



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

PROPUESTA DE MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE PROCESOS
DE ENSAMBLE MIXTO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ALAN VALENCIA DOMÍNGUEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Adrián Espinosa Bautista
Secretario: Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez
Vocal: Dr. Jesús Manuel Dorador González
1^{er.} Suplente: Dr. Leopoldo González González
2^{do.} Suplente: Dr. Alejandro Ramírez Reivich

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ

FIRMA

Dedicatoria

A mi familia por apoyarme en todo momento, todos mis logros son por y para ustedes.

Agradecimientos

A la UNAM, por darme la oportunidad de descubrir un mundo de conocimiento.

Al Dr. Jesús Manuel Dorador, por su tiempo, confianza e innumerables lecciones. Sus oportunas observaciones y comentarios siempre me han ayudado a ver cosas que por mí mismo tal vez no habría alcanzado a percibir.

Al M. en I. Francisco Bernal por las facilidades prestadas para la realización de las observaciones de los procesos de ensamble comentados en este trabajo.

Este proyecto se realizó en el marco del proyecto PAPIME PE102915 “Diseño para ensamble y manufactura”.

Pauca sed matura

Carl Friedrich Gauss

Índice

Introducción	iii
Objetivo	iv
Capítulo 1.- Antecedentes y descripción de la metodología DFA	1
1.1.- DFA de Boothroyd y Dewhurst	4
1.1.1.- Metodología para el análisis de ensamblajes manuales	4
Análisis DFA Manual	13
1.1.2.- Metodología para el análisis de ensamblajes automáticos	15
Análisis DFA Automático	28
Capítulo 2.- Evaluación de la eficiencia de ensamble considerando procesos mixtos	29
2.1.- La eficiencia de ensamble en función de sus operaciones principales	29
2.2.- Eficiencia en términos de las piezas individuales	33
2.3.- Eficiencia total como suma de las fracciones de aporte individuales	37
2.4.- Ejemplo de aplicación del análisis DFA Mixto	40
Capítulo 3.- Análisis de la eficiencia de un proceso de ensamble mixto real	42
3.1.- Análisis del proceso de ensamble mixto para la bomba de aceite modelo R1	43
3.1.1.- Descripción de las operaciones de ensamble Bomba R1	43
3.1.2.- Criterios de eliminación o combinación para las piezas de la bomba R1	47
3.2.- Análisis del proceso de ensamble mixto para la bomba de aceite modelo A4	51
3.2.1.- Descripción de las operaciones de ensamble Bomba A4	51
3.2.2.- Criterios de eliminación o combinación para las piezas de la bomba A4	54
3.3.- Conclusiones	58
Apéndice A	60
Apéndice B	62
Bibliografía	64

Introducción

En esta tesis se presenta una propuesta de evaluación de la eficiencia de los procesos de ensamble mixtos, es decir, procesos de ensamble que necesiten de una combinación de operaciones manuales y automáticas para ser llevados a cabo. Las metodologías tradicionales de Diseño para Ensamble se aplican específicamente a operaciones manuales o automáticas, sin considerar que en la industria los procesos de ensamble utilizan una mezcla de ellas.

En este trabajo se decidió utilizar el método de análisis de Diseño para ensamble (Design for Assembly DFA) propuesto por Boothroyd y Dewhurst [1], ya que esta metodología ha demostrado su efectividad en la industria por más de 30 años en el análisis de procesos de ensamble que se realizan en su totalidad mediante operaciones manuales o automáticas. El método de Boothroyd DFA está claramente dividido desde su inicio en procesos de ensamble manuales o automáticos, por lo que no permite la evaluación de procesos mixtos.

La evaluación de la eficiencia de ensamble para los procesos combinados ofrece al diseñador la posibilidad de conocer una aproximación del costo final del proceso de ensamblado desde las primeras etapas del proceso de diseño, además de identificar con claridad las piezas u operaciones de ensamble que puedan resultar conflictivas o poco benéficas, dando la oportunidad de realizar cambios en el diseño antes de pasar a la etapa de producción.

La propuesta expuesta en esta tesis permite combinar los procesos de ensamble manuales y automáticos, tomando como base las tablas de manipulación e inserción propuestas por Boothroyd. Como ejemplo de la aplicación de dicha propuesta se presenta el análisis del proceso de ensamble de dos bombas de aceite fabricadas para Volkswagen y Audi por la empresa Bocar.

En el primer capítulo de este trabajo se presenta una descripción de las metodologías de diseño para ensamble propuestas por Boothroyd para casos en los que el proceso se realiza en su totalidad de forma manual o automática. Se muestran los lineamientos generales para las operaciones de manipulación e inserción así como las tablas del sistema de clasificación para la evaluación de la eficiencia del proceso de ensamble y se presenta un ejemplo de aplicación de las metodologías descritas.

En el capítulo 2 se presentan las combinaciones posibles para los procesos de ensamble mixtos y se exhibe el desarrollo de las ecuaciones para la evaluación de la eficiencia de los procesos de ensamble compuestos de operaciones manuales y automáticas. En este mismo capítulo se da un ejemplo de la aplicación de las ecuaciones propuestas,

Con las ecuaciones propuestas para la evaluación de los procesos de ensamble mixtos se realizó el análisis de dos bombas de aceite fabricadas por la empresa Bocar siguiendo las condiciones reales de su proceso de ensamblado, se identificaron las oportunidades de mejora y se presentan sugerencias de rediseño para mejorar la eficiencia de ensamble de las bombas y disminuir el costo del proceso de ensamble. Los análisis del ensamble de las bombas así como las evaluaciones de las sugerencias de rediseño se

exponen en el capítulo 3. En esta parte de la tesis se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro dentro de esta área de investigación.

Objetivo

El objetivo de esta tesis es desarrollar las ecuaciones necesarias para, basándose en el sistema de clasificación del método DFA de Boothroyd, evaluar la eficiencia de procesos de ensamble que se realizan mediante una combinación de operaciones manuales y automáticas.

Para la ejemplificación del uso de las ecuaciones generadas se presenta un caso de estudio en el cual se evalúa la eficiencia del proceso de ensamble de un producto en sus condiciones reales de ensamblado, para posteriormente identificar las áreas susceptibles de mejora y ofrecer propuestas de rediseño para el producto o el proceso de ensamble. Se presenta la evaluación de las propuestas de rediseño para observar los beneficios de la aplicación de la metodología de DFA.

Capítulo 1.- Antecedentes y descripción de la metodología DFA

El Design for Manufacture and Assembly (DFMA) es un procedimiento sistemático para analizar el diseño desde el punto de vista del ensamble y la manufactura, en la metodología DFMA se utilizan herramientas analíticas que permiten al diseñador estimar el costo de manufactura y ensamble de un producto antes de comenzar la etapa de diseño de detalle y producción [1].

El objetivo de aplicar las metodologías de DFMA es conseguir que el diseño del producto en cuestión sea más fácil de ensamblar y manufacturar, esto con la intención de disminuir los tiempos y costos de producción sin afectar el funcionamiento y la confiabilidad del producto.

De acuerdo a las definiciones ofrecidas por Boothroyd [1, 2] el termino *manufactura* se refiere a la fabricación de los componentes individuales de un producto y *ensamble* se tiene como la adición o unión de las piezas que forman al producto completo.

El DFA es un subconjunto de la metodología de DFMA en el cual se busca la disminución del costo de ensamble [3]. El DFA se basa en la reducción del número de piezas que componen el ensamble de un producto y/o la simplificación de la unión con el resto de las piezas del conjunto, lo que se traduce en reducción de costos debido a factores como: disminución del número de dibujos, especificaciones e información relacionada con cada pieza, costos administrativos de negociación con un menor número de proveedores, menores gastos de almacenamiento debido a la reducción del inventario, menos piezas a manufacturar [1, 4].

De acuerdo al enfoque de la ingeniería concurrente, algunos investigadores hacen énfasis en utilizar las metodologías DFA desde las etapas más tempranas del proceso de diseño [5], ya que realizar un cambio en el diseño en las etapas iniciales tiene un gran impacto en el resultado final con un costo moderado. De acuerdo a Munro [6] y Boothroyd [1] alrededor del 70% del costo final del producto se determina en la etapa de diseño del producto, por eso es de vital importancia considerar al diseño para ensamble como una de las partes esenciales en el desarrollo del producto desde las etapas iniciales.

