al., 2018; Dochibhatla, Bhattacharya, & Morkos, 2017). Las metodologías DFA mediante su enfoque también permiten apoyar la Economía circular (EC), el cual se define como un sistema regenerativo en el que la entrada de recursos y el desperdicio, la emisión y la fuga de energía se minimizan (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Jan Hultink, 2017). El apoyo de las metodologías DFA a la EC queda reflejado con las aportaciones que realizan para cumplir con las estrategias relativas a la EC identificadas por Bocken et al. (2016): optimizar recursos (mediante la reducción de piezas, materias primas y tiempos de montaje), alargar la vida útil (facilitando el mantenimiento) y cerrar ciclos (mediante la reducción de residuos). Las metodologías DFA más extendidas y mejor documentadas (Boothroyd-Dewhurst, Hitachi Assemblability method, Lucas) no consideran las tres primeras fases de desarrollo en el ciclo de vida de un producto (especificaciones, diseño conceptual y diseño en detalle) mientras que una nueva metodología denominada DFA-SPDP (Design For Assembly–Supporting Product Development Phases) sí las considera (Ezpeleta et al., 2019a).

2. Objetivos

El objetivo principal de esta comunicación es avanzar en la validación de la metodología DFA-SPDP e inferir las aportaciones que realiza esta metodología DFA-SPDP respecto a una metodología genérica de diseño. Para ello, alumnos del grado en ingeniería mecánica de Mondragón Unibertsitatea (MU) implementan ambas metodologías en un caso de estudio académico.

2.1 Planificación

Esta comunicación está organizada de la siguiente manera. En primer lugar, se muestran los materiales y métodos empleados. Dentro de este apartado también se describen las fases que se deben seguir durante la implementación de la metodología DFA-SPDP. En segundo lugar, se muestran los resultados. En este apartado, primeramente, se presenta el caso de estudio, la transmisión de una máquina recoge-pelotas. Posteriormente, se muestra el diseño realizado por un grupo de alumnos de tercer curso de grado en ingeniería mecánica de MU empleando un proceso genérico de diseño. Seguidamente, dentro del mismo apartado, se presenta el diseño desarrollado por un alumno durante el Trabajo Fin de Grado (TFG) empleando la metodología DFA-SPDP y se concluye comparando ambos diseños. Finalmente, en el último apartado se recoge la discusión junto con las conclusiones y se exponen las líneas futuras de investigación.

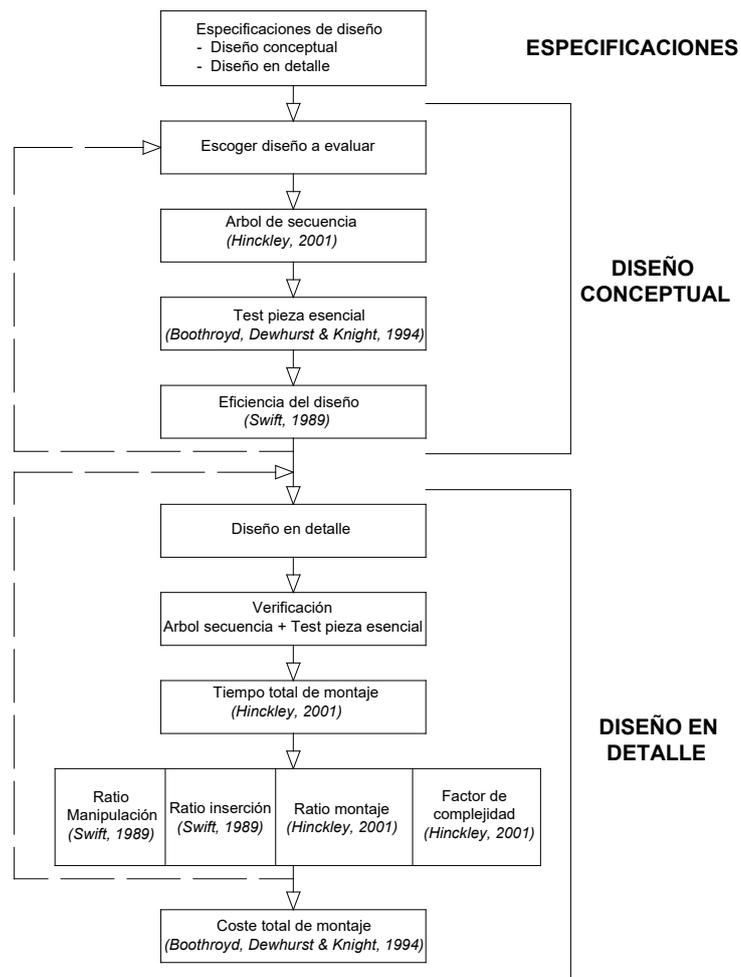
3. Materiales y Métodos

Este estudio ha sido realizado en un entorno académico con la participación de alumnos de grado en ingeniería mecánica de MU. En el estudio, un alumno de TFG ha implementado la metodología de diseño para el montaje DFA-SPDP desarrollado por Ezpeleta et al. (2019a). Se trata de una metodología que considera el proceso de montaje de un producto durante todo el proceso de diseño del mismo y está basada en tres metodologías DFA: i) Boothroyd-Dewhurst (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 1994), ii) Lucas (Swift, 1989) y iii) Modified Westinghouse (Hinckley, 2001). La metodología DFA-SPDP se construye tomando la metodología Modified Westinghouse como columna vertebral y añadiendo aspectos particulares de las metodologías de Lucas y Boothroyd-Dewhurst. Para agilizar la implementación de la metodología, se han empleado dos softwares. El software Solidworks, de diseño para computadora (CAD) 3D para modelar las piezas, y el software Microsoft Excel para realizar los cálculos.