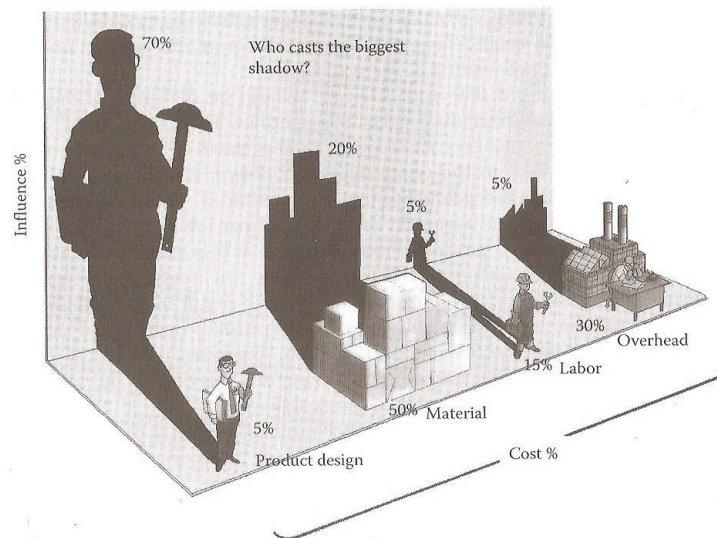


Figura 1.1.- Importancia del diseño en el desarrollo del producto. [6]

Las metodologías de Diseño para Ensamble (DFA) se pueden aplicar a los productos que ya se encuentran en producción o en propuestas de diseño antes de que estas lleguen a la fase de producción, para determinar su facilidad de ensamble y con esta información proponer rediseños tanto en el producto como en los procesos de ensamble [1, 7].

Como ejemplo del uso de los procedimientos del DFA en la Figura 1.2 se muestra el ensamble de un motor, en el cual en el diseño original no se consideró el diseño para ensamble y en el rediseño del motor se muestra el resultado de utilizar dichas metodologías.

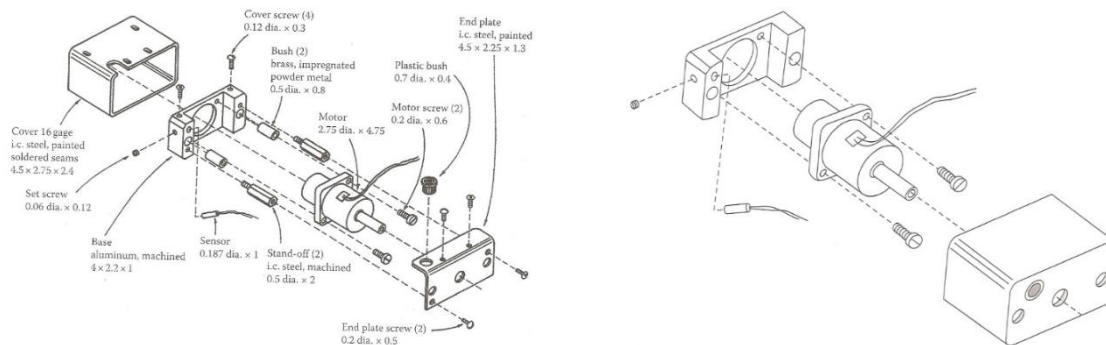


Figura 1.2.- Motor original y motor DFA. [1]

Clasificación de los procesos de ensamble [12]

Los principales métodos para el estudio de los procesos de ensamblado, clasifican los procesos de acuerdo al tipo de operaciones por medio de las cuales se realizan de las cuales se conforman, esto es:

De acuerdo a Swift y Redford [8], el ensamble se divide en:

1. Ensamble manual.
2. Ensamble manual auxiliado mecánicamente (se utilizan alimentadores).

3. Ensamble automático utilizando máquinas indexadoras asíncronas y alimentadores automáticos.
4. Ensamble automático utilizando máquinas indexadoras asíncronas con cabezales programables y magazines de piezas.
5. Ensamble automático con robots y magazines de piezas.

De acuerdo a Boothroyd [1, 2] los sistemas de ensamble se clasifican en:

a) Ensamble manual:

Se utiliza tanto en lotes como en líneas de producción. Las herramientas utilizadas son simples y baratas. Este método tiene una gran flexibilidad y adaptabilidad. Los costos se mantienen constantes y relativamente independientes del volumen de producción.

b) Ensamble por medio de máquinas especializadas para ensamble:

Son las que ensamblan un producto específico. Las piezas se surten por medio de dispositivos de transferencia síncronos (mecanismos indexadores rotatorios o lineales) o asíncronos (bandas transportadoras). Estas máquinas son costosas e involucran una gran cantidad de horas de ingeniería antes de ponerse en funcionamiento. Estas máquinas son para trabajar en ciclos de tiempo fijos y por lo tanto son inflexibles en sus rangos de producción.

Si se tuviera una subutilización, o tiempos libres, no puede ser utilizada en otros procesos.

c) Ensamble por medio de robots:

Los robots son flexibles y se pueden adaptar con relativa facilidad a los cambios de diseño de las piezas. Este tipo de ensambles representa una fuerte inversión inicial.

Existen varias configuraciones:

- Un solo robot de propósito general opera en una sola estación de trabajo.
- Dos robots de propósito general trabajan en conjunto en una sola estación de trabajo.
- Una celda de varias estaciones con robots de propósito general.

Este trabajo se centra en el uso y aplicación de la metodología de Diseño para ensamble (Design for Assembly DFA) propuesta por Boothroyd [1, 9], ya que esta metodología ha demostrado su efectividad en la industria por de más de 30 años. A continuación se da una descripción de los lineamientos principales de la metodología Design for assembly desarrollada por Boothroyd y Dewhurst.

1.1.- DFA de Boothroyd y Dewhurst

Boothroyd y Dewhurst [1, 2, 9] realizaron estudios experimentales para medir el efecto de la simetría, el tamaño, el peso, el espesor y flexibilidad de las piezas de un ensamble sobre el tiempo y costo de manipulación e inserción, para estos estudios se tomó en cuenta factores como el uso de herramientas para la manipulación, las dificultades de acceso y restricciones en la visión durante las operaciones de ensamble.

Como resultado de sus estudios Boothroyd notó que todo proceso de ensamble puede ser dividido en dos áreas separadas

- Manipulación: Tomar, orientar y mover las partes.
- Inserción: Acoplar una parte a otra o a un grupo de partes.

Para la evaluación del proceso de ensamble la metodología DFA se encuentra dividida en: Ensamble Manual y Ensamble Automático, y para cada una de estas divisiones se tienen lineamientos específicos que ayudan a su correcta evaluación, a continuación se muestra la metodología aplicable a los casos de ensamble manual.

1.1.1.- Metodología para el análisis de ensambles manuales

Para cada una de las operaciones principales del proceso de ensamble (manipulación e inserción) se desarrollaron lineamientos generales específicos, estos lineamientos se presentan al diseñador como reglas sencillas para ser seguidas durante el proceso de diseño [1]: Para el proceso manual, se tiene:

Lineamientos para manipulación

1. Diseñar piezas con una simetría de extremo a extremo y simetría rotacional con respecto a su eje de inserción (Figura 1.3 a))
2. Si la pieza no puede ser simétrica, diseñarla claramente asimétrica (Figura 1.3 b)).
3. Dar características que prevengan la interferencia entre piezas que tienden a anidarse o apilarse cuando son almacenadas en volumen (Figura 1.3 c)).
4. Evitar características que permitan que las piezas se enreden cuando se almacenan en volumen (Figura 1.3 d)).
5. Evitar piezas que se peguen entre sí o que sean resbaladizas, delicadas flexibles, muy pequeñas o muy grandes, o peligrosas de manejar (por ejemplo: partes que sean filosas o se astillen con facilidad, etc.) (Figura 1.3 e)).

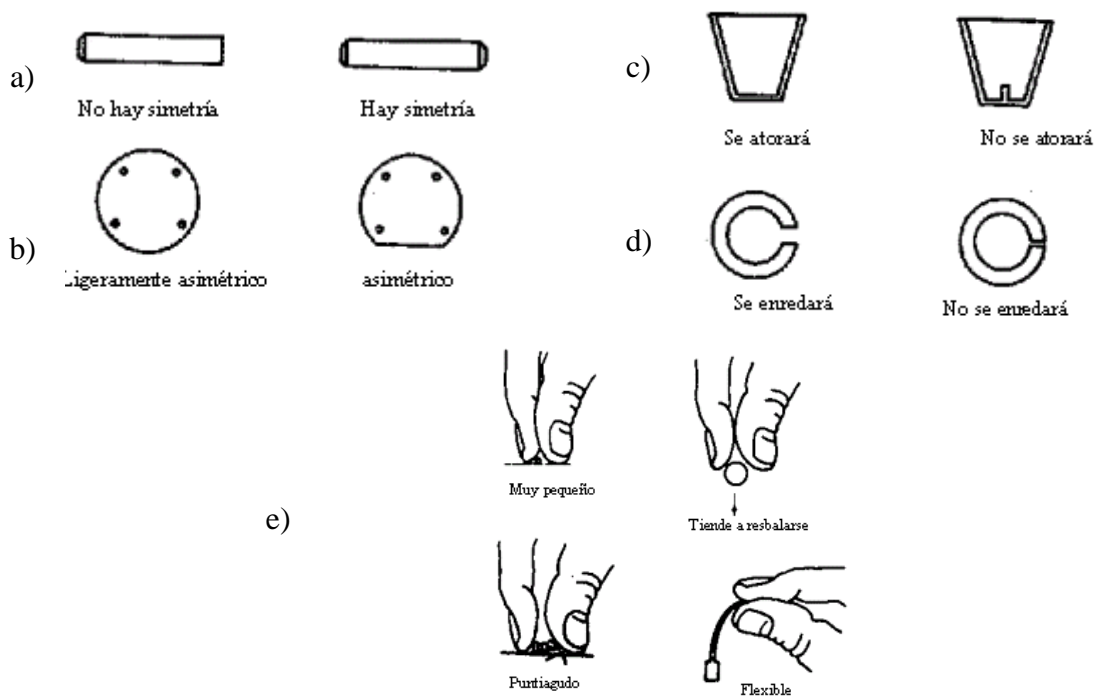


Figura 1.3.- Lineamientos para la manipulación manual [1, 10].

Lineamientos para inserción

1. Diseñar las piezas de modo que haya poca o nula resistencia a la inserción y proporcionar chaflanes para guiar la inserción, (Figura 1.4). Se debe dar la suficiente holgura entre las piezas para que entren en su sitio, cuidando que las piezas no queden sueltas o demasiado justas y se atoren al entrar.

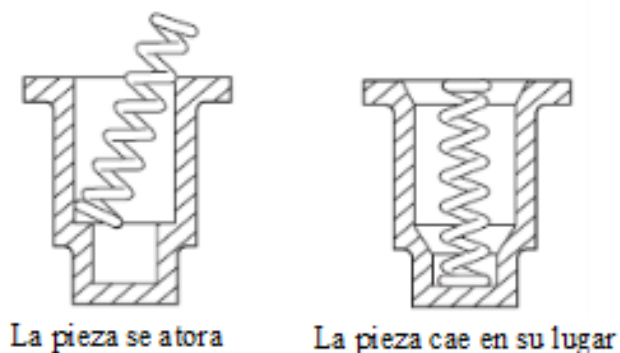


Figura 1.4.- Uso de chaflanes para guiar la inserción. [1, 10]

2. Estandarizar el uso de partes, procesos y métodos en todos los modelos y líneas de producción, esto permite aumentar el volumen de producción y disminuir el costo del producto.
3. Usar el ensamble piramidal, lo cual permite un ensamble progresivo de acuerdo a un eje de referencia, esta es la mejor forma de realizar un ensamble desde arriba (véase Figura 1.5).

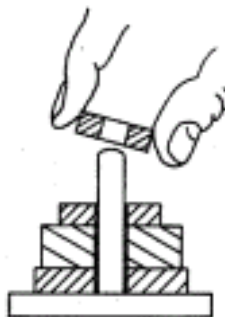
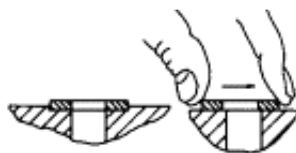


Figura 1.5.- Ensamble piramidal. [1]

4. Evitar, de ser posible, la necesidad de sujetar partes para mantener su orientación durante la manipulación del subensamblaje o durante la colocación de alguna otra pieza. Si es necesario sostener, tratar de diseñar de forma que la pieza sea asegurada tan pronto como sea posible después de haber sido insertada, (Figura 1.6).

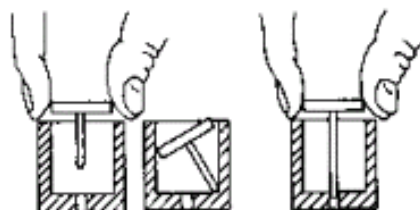


Autoposicionamiento

Se requiere sostener y alinear
en operaciones subsecuentes

Figura 1.6.- Características de autoposicionamiento para evitar la sujeción y alineamiento. [1]

5. Diseñar de tal forma que la pieza sea ubicada antes de soltarla, este tipo de restricciones en el diseño son una fuente constante de problemas en la colocación de las piezas, (Figura 1.7).



La pieza se debe
soltar antes de que
sea ubicada.

La pieza es
ubicada antes
de soltarla.

Figura 1.7.- Diseñar para facilitar la inserción. [1]

6. Cuando se utilicen sujetadores mecánicos comunes, se recomienda tomar en cuenta la secuencia mostrada en la Figura 1.8, en la cual se lista en orden creciente el costo relativo de diferentes procesos de sujeción.

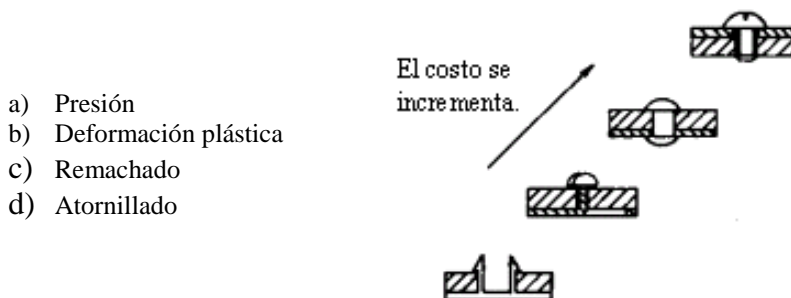


Figura 1.8.- Métodos de sujeción más comunes. [1]

7. Evitar la necesidad de reubicar el ensamblaje parcialmente completado, (Figura 1.9). La inserción desde direcciones opuestas requiere del reubicamiento del ensamblaje.

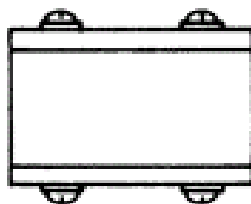


Figura 1.9.- Evitar el reubicamiento del ensamblaje. [1]

Desarrollo de la metodología sistemática DFA

Estos lineamientos generales son muy útiles para mejorar el diseño de un producto desde el punto de vista del proceso de ensamblaje, pero por sí solos son insuficientes para evaluar cuantitativamente la facilidad de ensamblaje y no tienen una clasificación que oriente al diseñador para saber que lineamientos mejoran en mayor medida la manipulación e inserción del proceso de ensamblaje, además de que no cuentan con una forma de estimar la mejora en el proceso de ensamblaje resultado de la eliminación o rediseño de una pieza. [2]

Es por eso que desde 1977 se comenzaron a desarrollar métodos analíticos para determinar el proceso de ensamblaje más económico para un producto y para analizar la facilidad de ensamblaje manual, automática y por robots. Se llevaron a cabo estudios experimentales para medir los efectos de simetría, tamaño, peso, espesor y flexibilidad en tiempos y costos de manipulación. Además se realizaron experimentos para cuantificar el efecto de las partes adherentes o resbaladizas y la manipulación de una parte utilizando pinzas, el efecto de la geometría elástica al momento de sujetarla y el efecto del peso en tiempo de manipulación para partes que requieran dos manos para manipulación y sujeción. [1, 2]

Para las operaciones de inserción se hicieron análisis teóricos y experimentales sobre el efecto del diseño del chaflán al momento de la inserción, el diseño de partes para evitar que se atoren durante el ensamblaje, el efecto de la parte geométrica al momento de inserción, así como los efectos de acceso obstruido y visión restringida en operaciones de ensamblaje.

Otra de las aportaciones de Boothroyd al diseño para ensamble es la introducción del índice DFA o “eficiencia de ensamble”, ya que da la oportunidad de evaluar cuantitativamente el ensamble de un producto. La ecuación para obtener el índice DFA está dada como:

$$\text{Índice DFA} = \frac{(\text{Número mínimo teórico de piezas}) * (\text{Tiempo teórico})}{\text{Tiempo estimado de ensamble}}$$

Donde *el número mínimo teórico de piezas (NM)* se refiere al menor número de piezas del que puede estar formado el producto sin alterar su funcionalidad, el *tiempo teórico* es el tiempo ideal de ensamble para una pieza (3 segundos), y es el tiempo promedio de ensamble para una pieza que no presenta dificultades de manipulación, sujeción o inserción ;el *tiempo total estimado de ensamble* es una estimación del tiempo que toma completar el ensamble de un producto considerando las condiciones de manipulación, sujeción e inserción de cada una de las piezas.