3.1 Metodología DFA-SPDP

La metodología DFA-SPDP al igual que el proceso de diseño de un producto, se divide en tres fases durante su implementación (Figura 1): fase de especificaciones, fase de diseño conceptual y fase de diseño en detalle.

Figura 1: Esquema metodología DFA-SPD (traducido de Ezpeleta et al., 2019a)



3.2 Fase 1: Especificaciones

En esta fase de la metodología DFA-SPDP se definen los valores de siete especificaciones de montaje (Ezpeleta et al., 2019a), uno para la fase de diseño conceptual y seis para la fase de diseño en detalle (Tabla 1).

Tabla 1: Especificaciones de montaje (traducido de Ezpeleta et al., 2019a)

Fase	Especificaciones	Valor
Diseño conceptual	Eficiencia del diseño (D_E)	>60%
	Ratio de manipulación (H_R)	<2,5
Diseño en detalle	Ratio de inserción (I_R)	<2,5
	Tiempo total de montaje (TAT)	...segundos
	Factor de complejidad (C_F)	...segundos
	Ratio de montabilidad (A_R)	50%-100%
	Coste total de montaje (C_T)	...€

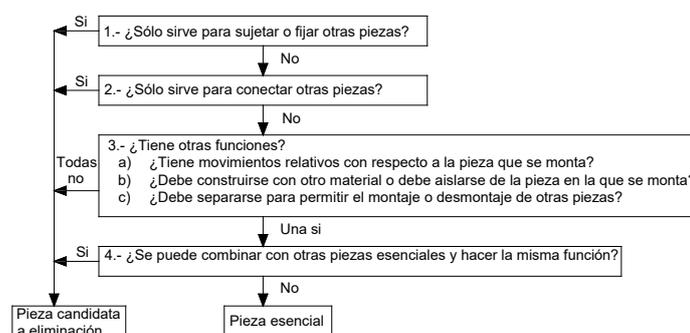
3.3 Fase 2: Diseño Conceptual

En esta fase se analiza el diseño conceptual desde la perspectiva de montaje. Para ello, se realizan los siguientes cuatro pasos (Ezpeleta et al., 2019a):

1. Listar los componentes en orden de montaje, indicando la cantidad de componentes iguales.
2. Representar el árbol de secuencia de montaje según los símbolos definidos en la metodología DFA-SPDP, las cuales se basan en la metodología Modified Westinghouse (Hinckley, 2001).
3. Clasificar los componentes en esenciales (A) y no esenciales (B) en base al test de pieza de la Figura 2. La cual se basa en el test de Boothroyd, Dewhurst y Knight (1994).
4. Calcular la eficiencia del diseño (D_E) empleando la ecuación 1 de la metodología Lucas (Swift, 1989)

$$D_E = 100 \times \frac{A}{A + B} \quad (1)$$

Figura 2: Test de pieza (traducido de Ezpeleta et al., 2019a)



Si el valor de la eficiencia del diseño (D_E) es inferior al definido en la fase de especificaciones se debe realizar un rediseño. En el rediseño se reducen los componentes no esenciales (B) mediante la combinación de varios componentes o funciones.

3.4 Fase 3: Diseño en detalle

En esta fase, a partir del diseño en detalle se analiza el montaje con los siguientes pasos (Ezpeleta et al., 2019a):

1. Verificar que la secuencia de montaje y el test de pieza de la fase 2 no han variado.
2. Calcular el tiempo de manipulación (T_H) de cada componente considerando las tablas de penalización de la metodología DFA-SPDP (Anexo 1), las cuales se basan en la metodología Modified Westinghouse (Hinckley, 2001) .
3. Calcular el tiempo de inserción (T_I) de cada componente considerando las tablas de penalización de la metodología DFA-SPDP (Anexo 1), las cuales se basan en la metodología Modified Westinghouse (Hinckley, 2001).
4. Calcular el tiempo total de montaje (TAT) empleando la ecuación 2 (Hinckley, 2001).

$$TAT = \sum T_H + \sum T_I \quad (2)$$

5. Calcular el ratio de manipulación (H_R) empleando la ecuación 3 (Swift, 1989).

$$H_R = \frac{\sum T_H}{NUP} \quad (3)$$

Donde la variable NUP indica el número de piezas esenciales (A) no repetidas.