Para definir la idea fundamental del diseño para ensamble podemos establecer dos lineamientos principales:

1. Minimizar el número de partes en un ensamble.
2. Asegurar que las partes que permanecen sean fáciles de ensamblar.

El *número teórico de piezas (NM)* representa una situación ideal en la cual las piezas separadas son eliminadas o combinadas en una sola pieza, para alcanzar el número mínimo teórico de piezas se establecieron criterios para determinar la viabilidad de la eliminación o combinación de componentes, los criterios de eliminación o combinación se aplican de manera individual a cada una de las piezas del conjunto, de cumplirse alguno de estos lineamientos, la pieza en cuestión no es candidata a la eliminación o combinación con alguna otra pieza. Los criterios mencionados son los siguientes:

Criterios de eliminación o combinación de piezas

1. Durante el funcionamiento normal del producto, la pieza se mueve en relación a las otras piezas ya ensambladas, (Los movimientos pequeños que se pueden lograr con articulaciones elásticas no clasifican).
2. La pieza debe ser de un material diferente que las otras piezas ensambladas, (Para aislamiento, reducción de vibraciones, etc.).
3. La pieza debe estar separada de las otras piezas ensambladas, porque de otra forma, el ensamble o desensamble de las piezas sería imposible.

Es necesario señalar que estos criterios son aplicados sin tomar en cuenta los requerimientos generales de diseño. Por ejemplo, los elementos de sujeción externos (tornillos, snapfit, remaches, etc.) por lo general no cumplen con ninguno de los criterios anteriores, por lo que siempre son candidatos a eliminación o combinación con alguna otra pieza del conjunto.

Basado en los resultados de sus estudios Boothroyd presentó un sistema de clasificación y codificación para los procesos de manipulación, inserción y sujeción. Este sistema fue presentado en forma de tablas, en las cuales se muestran un conjunto de costos y tiempos estándar para cada una de las operaciones de ensamble, este sistema es utilizado en la estimación de la eficiencia total del proceso. Las tablas están clasificadas para procesos manuales o procesos automáticos, sin dar la posibilidad de realizar la evaluación de procesos de ensamble mixtos [1, 9].

Sistema de clasificación para ensambles manuales (manipulación e inserción)

En las tablas propuestas por Boothroyd se muestra un conjunto de tiempos estándar para diversas operaciones del proceso de ensamble, en esta clasificación se considera la adquisición, movimiento, orientación, inserción y fijación de las piezas, así como otras operaciones que nos son de ensamble como las reorientaciones e inserción de líquidos.

Cada operación puede ser identificada por medio de un código de dos dígitos, en donde el primer dígito corresponde a la fila y el segundo dígito a la columna de la tabla correspondiente. Cada código de dos dígitos tiene asignado un tiempo, el cual es el tiempo estándar estimado para realizar esa operación, estos tiempos podemos usarlos para calcular el tiempo total estimado de ensamble.

Para el correcto uso de las tablas de clasificación propuestas para la metodología DFA es necesario definir algunos conceptos mencionados en ellas, tales como:

Efecto de la simetría en el tiempo de manipulación

Una de las principales características de diseño que afectan el tiempo requerido para tomar y orientar una pieza es la simetría de la pieza. Las operaciones de ensamble siempre involucran al menos dos piezas: la parte a ser insertada y la pieza en la cual la parte será insertada, la orientación requiere de la alineación de la pieza a su respectivo receptáculo [11]. Por lo cual es conveniente definir dos tipos de simetría para la pieza:

- Simetría Alfa: Es la simetría de rotación de una pieza alrededor de un eje perpendicular a su eje de inserción. Para piezas con un eje de inserción, una orientación de extremo a extremo es necesaria cuando $\alpha=360^\circ$, de lo contrario $\alpha=180^\circ$. [9]
- Simetría Beta: Es la simetría de rotación de una pieza alrededor de su eje de inserción. La magnitud de la simetría beta será el ángulo más pequeño que pueda girar la pieza para repetir su orientación. Por ejemplo: para un cilindro que es insertado en un agujero circular, $\beta=0^\circ$.

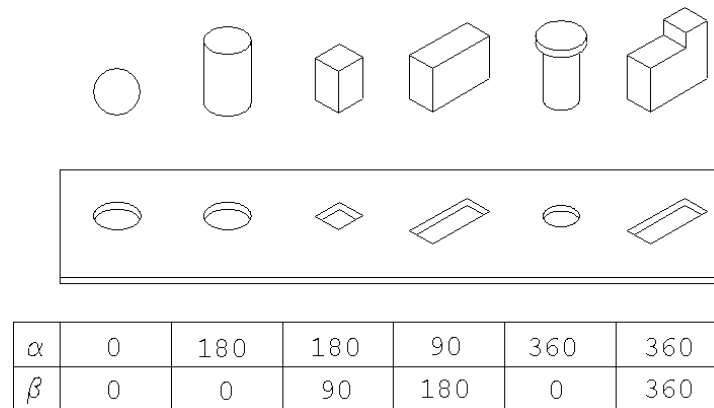


Figura 1.10.- Simetría Alfa y Beta. [9]

Efecto del tamaño y espesor de la pieza en el tiempo de manipulación

Otro de los factores que afectan el tiempo de manipulación en el proceso de ensamble manual son el espesor y tamaño de la pieza.

- Espesor: Es la longitud del lado más corto de la caja más pequeña que encierra completamente a una pieza.
- Longitud: Es la longitud del lado más largo de la caja más pequeña que encierra completamente a una pieza.

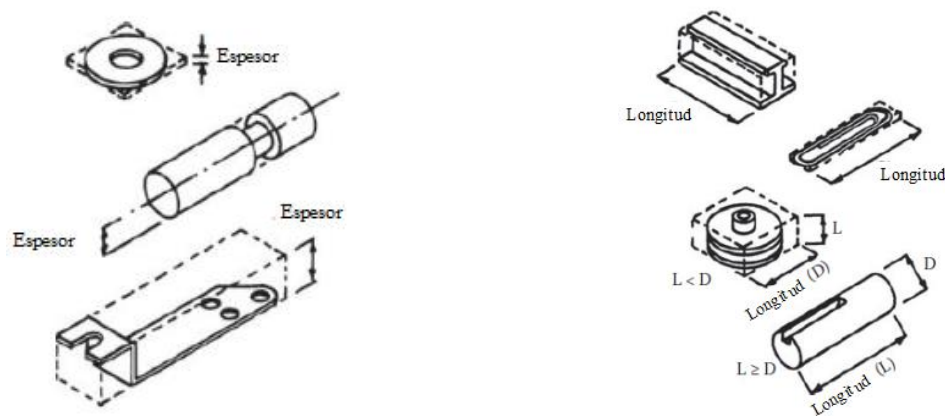


Figura 1.11.- Espesor y longitud. [1]

Otros factores como el peso de la pieza, el hecho de necesitar usar las dos manos para su manejo, que las piezas se enreden entre sí, la necesidad del uso de herramientas para su operación o de una combinación de estos elementos afectan el tiempo de manipulación de la pieza durante el proceso de ensamble.

Entre los factores que más afectan los tiempos de inserción de la pieza se puede mencionar el uso de chaflanes en el diseño, dificultades en el acceso y visibilidad, el requerir de una continua sujeción de la pieza y resistencia a la inserción como el uso de presión y la interferencia entre piezas.

Tabla 1.1.- Manipulación manual - Tiempos estimados (Segundos) [9]

		Las piezas son fáciles de tomar y manipular					Las piezas tienen dificultades de manipulación						
		Espesor > 2 mm			Espesor ≤ 2 mm		Espesor > 2 mm			Espesor ≤ 2 mm			
		Tamaño > 15 mm	6 mm ≤ Tamaño > 15 mm	Tamaño < 6 mm	Tamaño > 6 mm	Tamaño ≤ 6 mm	Tamaño > 15 mm	6 mm ≤ Tamaño > 15 mm	Tamaño < 6 mm	Tamaño > 6 mm	Tamaño ≤ 6 mm		
	Una mano												
		0	1.13	1.43	1.88	1.69	2.18	1.84	2.17	2.65	2.45	2.98	
manipuladas con una sola mano sin la	(α+β)<360°	0	1.13	1.43	1.88	1.69	2.18	1.84	2.17	2.65	2.45	2.98	
	360°≤(α+β)<540°	1	1.5	1.8	2.25	2.06	2.55	2.25	2.57	3.06	3	3.38	
	540°≤(α+β)<720°	2	1.8	2.1	2.55	2.36	2.85	2.57	2.9	3.38	3.18	3.7	
	(α+β)=720°	3	1.95	2.25	2.7	2.51	3	2.73	3.06	3.55	3.34	4	

		Las piezas requieren pinzas para tomarlas y manipularlas								Las piezas requieren otras herramientas además de las pinzas que requieren herramientas especiales para sujetarse y			
		Las piezas pueden manipularse sin necesidad de amplificadores ópticos				Las piezas requieren amplificadores ópticos para manipularse							
		α≤180°		α=360°		α≤180°		α=360°					
	Una mano con ayudas para sujeción	Espesor>0.25 mm	Espesor≤0.25 mm	Espesor>0.25 mm	Espesor≤0.25 mm	Espesor>0.25 mm	Espesor≤0.25 mm	Espesor>0.25 mm	Espesor≤0.25 mm				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
superiores y manipuladas con una	α≤180°	0≤β≤180°	4	3.6	6.85	4.35	7.6	5.6	8.35	6.35	8.6	7	7
		β=360°	5	4	7.25	4.75	8	6	8.75	6.75	9	8	8
	α=180°	0≤β≤180°	6	4.8	8.05	5.55	8.8	6.8	9.55	7.55	9.8	8	9
		β=360°	7	5.1	8.35	5.85	9.1	7.1	9.55	7.85	10.1	9	10

		Las piezas no presentan problemas adicionales de manipulación					Las piezas presentan problemas adicionales de manipulación (resbaladizas, pegajosas, delicadas, etc.)					
		α≤180°			α=360°		α≤180°			α=360°		
		Tamaño > 15 mm	6 mm ≤ Tamaño ≤ 15 mm	Tamaño < 6 mm	Tamaño > 6 mm	Tamaño ≤ 6 mm	Tamaño > 15 mm	6 mm ≤ Tamaño ≤ 15 mm	Tamaño < 6 mm	Tamaño > 6 mm	Tamaño ≤ 6 mm	
	Dos manos para manipulación											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Las piezas se atorán severamente o se enganchan o son flexibles, pero pueden ser sujetadas y levantadas con una sola mano (con el uso de herramientas si fuera necesario)		8	4.1	4.5	5.1	5.6	6.75	5	5.25	5.85	6.35	7

		Las piezas pueden ser manipuladas por una persona sin ayuda mecánica								Las piezas se anidan severamente o se enganchan o son flexibles. Las piezas necesitan herramienta especial para sujetarlas y manipularlas	
		Las piezas no se enganchan ni se anidan ni son flexibles				Las piezas son pesadas (>10 lb)					
		Peso de la pieza<10 lb		Las piezas presentan otras dificultades de manipulación		Las piezas son fáciles de tomar y manipular		Las piezas presentan otras dificultades de manipulación			
	Se requieren dos manos debido al gran tamaño	Las piezas son fáciles de tomar y manipular	Las piezas presentan otras dificultades de manipulación		Las piezas son fáciles de tomar y manipular		Las piezas presentan otras dificultades de manipulación		Las piezas se anidan severamente o se enganchan o son flexibles.		
		α≤180°	α=360°	α≤180°	α=360°	α≤180°	α=360°	α≤180°	α=360°	8	9
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Se requieren dos manos para sujetar y transportar las piezas		2	3	2	3	3	4	4	5	7	9

Tabla 1.2.- Inserción manual - Tiempos estimados (segundos) [9]

		Pieza añadida pero no asegurada		Después del ensamble no se requiere sujetar la pieza para mantener su orientación y localización				Después del ensamble se requiere sujetar la pieza para mantener su orientación y localización			
				Fácil de alinear y posicionar durante el ensamble		Difícil de alinear y posicionar durante el ensamble		Fácil de alinear y posicionar durante el ensamble		Difícil de alinear y posicionar durante el ensamble	
				No hay resistencia a la inserción	Hay resistencia a la inserción	No hay resistencia a la inserción	Hay resistencia a la inserción	No hay resistencia a la inserción	Hay resistencia a la inserción	No hay resistencia a la inserción	Hay resistencia a la inserción
		0	1	2	3	6	7	8	9		
Adición de cualquier pieza en donde ni la propia pieza ni las demás se aseguran inmediatamente	La pieza y el herramental asociado, incluyendo las manos, pueden alcanzar fácilmente la posición deseada	0	1.5	2.5	2.5	3.5	5.5	6.5	6.5	7.5	
	La pieza y el herramental asociado, incluyendo las manos, no pueden alcanzar fácilmente la posición deseada	1	4	5	5	6	8	9	9	10	
	Debido a un acceso restringido y a una restricción en la visión	2	5.5	6.5	6	7.5	9.5	10.5	10.5	11.5	

		Pieza asegurada inmediatamente		No se requieren operaciones de atornillado o de deformación inmediatamente después de la inserción		Deformación plástica inmediatamente después de la inserción						Atornillado inmediatamente después de la inserción	
						Deformación plástica o torsión				Ribeteado u operaciones similares			
						Fácil de alinear y posicionar durante el ensamble		Difícil de alinear y posicionar durante el ensamble		Fácil de alinear y posicionar durante el ensamble			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Adición de otras piezas en donde la propia pieza y/o las demás se aseguran inmediatamente	La pieza y el herramental asociado, incluyendo las manos, pueden alcanzar fácilmente la posición deseada y el herramental se puede operar fácilmente	3	2	5	4	5	6	7	8	9	6	8	
	La pieza y el herramental asociado, incluyendo las manos, no pueden alcanzar fácilmente la posición deseada o la herramienta es difícil de operar	4	4.5	7.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	8.5	10.5	
	Debido a un acceso restringido y a una restricción en la visión	5	6	9	8	9	10	11	12	13	10	12	

		Operación separada		Procesos de unión mecánicos (las piezas ya están en su lugar pero no fueron sujetadas inmediatamente después de la inserción)				Procesos de unión no mecánicos (las piezas ya están en su lugar pero no fueron sujetadas inmediatamente después de la inserción)				Procesos que no son de unión			
				No hay deformación plástica o está muy localizada				Procesos metalúrgicos				Procesos químicos (ej. Unión con pegamentos)		Manipulación de piezas o subensambles (ej. Orientaciones, ajustes, etc.)	
				Doblado o procesos similares	Ribeteado o procesos similares	Apretado por rosca u otros procesos	Presilla de pinza, conexión rápida, unión por presión	material adicional (soldadura por fricción, por material adicional)	Se requiere material adicional	Procesos de soldadura	Soldadura de penetración				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Procesos de ensamble donde todas las piezas solidas están en su lugar		9	4	7	5	3.5	7	8	12	12	9	12			

En el Apéndice A se encuentran los pasos del procedimiento de análisis propuesto por Boothroyd y la hoja de trabajo usada para el análisis DFA. Una vez que tenemos las herramientas suficientes para analizar y evaluar el ensamble de un producto, mostramos un sencillo ejemplo de su aplicación.

Análisis DFA Manual

Como ejemplo del uso de los procedimientos de la metodología propuesta por Boothroyd, en la Figura 1.12 se muestra una vista en explosión de las piezas que conforman un bolígrafo, del cual se realizó un análisis valorando operaciones de ensamble manual y operaciones de ensamble automático.

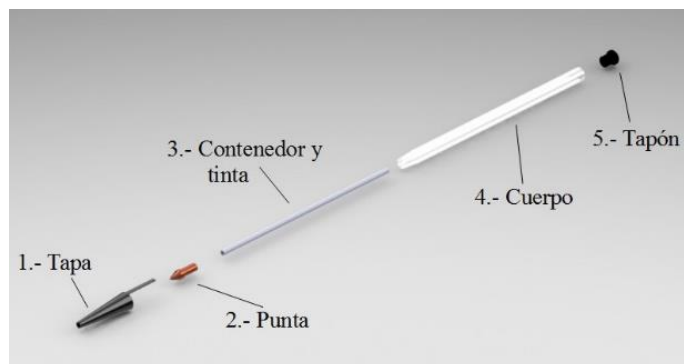


Figura 1.12.- Vista en explosión de un bolígrafo.

Para el análisis de DFA mediante operaciones manuales se realizaron las siguientes consideraciones:

- La punta del bolígrafo se tomó como la base del ensamble.
- La punta del bolígrafo se considera un solo elemento.
- La tinta se encuentra incluida en el contenedor.
- Todas las operaciones de inserción se realizan en línea recta desde arriba.

En la Tabla 1.3 se encuentra el nombre, dimensiones y simetría de las piezas, así como los resultados obtenidos de este estudio.