6. Calcular el ratio de inserción (I_R) del diseño empleando la ecuación 4 (Swift, 1989).

$$I_R = \frac{\sum T_I}{NUP} \quad (4)$$

7. Calcular la calidad del diseño mediante el ratio de montaje (A_R) empleando la ecuación 5 (Hinckley, 2001).

$$A_R = 100 \times \frac{2,35 \times A}{TAT} \quad (5)$$

8. Calcular el factor de complejidad (C_F) de la montabilidad del diseño empleando la ecuación 6 (Hinckley, 2001) .

$$C_F = TAT - 2,35 \times (A + B) \quad (6)$$

9. Si los ratios calculados no alcanzan los valores de las especificaciones definidas en la fase 1, se deberá rediseñar el producto hasta cumplir las especificaciones deseadas.

10. Finalmente, se calculan el coste de montaje por componente (C_C) mediante la ecuación 7 y el coste total de montaje (C_T) mediante la ecuación 8, las cuales se basan en Boothroyd, Dewhurst y Knight (1994).

$$C_C = \text{Tasa horaria} \times (T_H + T_I) \quad (7)$$

$$C_T = \sum C_C \quad (8)$$

Todos los cálculos se realizan mediante una plantilla de evaluación.

4. Resultados

En este apartado se exponen el caso de estudio académico seleccionado para la implementación de la metodología DFA-SPDP y los resultados obtenidos.

4.1 Caso de estudio académico

Para seguir dando pasos en la validación de la metodología DFA-SPDP, el caso de estudio académico seleccionado ha sido la transmisión de una máquina recoge-pelotas. Para llevar a cabo la validación se han calculado y comparado los valores de las especificaciones de montaje de la fase 1 (Tabla 1) obtenidos en dos diseños diferentes de la transmisión de la máquina recoge-pelotas. Por un lado, se han calculado los valores de las especificaciones propuestas por la metodología DFA-SPDP en el diseño final realizado por un grupo de cinco estudiantes de tercero de grado en ingeniería mecánica, en la asignatura proyecto de curso, empleando una metodología genérica de diseño. Por otro lado, un alumno de TFG ha implementado la metodología DFA-SPDP en el diseño de la transmisión (considerando las mismas especificaciones técnicas que el grupo) y, así, ha calculado los valores de las especificaciones.

El diseño de la transmisión de la máquina recoge-pelotas realizado por el grupo, es parte de un proyecto más amplio donde el grupo debía diseñar y fabricar un robot autónomo capaz de recoger, almacenar y distinguir distintos tamaños de pelotas bajo unas especificaciones dadas (Tabla 2). De cara a la validación de la metodología DFA-SPDP se ha considerado únicamente el subconjunto transmisión puesto que es el que mayor complejidad técnica presenta desde el punto de vista mecánico.

El proyecto de curso tiene como objetivo hacer ver a los alumnos la relación existente entre todos los contenidos que se imparten durante el curso a través de un caso real. Para llevar a cabo el proyecto, los alumnos emplean la metodología de resolución de proyectos POPBL (Project Oriented and Problem Based Learning) (Lehmann et al., 2008), impulsada por MU desde el primer curso de grado. Aunque el proyecto se realiza durante todo el año escolar, tras el primer semestre algunos alumnos deciden compaginar sus estudios con la opción de alternancia estudio-trabajo, a estos alumnos se les convalida parte del proyecto y son agrupados en nuevos grupos de trabajo. Por esta razón, finalmente este proyecto fue desarrollado en su totalidad por veinte alumnos distribuidos en cuatro grupos.

Las limitaciones en las especificaciones de fabricación se deben a que, al tratarse de un caso académico, se quiere que los alumnos sean los que fabriquen la mayoría de las piezas que diseñan y que además el montaje del producto sea una labor que recaiga enteramente sobre ellos. Al no ser expertos en el manejo de máquinas por arranque de viruta (torno, fresadora, etc.) únicamente se les permite diseñar dos piezas que requieran de estas máquinas, que posteriormente serán fabricados por un técnico de taller. Por la misma razón, se limita a dos el número de piezas a fabricar por impresión 3D. El resto de las piezas

deberán ser fabricados por los propios alumnos empleando diferentes procesos manuales de fabricación: doblado, aserrado, taladrado, limado, escariado, remachado etc.

Tabla 2: Especificaciones para la máquina recoge-pelotas

Especificaciones generales	
Debe ser capaz de recoger y almacenar como mínimo 6 pelotas de diámetro 45±5 mm.	
Deber ser capaz de descartar las pelotas que difieran del tamaño establecido.	
Debe ser capaz de identificar y recoger autónomamente las pelotas.	
Debe disponer de sistemas de seguridad que impidan la colisión con los elementos circundantes.	
Debe funcionar de forma inalámbrica desde el punto de vista de control y alimentación.	
El coste de la máquina deber ser inferior a 1.000 €.	
Debe ser capaz de volver a una posición dada en los siguientes escenarios:	
<ul style="list-style-type: none"> - Cuando el almacén de pelotas esté lleno. - Cuando la carga de la batería es baja. - Cuando la máquina no encuentra ninguna pelota tras un periodo de tiempo definido. 	
No debe superar en peso los 25 kg. ni en dimensiones un área de 500 x 500 mm (altura libre).	
Especificaciones de fabricación	
Número máximo de piezas a mecanizar en torno o fresadora	2
Espesores de chapa C45 que pueden ser cortados por laser	1 ó 2 mm
Espesores de chapa de aluminio que pueden ser cortados por laser	2, 3 ó 5 mm
Tamaño máximo de pieza imprimible por impresión en 3D en PLA (1 pieza)	160x160 mm
Tamaño máximo de pieza imprimible por impresión en 3D en AISI 316L (1 pieza)	80x80x80 mm
Distribuidores de elementos comerciales predefinidos	
Dimensiones de perfiles y barras de acero C45 - F1140 predefinidos	
Dimensiones de pletinas, cuadradillos, barras, tubos circulares, tubos cuadrados y escuadras de aluminio 6082-T6 predefinidos	
Espesores de planchas de aluminio	2, 3, 5 mm