Pieza	Dimensiones [mm]		
	Longitud	Diámetro	Espesor
	A	B	C
Cuerpo	133	8	8
Punta	19.4	5	5
Contenedor	113	3	3
Subensamble cartucho	132	5	5
Tapa	57.2	13.2	13.2
Taponcito	7.5	7	7

Simetría	Cuerpo	Punta	Contenedor	Tapa	Taponcito
α	360	360	180	360	360
β	0	0	0	0	0
$\alpha + \beta$	360	360	180	360	360

Tabla 1.3.- Análisis de un proceso de ensamble compuesto de operaciones manuales.

Número de pieza	No. De veces que se realiza la operación	Código de manipulación	Tiempo de manipulación	Código de inserción	Tiempo de inserción	Tiempo de operación	Costo de operación (centavos)	Número mínimo de piezas	
2	1	10	1.5	0	2	3.5	1.4	1	punta
3	1	0	1.13	30	2	3.13	1.252	1	contenedor
1	1	10	1.5	0	1.5	3	1.2	1	cuerpo
5	1	11	1.8	30	2	3.8	1.52	0	tapón
	1			98	9	9	3.6	0	reorientación para insertar tapa
4	1	10	1.5	30	2	3.5	1.4	1	tapa
						25.93	10.372	4	0.46278442
						TM	CM	NM	Eficiencia del diseño

1.1.2.- Metodología para el análisis de ensambles automáticos

El tomar en cuenta las metodologías de diseño para ensamble en procesos manuales acarrea grandes beneficios, pero es de vital importancia utilizar las metodologías DFA cuando el proceso de ensamblado de un producto se realiza de forma automática. En la Figura 1.13 se muestra una pieza con una ligera asimetría que en el caso de ensamble manual su manejo e inserción no significarían un gran problema, pero en el caso de un proceso de ensamble automático se necesitaría de un complejo sistema de visión para lograr su correcta orientación.

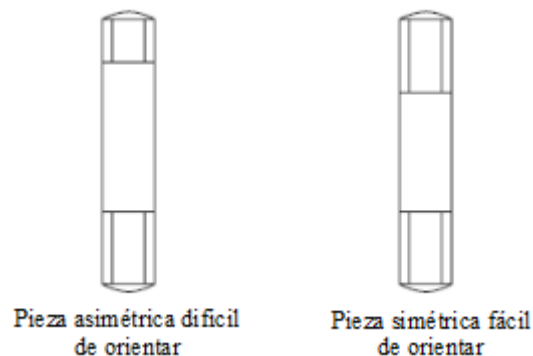


Figura 1.13.- Simplificación de la alimentación y orientación automática. [2]

Por lo que aplicar el diseño para ensamble en procesos automáticos se vuelve sumamente relevante para las consideraciones económicas del proceso de diseño. Al aplicar las metodologías DFA para procesos automáticos los beneficios que se consiguen no solo se limitan a la automatización del proceso de ensamblado sino que también de la mejora del diseño del producto, llegando en algunas ocasiones a obtenerse un mayor beneficio del rediseño del producto que del proceso de automatización.[2]

La metodología de diseño para ensamble automático difiere de la metodología de ensamble manual debido a que en el ensamble manual los problemas se asocian principalmente con la inserción y aseguramiento de las piezas, mientras que para la automatización del ensamble el problema principal es el manejo automatizado de las piezas. Esto significa que para el proceso automático se debe poner especial atención en el diseño de las partes para su alimentación y orientación automática. [12]

Otra diferencia con respecto al proceso de análisis de ensamble manual, es que en el proceso manual se evalúan los tiempos de las operaciones de ensamble para luego estimar el costo total del proceso, mientras que para el proceso automático el tiempo que toma completar un ensamble no determina el costo del ensamble, en este caso el costo de ensamble está relacionado con los ciclos de producción de las máquinas, ya que si todo funciona correctamente se obtendrá un producto terminado al final de cada ciclo, por lo que la metodología de ensamble automático se centra en evaluar el costo de las operaciones de manipulación e inserción automática. [2]

El método para procesos automáticos involucra tres etapas importantes en las que se busca estimar y reducir el costo de cada pieza en el ensamble:

1. Diseño para la alimentación y orientación automática.- Se busca estimar y reducir el costo de manejar la pieza automáticamente a granel y entregarla en la orientación correcta para su inserción por una máquina de ensamble automática.
2. Diseño para la inserción automática.- Se busca estimar y reducir el costo de insertar la pieza automáticamente en el ensamble y el costo de cualquier operación adicional.
3. Minimizar el número de piezas.- Decidir que piezas deben ser separadas de las demás durante el ensamble. [9, 12]

Con estos tres criterios se puede inferir el costo total del proceso de ensamble. A continuación se comentan los lineamientos generales de cada una de estas etapas:

Diseño para la alimentación y orientación automática

Esta etapa es considerada la más importante y la que más conflictos causa en el proceso automático, el costo de la alimentación y orientación de las piezas depende del costo del equipo requerido y de la tasa de producción (Feed Rate FR) de las máquinas. Boothroyd [2, 9] basándose en criterios como el costo del equipo, el número de turnos trabajados, el retorno de la inversión de la maquinaria, así como las características geométricas de las piezas y las particularidades de su proceso de ensamble, desarrolló un conjunto de lineamientos y ecuaciones para calcular el costo de alimentación de cada pieza. En las Tabla 1.5 y Tabla 1.6, se muestra el costo de alimentación y orientación de acuerdo a las características de las piezas y las particularidades de sus operaciones de ensamblado.

Al igual que para el proceso de ensamble manual, para los procesos de ensamble mediante operaciones automáticas Boothroyd [9] estableció una serie de reglas para ayudar al diseñador durante el proceso de diseño a conseguir un producto con mejores características para facilitar su ensamble mediante un proceso automatizado.

Algunos de los lineamientos más destacados para asegurar una manipulación eficiente de la pieza son: [9]

1. Asegurarse que las partes pueden ser fácilmente separadas del granel y transportadas a un alimentador vibratorio. Para lograr esta meta se debe evitar piezas que:
 - Se aniden o enreden a granel.
 - Sean flexibles.

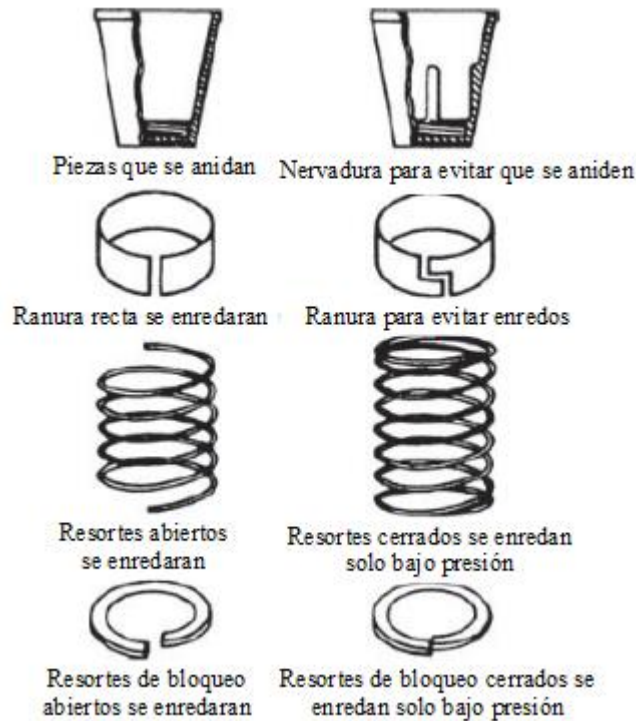


Figura 1.14.- Principales problemas de manipulación. [2]

- Tengan bordes delgados o afilados que pueden solaparse durante su traslado sobre una banda transportadora.



Figura 1.15.- Dificultades de alimentación. [2]

- Sean delicadas o frágiles en la medida en que la recirculación en el alimentador pueda causar algún daño en la pieza.
- Sean pegajosas o magnéticas de tal forma que se necesite una fuerza similar a su peso para ser separadas.
- Sean abrasivas y desgasten la superficie de los sistemas de manipulación automáticos.
- Tengan menos de 3 mm. en su lado más largo.

- Sean ligeras, de manera que su resistencia al aire pueda crear problemas (menos que 1.5 kN/m^3).
 - Tengan más de 150 mm. en su lado más largo.
2. Asegurarse que las piezas pueden orientarse fácilmente en los alimentadores automáticos. Para alcanzar este objetivo se recomienda:
- Hacer las piezas lo más simétricas posibles, con esto se consigue una orientación automática más sencilla.
 - Para las piezas asimétricas, asegurarse que las características de las piezas sean claramente asimétricas.

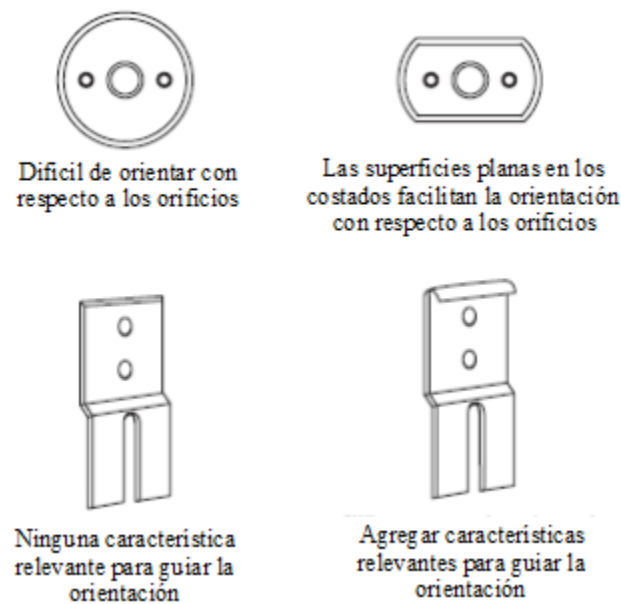


Figura 1.16.- Características asimétricas para facilitar la orientación y alimentación automática. [2]

- Asegurarse que la asimetría de la pieza no se debe a características geométricas tales como: diferencias en los recubrimientos de la superficie, estampados o diferencias en los acabados superficiales.

Para las partes que no son perfectamente simétricas asegurar que su orientación está definida por una característica principal como: una proyección descentrada, una muesca, un chaflán, un recorte, características que sean visible en la silueta de la pieza. De ser posible asegurarse que dicha característica sea visible en la dirección del lado más largo de la pieza. Evitar los diseños en los cuales la orientación está definida por orificios o muescas que no son visibles en la silueta de la pieza.

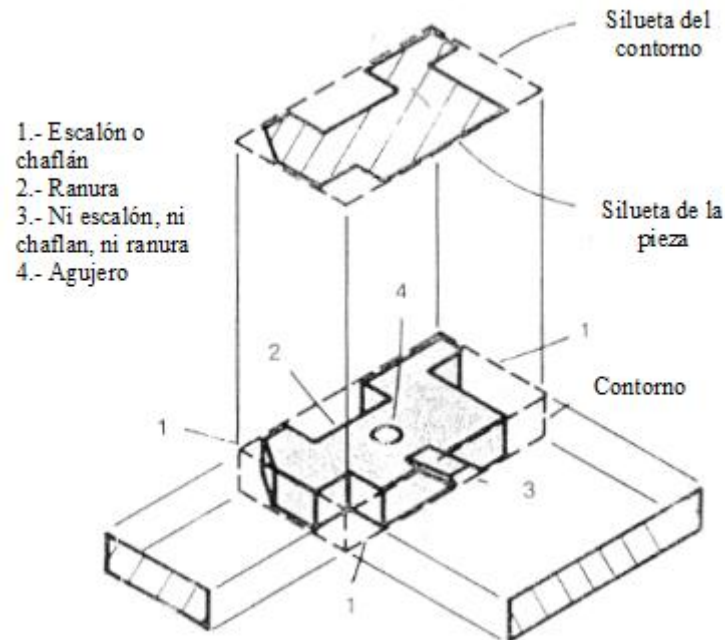


Figura 1.17.- Silueta de la pieza [9].

- Para las piezas no rotacionales, asegurarse que sus tres principales dimensiones (largo, ancho, alto) difieran entre sí en al menos 10%, esto permitirá un mejor manejo en los sistemas de orientación.

Diseño para la inserción automática

Habiendo tomado en cuenta todos los pasos necesarios para asegurar una manipulación automática eficiente, es necesario asegurar que la inserción de la pieza, ubicación de los objetos y operaciones de fijación puedan ser ejecutados fácilmente, los siguientes lineamientos ayudan en la reducción del costo de las operaciones de inserción (Reglas para la inserción automática [9]):

1. Evitar la necesidad de reorientaciones durante el proceso de ensamblado, La reorientación de un subensamblado usualmente se realiza en una estación de trabajo separada lo que incrementa el costo del equipo y disminuye la eficiencia de ensamblado del producto.
2. Asegurar que las piezas que no se aseguran inmediatamente, se sitúan por completo sin necesidad de ser sujetadas al transportarse a la siguiente estación de trabajo.
3. Incluir en el diseño características como cejas y chaflanes para asegurar que las partes se alinean fácilmente. Esto reduce la necesidad de equipo de alta precisión y los enredos entre piezas. Para la inserción de tornillos se recomienda el uso de tornillos que tiendan a centrarse por sí mismos facilitando su inserción, en la Figura 1.18 se muestran algunos de los tornillos más comunes, siendo 1 el que más dificultad presenta para su inserción y 6 el que muestra menos problemas. [2, 13]

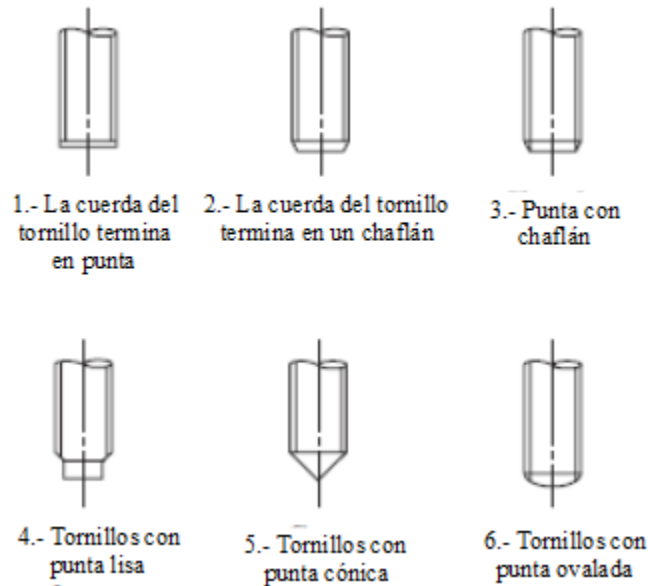


Figura 1.18.- Clasificación de tornillos de acuerdo a su facilidad de inserción. [2, 13]

4. Diseñar el producto para permitir la inserción de componentes en línea recta desde arriba.
5. Evitar la necesidad de usar mucha fuerza durante la inserción, ya que esto incrementa el costo del equipo necesario para realizar la operación.
6. Si el ensamble de una pieza no puede llevarse a cabo desde arriba, al menos asegurar que la operación de inserción se puede realizar en un movimiento en línea recta.

Minimizar el número de piezas

La forma más sencilla de reducir costos en el proceso de ensamble es reducir el número de piezas que componen el producto, para ello se pueden aplicar los mismos criterios de eliminación o combinación de piezas mostrados en el análisis del proceso manual (página 8). Donde la simplificación de la estructura del producto puede dar beneficios sustanciales en la disminución del costo de las piezas, ya que la eliminación de una pieza puede eliminar toda una estación de trabajo, incluyendo el alimentador y el equipo necesario para su manipulación e inserción. Por lo que se reduce la inversión necesaria para la automatización del proceso de ensamblado. [14]

Como resultado de los análisis experimentales aplicando los lineamientos para procesos de ensamble automático, Boothroyd [1, 9] desarrolló un conjunto de ecuaciones para calcular el costo de las operaciones de ensamble basándose en parámetros como la tasa de producción (Feed rate) y el costo del equipo requerido para el proceso. Con esta información estableció la ecuación para la *eficiencia del proceso de ensamble automático* y el sistema de clasificación en el cual se da un conjunto de costos promedio para cada una de

las operaciones de manipulación (alimentación y orientación) e inserción de los procesos automáticos

$$\eta_{Automático} = \frac{0.09 NM}{C_A} * \frac{60}{FR}$$

Donde:

$\eta_{Automático}$ = Eficiencia de ensamble automático

NM = Número mínimo teórico de piezas

C_A = Costo Total de la operación [Centavos]

FR = Número de piezas por minuto (Feed Rate)

Sistema de clasificación para ensambles automáticos (manipulación e inserción)

La técnica de análisis para procesos de ensamble automático utiliza un sistema de clasificación de las características del diseño con la finalidad de estimar el costo total de automatización. Al igual que para los procesos manuales, esta metodología ayuda a identificar las áreas para una posible mejora en el diseño del producto. [9]

El sistema de clasificación está dividido en las dos operaciones principales de todo proceso de ensamblado: manipulación e inserción. Para el proceso automático la etapa de manipulación se compone de las actividades de alimentación y orientación, cada operación de manipulación puede ser identificada por medio de un código de 5 dígitos, el cual se forma como sigue:

Primer dígito.- De acuerdo a la simetría y características geométricas, las piezas se pueden clasificar en dos tipos: rotacionales y no rotacionales.