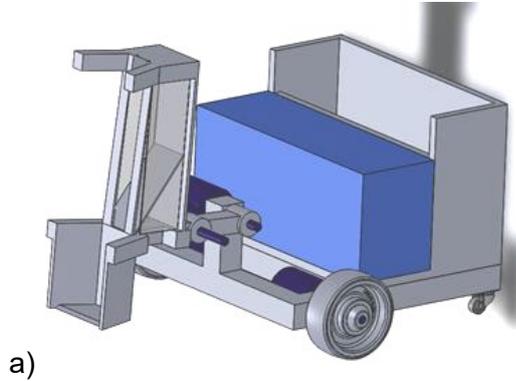
Los materiales y formatos disponibles también están limitados de cara a facilitar la gestión de compra de los mismos al profesorado responsable de tutorizar el proyecto. La cantidad de material disponible en cambio no está limitada, de forma que el alumnado pueda hacer uso de los materiales según sus necesidades, fabricando todas aquellas piezas que consideren necesarias para el diseño.

4.2 Diseño de la transmisión mediante metodología genérica

Con las especificaciones definidas en la Tabla 2 el grupo desarrolla el diseño conceptual de la máquina recoge-pelotas representada en la Figura 3a. Para ello, dentro de la metodología de resolución de proyectos POPBL emplean una metodología genérica de diseño. Tomando como base dicho diseño conceptual, el mismo grupo de alumnos desarrolla, fabrica y monta el diseño final (Figura 3b) realizando además los cálculos necesarios para su correcto funcionamiento: selección de motores, cálculos de resistencia de materiales de las partes críticas, análisis dinámicos de los mecanismos, ventilación de los elementos de control, etc.

La metodología genérica no considera especificaciones relativas a la eficiencia del diseño, ni a aspectos de montaje. Consecuentemente, la metodología no orienta al estudiante a la optimización de estas características en su diseño ni a una reflexión sobre el propio diseño.

Figura 3: a) Diseño conceptual recoge-pelotas



b) Diseño final recoge-pelotas



De cara a comprobar la validez de la metodología DFA-SPDP, la fase 3 de dicha metodología se implementa sobre el subconjunto transmisión de la máquina recoge-pelotas diseñada por el grupo. En la Figura 4a se muestra la plantilla de evaluación empleada para facilitar y agilizar la implementación de la metodología y en la Figura 4b los resultados obtenidos.

Figura 4: a) Plantilla de evaluación b) Resultados implementación de DFA-SPDP

nº	Components		Type of part			Part penalties		Tc	Cc
	Designation	Quantity	A		B	Handling	Insertion		
			x 1	x Q	x Q				
1	Placa vertical	1	0	0	1	1,25	9	10,25	0,09 €
2	Motor	1	1	1	0	2	7	9	0,08 €
3	Polea pequeña	1	1	1	0	1,25	7	8,25	0,07 €
4	Placa horizontal	1	0	0	1	2	8,2	10,2	0,09 €
5	Polea grande	1	1	1	0	1,25	7	8,25	0,07 €
6	Eje	1	1	1	0	0,5	5,5	6	0,05 €
7	Cojinete	2	1	2	0	2,5	12,4	14,9	0,13 €
8	Arandela seeger	2	0	0	2	4,4	14,8	19,2	0,17 €
9	Rueda	1	1	1	0	0,5	7	7,5	0,07 €
10	Acople rueda	1	0	0	1	1,25	7	8,25	0,07 €
11	Correa	1	1	1	0	0,5	9,6	10,1	0,09 €
12	Remache	9	0	0	9	11,25	89,1	100,35	0,89 €
13	Tornillo DIN 912 M5x45	6	0	0	6	7,5	47,4	54,9	0,48 €
14	Tuerca hexagonal ISO 4035 M5	6	0	0	6	3	39,9	42,9	0,38 €
15	Tornillo DIN 912 M6x30	3	0	0	3	3,75	23,7	27,45	0,24 €
16	Tornillo DIN 912 M3x20	1	0	0	1	1,25	8,2	9,45	0,08 €
17	Tuerca hexagonal ISO 4035 M3	2	0	0	2	1	13,3	14,3	0,13 €
18	Tornillo DIN 912 M3x42	1	0	0	1	1,25	8,2	9,45	0,08 €
19	Tornillo DIN 912 M5x20	4	0	0	4	5	28,4	33,4	0,30 €
20	Tuerca hexagonal ISO 4035 M5	4	0	0	4	2	29	31	0,27 €
21	Tornillo prisionero	1	0	0	1	1,35	8,2	9,55	0,08 €
		50	7	8	42	54,75	389,9	444,65	3,93 €
		N	ΣNUP	ΣA	ΣB	ΣH	ΣI	TAT	Ca

a)

ESPECIFICACIONES	VALORES
Tiempo de montaje (TAT)	444,65 s
Eficiencia del diseño (D _e)	16%
Ratio de manipulación (H _r)	7,82
Ratio de inserción (I _r)	55,7
Ratio de montabilidad (H _m)	4,23%
Factor de complejidad (C _r)	327,15 s

b)

4.3 Diseño de la transmisión mediante la metodología DFA-SPDP

La transmisión de la máquina recoge-pelotas diseñada por el alumno de TFG, a diferencia del caso descrito en el apartado 4.1 se realiza empleando la metodología DFA-SPDP. Durante el diseño se consideran las mismas especificaciones empleadas por el grupo de estudiantes (Tabla 2). A continuación, se describen las tres fases de la metodología DFA-SPDP seguidas por el alumno de TFG.

Fase 1: Especificaciones

En esta fase el alumno define los valores que se desean lograr para cada una de las especificaciones de la metodología DFA-SPDP. Al tratarse de un producto nuevo del cual no se dispone información previa sobre las especificaciones de la metodología, únicamente se definen cuatro de las siete especificaciones (Tabla 3). No se definen el tiempo total de montaje (TAT), el factor de complejidad (C_F) y tampoco el coste total de montaje (C_T).

Tabla 3: Valores objetivo a alcanzar

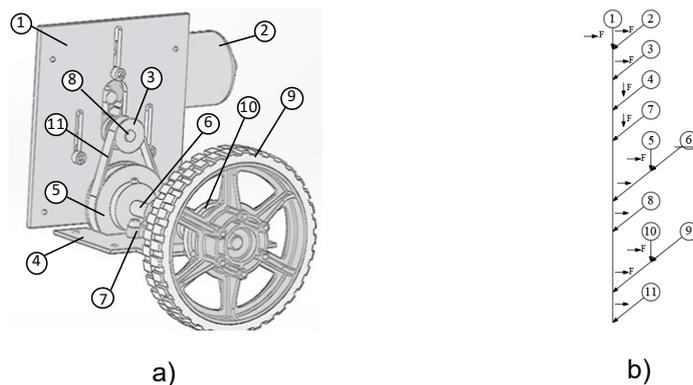
Especificaciones	Valor
Eficiencia del diseño (D_E)	60%
Ratio de manipulación (H_R)	<2,5
Ratio de inserción (I_R)	<2,5
Ratio de montabilidad (A_R)	70%

Fase 2: Diseño Conceptual

En la fase 2, el alumno primeramente desarrolla el diseño conceptual (Figura 5a) de la transmisión. Posteriormente, realiza el árbol de secuencia de montaje del diseño. Del análisis del árbol (Figura 5b) se concluye que el montaje de la transmisión es lineal puesto que únicamente se observa una ramificación y porque el montaje se realiza partiendo únicamente de la pieza 1. Consecuentemente, no es posible realizar un montaje en paralelo de las diferentes piezas que permita reducir el plazo de montaje del conjunto.

A continuación, el alumno aplica el test de pieza descrito en la Figura 2 sobre el diseño conceptual. De esta forma, ocho piezas se clasifican como esenciales (A) y cuarenta y una como no esenciales (B). El posterior cálculo da como resultado una eficiencia del diseño (D_E) del 16,3%. Al ser el resultado menor al definido en fase 1, realiza un rediseño del conjunto.

Figura 5: a) Diseño conceptual b) Árbol de secuencia de montaje



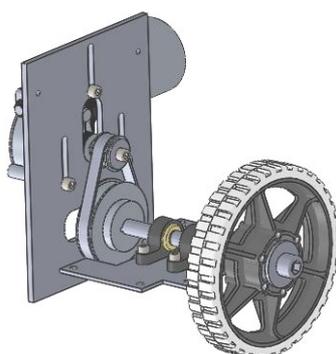
En el rediseño, el alumno considera las propuestas de mejoras realizadas por tres fuentes: Andreasen, Kähler y Lund (1983), Scarr, Jackson y McMaster (1986) y Bralla (1999). Así, realiza modificaciones en el eje, en el acoplamiento y en la rueda logrando de esta forma reducir el número de piezas no esenciales (B) a treinta. Con estas modificaciones consigue elevar la eficiencia del diseño al 23,08 %. El resultado sigue siendo inferior al marcado como objetivo en la fase 1. En este punto, el alumno considera que no es posible mejorar el valor de la eficiencia, puesto que tal y como se ha indicado, al tratarse de un caso de estudio

académico existen restricciones de diseño. Tanto los formatos de partida de los materiales como los procesos de fabricación permitidos limitan los diseños de las piezas, dificultando la agrupación de piezas con diferentes funciones en una sola pieza. Por ello, el alumno da por válido el diseño conceptual (Figura 5a) y continua con la implementación de la siguiente fase.

Fase 3: Diseño en detalle

En esta fase el alumno realiza el diseño en detalle de la transmisión (Figura 6) tomando como base el diseño conceptual de la fase 2. Después, verifica que tanto la secuencia de montaje como el número de piezas esenciales no varían.

Figura 6: Diseño en detalle



Posteriormente, empleando las tablas de penalización de la metodología DFA-SPDP (Anexo 1) realiza el análisis individualizado de cada pieza correspondiente a la manipulación y la inserción. Así, sumando dichas penalizaciones obtiene los tiempos de inserción (T_i) y los tiempos de manipulación (T_H) de todas las piezas.

Tomando como base estos tiempos, mediante la plantilla de evaluación de la Figura 7a (en la cual están implementadas las ecuaciones del apartado 3.3) calcula los valores de las especificaciones reflejadas en la Figura 7b.

Figura 7: a) Plantilla de evaluación

nº	Components Designation	Quantity	Type of part		Part penalties		Tc	Cc	
			A		B	Handling			Insertion
			x 1	x Q	x Q				
1	Placa vertical	1	0	0	1	1.25	9	10.25	0.09
2	Motor	1	1	1	0	2	7	9	0.08
3	Polea pequeña	1	1	1	0	1.25	7	8.25	0.07
4	Placa horizontal	1	0	0	1	2	8.2	10.2	0.09
5	Polea grande	1	1	1	0	1.25	7	8.25	0.07
6	Eje-acople	1	1	1	0	1.25	3	4.25	0.04
7	Cojinete	2	1	2	0	2.5	12.4	14.9	0.13
8	Arandela seeger	2	0	0	2	4.4	14.8	19.2	0.17
9	Rueda	1	1	1	0	0.5	7	7.5	0.07
11	Correa	1	1	1	0	0.5	9.6	10.1	0.09
12	Remache	9	0	0	9	11.25	89.1	100.35	0.89
13	Chaveta	1	1	1	0	0.5	2.5	3	0.03
15	Tornillo DIN 912 M6x30	3	0	0	3	3.75	23.7	27.45	0.24
16	Tornillo DIN 912 M3x20	1	0	0	1	1.25	8.2	9.45	0.08
17	Tuerca hexagonal ISO 4035 M3	2	0	0	2	1	13.3	14.3	0.13
18	Tornillo DIN 912 M3x42	1	0	0	1	1.25	8.2	9.45	0.08
19	Tornillo DIN 912 M5x20	4	0	0	4	5	28.4	33.4	0.30
20	Tuerca hexagonal ISO 4035 M5	4	0	0	4	2	29	31	0.27
21	Tornillo DIN 912 M12x30	1	0	0	1	1.25	7.9	9.15	0.08
22	Arandela DIN 9021 M12	1	0	0	1	0.5	3	3.5	0.03
		39	8	9	30	44.65	298.3	342.95	3.03
		N	ΣNUP	ΣA	ΣB	ΣH	ΣI	TAT	Ca

a)

b) Resultado de las especificaciones

ESPECIFICACIONES	VALOR OBJETIVO	RESULTADOS
Tiempo de montaje (TAT)	---	342,95 s
Eficiencia del diseño (D_E)	60 %	23,08 %
Ratio de manipulación (H_R)	< 2,5	5,58
Ratio de inserción (I_R)	< 2,5	37,28
Ratio de montabilidad (A_R)	70 %	6,16 %
Factor de complejidad (C_i)	---	251,30

b)

A pesar de que los valores resultantes de las especificaciones no alcanzan los objetivos marcados en la fase 1, es importante remarcar que estas especificaciones iniciales obligan al alumno a centrarse en la mejora del diseño desde el punto de vista del montaje. De esta forma, en esta fase de la implementación y aun no siendo el diseño en detalle definitivo, se consiguen mejorar los valores de todas las especificaciones respecto al diseño de la Figura 4a realizado por el grupo de estudiantes (los cuales no disponen de estas especificaciones).

El alumno prosigue con la implementación de la metodología y comienza un proceso de reflexión de cara a mejorar y alcanzar los valores de las especificaciones de manipulación, inserción, montabilidad y complejidad mediante un rediseño de la transmisión. Para ello, considera las propuestas de mejora de las 3 fuentes empleadas en el diseño conceptual y otras dos: Sturges (1989) y Boothroyd, Dewhurst y Knight (1994).

Tras el análisis de las propuestas de mejora, concluye que existen dos partes con potencial de mejora para la inserción y la manipulación: i) la unión entre polea y eje y ii) placa vertical. Así, en el rediseño se centra en estas dos partes reduciendo el número de remaches, mejorando el acceso para la inserción de tornillos y modificando el diseño de la placa vertical. De esta forma, el alumno plantea el rediseño de la transmisión en detalle y actualiza la plantilla de evaluación editando las penalizaciones de las piezas rediseñadas según el Anexo 1.

En la Tabla 4 se recogen los resultados de las especificaciones tras el rediseño y la mejora respecto de las especificaciones del diseño inicial (Figura 6). La comparativa muestra que todas las especificaciones mejoran incluidas la eficiencia del diseño y el tiempo de montaje.

Tabla 4: Comparativa de los resultados de las especificaciones en DFA-SPDP

ESPECIFICACIONES	VALOR OBJETIVO	RESULTADOS		MEJORA
		Primer diseño	Rediseño	
Tiempo de montaje (TAT)	----	342,95 s	264,65 s	78,3 s
Eficiencia del diseño (D_E)	60 %	23,08 %	28,21 %	5,13 %
Ratio de manipulación (H_R)	< 2,5	5,58	4,53	1,05
Ratio de inserción (I_R)	< 2,5	37,28	24,88	12,4
Ratio de montabilidad (A_R)	70 %	6,16 %	9,77 %	3,61 %
Factor de complejidad (C_i)	----	251,30	173	78,3

A pesar de la mejora experimentada por las especificaciones tras el rediseño, los valores siguen siendo inferiores a los establecidos en la Tabla 3. Llegados a este punto y conocidas las limitaciones del diseño debidas al caso académico, el alumno decide no realizar un nuevo rediseño para tratar de mejorar los valores de las especificaciones. Por ello, da por válidos tanto el rediseño como los valores de las especificaciones.

4.4 Comparativa de los resultados de las metodologías

Una vez calculadas las especificaciones de los diseños realizados con ambas metodologías, estas se han recogido y comparado en la Tabla 5.

Tabla 5: Comparativa de los resultados de la metodología genérica y DFA-SPDP

Especificaciones	Met. Genérica	Met. DFA-SPDP		Mejora	% Mejora
		Objetivo	Resultado		
Tiempo montaje (TAT)	444,65 s	----	264,65 s	180 s	40,48 %
Eficiencia del diseño (De)	16 %	60 %	28,21 %	12,21 %	43,28 %
Ratio de manipulación (Hr)	7,82	< 2,5	4,53	3,29	42,07 %
Ratio de inserción (Ir)	55,7	< 2,5	24,88	30,82	55,33 %
Ratio de montabilidad (Ar)	4,23 %	70 %	9,77 %	5,54 %	56,70 %
Factor de complejidad (Cf)	327,15	----	173	154,15	47,12 %

El análisis de la Tabla 5 refleja una mejora en todos los valores de las especificaciones tras la implementación de la metodología DFA-SPDP a pesar de no llegar a alcanzar los valores fijados al inicio. En general la mejora es superior al 40%, siendo la montabilidad la que más mejora con un 56,70 % y el tiempo de montaje la que menos mejora con un 40,48 %. El diseño de la metodología DFA-SPDP consigue una reducción de 11 piezas respecto al diseño desarrollado con la metodología genérica. Siendo la reducción del número de piezas o componentes uno de los aspectos clave citados por Ezpeleta et al. (2019b) de cara a favorecer la EC por parte de la empresa. Además, la reducción de componentes permite la consecución de otros cuatro aspectos citados en el mismo estudio de cara a favorecer la EC: disminución de producción de residuos, disminución de consumo de energía, mantenimiento y reducción de consumibles de producción. Por último, se debe tener en cuenta que la máquina recoge-pelotas dispone de dos ruedas de tracción por lo que todas estas mejoras afectan doblemente.

5. Discusión y Conclusiones

En esta comunicación se ha avanzado en la validación de la metodología DFA-SPDP. La comparación de los resultados obtenidos tras la implementación en el caso de estudio académico de las dos metodologías, demuestra su potencial como herramienta para la mejora de la montabilidad desde las fases iniciales de diseño.

Tras la comparación de los resultados obtenidos de ambas metodologías se infiere que al considerar la metodología DFA-SPDP las especificaciones de montaje desde la primera fase del diseño, obliga al alumno a repensar y reflexionar sobre el diseño para alcanzar dichas especificaciones. Lo cual, además de permitir optimizar la montabilidad del producto, permite optimizar el propio diseño del producto y mejorar cinco aspectos que según el estudio de Ezpeleta et al. (2019b) ayudan a considerar la EC, las cuales son: número de piezas, producción de residuos, consumo energético, mantenimiento y consumo de materias primas. La metodología genérica en cambio, al no considerar especificaciones de montaje, no genera en el alumnado dicho proceso de reflexión en torno a cómo mejorar esta característica, centrando al alumnado en la consecución de otros requisitos como el cumplimiento de plazos, funcionamiento, etc. Consecuentemente, tampoco ayuda a mejorar aspectos del diseño que permitan desarrollar productos bajo el modelo de EC. Es decir, se demuestra que el definir la especificación que se desea optimizar desde el comienzo del diseño permite optimizar el diseño bajo esa característica (Chakrabarti, Morgenstern, & Knaab, 2004), y que en el caso de la especificación de montaje también permite mejorar características que impulsen los criterios de la EC.

En este caso de estudio, mediante la metodología DFA-SPDP se han mejorado cinco de las 40 características identificadas por Ezpeleta et al. (2019b) para el desarrollo de productos acorde con el modelo de EC. Además, en su estudio Ezpeleta et al. (2019b) las relacionan con siete departamentos de una organización. Así, se infiere que la metodología DFA-SPDP puede ser adecuada para ser considerada en los siguientes cuatro departamentos: oficina técnica, departamento comercial, fabricación y mantenimiento-servicio post venta.

5.1 Líneas futuras de investigación

Al tratarse de un caso de estudio académico, las especificaciones de fabricación obligan a que la mayoría de las piezas deban ser fabricadas empleando procesos manuales muy concretos y a que los materiales de partida a emplear estén acotados a determinados espesores y perfiles. Estas limitaciones reducen las opciones de rediseño de las piezas al alumno y dificultan el acercarse más a los valores objetivo marcados para las especificaciones. Por ello, sería interesante reconsiderar los valores iniciales de las especificaciones y adecuarlos atendiendo a estas limitaciones. En este sentido, diseñar nuevos productos en un sector conocido para el diseñador senior puede permitir definir valores alcanzables, pero a su vez retadores.

Por otro lado, el hecho de que la implementación de la metodología sea totalmente manual también favorece que el alumnado lleve a cabo un proceso de reflexión durante el desarrollo producto, de forma que favorezca tanto el montaje como los aspectos de la EC. A pesar de ello, la creación de una herramienta informática que agilice el uso de la metodología sin que con ello desaparezca el proceso de reflexión resultaría de ayuda para el alumnado.

Por último, futuros trabajos en otros casos de estudio académicos como en casos de estudio industriales permitirán la validación completa de esta metodología.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la facultad de ingeniería de Mondragon Unibertsitatea, IHOBE (Sociedad Pública de gestión ambiental del Gobierno Vasco) y Orona S.Coop. por financiar este trabajo.

Referencias

- Andreasen, M. M., Kähler, S., & Lund, T. (1983). *Design for Assembly*. IFS and Springer-Verlag.
- Bocken, N. M. P., Pauw, I. de, Bakker, C., & Bram van der Grinten. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (1994). *Product design for manufacture and assembly*. M. Dekker.
- Bralla, J. G. (1999). *Design for Manufacturability Handbook, 2nd edition*. McGraw Hill.
- Cabello Ulloa, M. J., Ramirez Jauregui, A., Zulaika Munain, I., Areitioaurtena Oiartzun, M., Retolaza Ojanguren, I., Campos Insunza, M. A., & Martínez Noguera, F. (2018). New integrative approach to existing design for assembly (DFA) methodologies: Application on elevator components. In *International Design Conference* (pp. 215–224). Dubrovnik.
- Chakrabarti, A., Morgenstern, S., & Knaab, H. (2004). Identification and application of requirements and their impact on the design process: A protocol study. *Research in Engineering Design*, 15(1), 22–39.
- Dochibhatla, S. V. S., Bhattacharya, M., & Morkos, B. (2017). Evaluating Assembly Design

- Efficiency: A Comparison Between Lucas and Boothroyd-Dewhurst Methods. In *International design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference* (p. 20). Ohio: ASME.
- Ezpeleta, I., Justel, D., Bereau, U., & Zubezu, J. (2019a). DFA-SPDP, a new DFA method to improve the assembly during all the product development phases. In *Procedia CIRP* (Vol. 84, pp. 673–679). Elsevier B.V.
- Ezpeleta, I., Justel, D., Zubezu, Z., Bereau, U., & Elizburu, A. (2019b). Identification of key aspects of circular economy for inclusion in life cycle design. In *International Congress on Project Management and Engineering*. Malaga: AEIPRO.
- Favi, C., Germani, M., & Marconi, M. (2017). A 4M approach for a comprehensive analysis and improvement of manual assembly lines. In *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing* (Vol. 11, pp. 1510–1518). Modena: Elsevier.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Jan Hultink, E. (2017). The circular economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143(1), 757–768.
- Hinckley, C. M. (2001). *Make No Mistake!* New York: Productivity Press.
- Khalqih, K. I., Rahayu, M., & Rendra, M. (2017). Design local exhaust ventilation on sieve machine at PT.Perkebunan Nusantara VIII Ciater using design for assembly (DFA) approach with Boothroyd and Dewhurst method Related content Maintenance Process Strategic Analysis Design local exhaust ventilation on. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 277. IOP Publishing.
- Lehmann, M., Christensen, P., Du, X., & Thrane, M. (2008). Problem-oriented and project-based learning (POPBL) as an innovative learning strategy for sustainable development in engineering education. *European Journal of Engineering Education*, 33(3), 283–295.
- Lotter, B. (1989). *Manufacturing assembly handbook*. London: Butterworths.
- Nof, S. Y., Wilhelm, W. E., & Warnecke, H. J. (1997). *Industrial Assembly*. London: Chapman and Hall.
- Scarr, A., Jackson, D., & McMaster, R. (1986). Product design for robotic and automated assembly. In *International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 3, pp. 796–802). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Sturges, R. H. (1989). A quantification of manual dexterity: the design for an assembly calculator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 6(3), 237–252.
- Swift, K. G. (1989). Expert system aids design for assembly. *Assembly Automation*, 9(3), 132–136.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible



Anexo 1 (Adaptado y traducido de Hinckley, 2001)