- a) Una pieza cuya forma principal es un cilindro o un prisma regular cuya sección transversal es un polígono regular de cinco o más lados se considera una pieza rotacional. Son también piezas rotacionales aquellas que pueden repetir su orientación cuando rotan 120° o 90° sobre su eje principal.
- b) L es la longitud y D es el diámetro del cilindro más pequeño que puede encerrar por completo a la pieza.
- c) A es la longitud del lado más largo, C es la longitud del lado más corto y B es la longitud del lado intermedio del rectángulo más pequeño que puede encerrar completamente a la pieza.

Tabla 1.4.- Clasificación de piezas Rotacionales y No Rotacionales. [9]

Rotacionales a)	Discos b) $L/D < 0.8$	0
	Cilindros cortos b) $0.8 \leq L/D \leq 1.5$	1
	Cilindros largos b) $L/D > 1.5$	2
No Rotacionales	Plano c) $A/B \leq 3$ $A/C > 4$	6
	Largo c) $A/B > 3$	7
	Cubico c) $A/B \leq 3$ $A/C \leq 4$	8

En la Figura 1.19 se ofrece un ejemplo del desarrollo del código de 5 dígitos para la manipulación automática. Se trata de una pieza rotacional con una razón $L/D = 1.54$. Por lo que de acuerdo a la Tabla 1.2 el primer dígito es “2”.

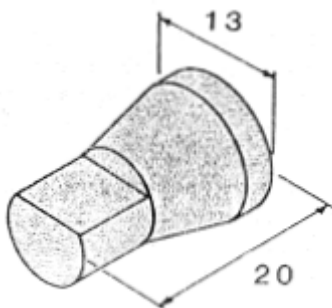
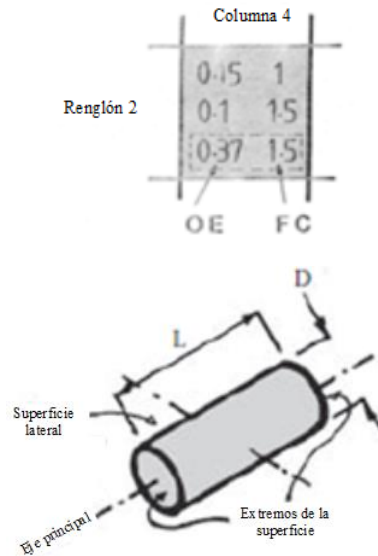


Figura 1.19.- Ejemplo del código de 5 dígitos para manipulación automática. [9]

Segundo dígito.- Al ser una pieza rotacional se debe usar la Tabla 1.5 para obtener el segundo dígito (De ser una pieza no rotacional se usaría la Tabla 1.6). Para la elección del segundo dígito se deben considerar las características de simetría de la pieza, para ello se elige el renglón y columna que represente las características de la pieza analizada. En el ejemplo la pieza tiene un chaflán beta-simétrico en la superficie externa (renglón 2) y no cumple con alguna de las otras características mencionadas en los demás renglones por lo que al caer dentro del renglón identificado con el número “2” ese será el dígito que le corresponde.

Tercer dígito.- El tercer dígito se obtiene de la columna de la Tabla 1.5 (para piezas no rotacionales Tabla 1.6). En el ejemplo la pieza tiene un escalón en uno de los extremos lo que provoca que la pieza sea beta-simétrica, es decir que requiere de una orientación con respecto a su eje principal. En este caso la columna que mejor representa las características de la pieza es la columna identificada con el número “4”.



Cuarto y quinto dígito.- El cuarto y quinto dígito son los números del renglón y columna de la Tabla 1.7 respectivamente. En esta tabla se tratan las dificultades de manejar piezas que sean delicadas, flexibles, abrasivas, muy ligeras o con tendencia a anidarse o solaparse. Para el ejemplo propuesto la pieza no presenta dificultades para su manipulación por lo que el cuarto y quinto dígito es “00”.

Con esto se tiene que el código de manipulación automática para la pieza mostrada en la Figura 1.19 es “22400”.

En la Tabla 1.8 se tiene un conjunto de costos estándar para el proceso de inserción, la tabla se encuentra dividida en tres segmentos: Piezas añadidas pero no aseguradas, piezas aseguradas inmediatamente y operaciones separadas. Cada proceso de inserción se identifica con un código de dos dígitos, donde el renglón y columna son seleccionados de acuerdo a las características de la pieza analizada, entre las propiedades que intervienen en esta selección se encuentra la dirección de inserción de la pieza, los requerimientos de sujeción durante la ubicación de la pieza, la facilidad de alineación y posicionamiento y la resistencia a la inserción. Entre las operaciones adicionales se tienen operaciones de atornillado, adición de líquidos y reorientaciones o ajustes de subensambles. Los pasos para el análisis del proceso de ensamble automático y la hoja de trabajo correspondiente se encuentran en el Apéndice B.

Tabla 1.6.- Manipulación automática - Datos para piezas No Rotacionales [9]

		A ≤ 1.1B o B ≤ 1.1C (Código de las principales características que distinguen a las superficies adyacentes que tienen dimensiones similares)															
		Escalones o chaflanes paralelos a -					Ranuras que traspasan paralelas a -					Orificios o muescas > 0.1B (no pueden ser vistas en la silueta)	Otros - Incluyendo ligeras asimetrías, características muy pequeñas, etc.)				
		Eje X y >0.1 C		Eje Y y >0.1 C		Eje Z y >0.1 B		Eje X y >0.1 C		Eje Y y >0.1 C		Eje Z y >0.1 B		7	8		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
La pieza tiene simetría de 180° con respecto a los tres ejes	0	0.8	1	0.8	1	0.2	1	0.5	1	0.75	1	0.25	1	0.5	1.5	0.25	2
		0.9	1	0.9	1	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1	0.5	1.5	0.6	1	0.5	1
		0.6	1	0.5	1	0.15	1.5	0.15	1.5	0.5	1	0.15	1	0.15	1.5	0.15	2
															Requiere manipulación manual		

		Código de la característica principal, o si la orientación está definida por más de una característica, entonces el código de la característica que da el tercer dígito más grande														
		Escalones o chaflanes paralelos a -					Ranuras que traspasan paralelas a -					Orificios o muescas > 0.1B (no pueden ser vistas en la silueta)	Otros - Incluyendo ligeras asimetrías, características muy pequeñas, etc.)			
		Eje X y >0.1 C		Eje Y y >0.1 C		Eje Z y >0.1 B		Eje X y >0.1 C		Eje Y y >0.1 C		Eje Z y >0.1 B		6	7	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
La pieza tiene simetría de 180° con respecto a solo uno de sus ejes	Con respecto al eje X	1	0.4	1	0.6	1	0.4	1.5	0.4	1	0.3	1	0.7	1	0.4	2
			0.5	1	0.15	1	0.25	2	0.5	1	0.25	1	0.25	1.5	0.25	3
			0.4	1	0.6	1	0.4	2	0.2	1	0.3	1	0.15	1	0.1	2
	Con respecto al eje Y	2	0.4	1	0.3	1	0.4	1.5	0.5	1	0.3	1	0.4	1	0.4	2
			0.4	1	0.2	1	0.25	2	0.4	1	0.25	1	0.25	1	0.25	2
			0.5	1	0.15	1	0.5	2	0.2	1	0.15	2	0.15	2	0.15	2
	Con respecto al eje Z	3	0.4	1	0.3	1	0.4	1	0.4	1	0.3	1	0.4	1.5	0.4	2
			0.3	1	0.2	1	0.25	1	0.3	1	0.25	1	0.25	2	0.25	2
			0.4	1	0.2	1	0.4	1	0.2	1	0.15	1	0.15	2	0.15	2
La pieza no tiene simetría (código de la principal característica que define a orientación)	Orientación definida por una característica principal	4	0.25	1	0.15	1	0.15	1.5	0.1	1	0.15	1	0.1	1.5	0.1	2
			0.25	1	0.1	1.5	0.24	2	0.2	1	0.1	1.5	0.15	2	0.15	3
			0.15	1	0.14	1	0.15	1	0.1	1	0.5	1	0.1	1.5	0.08	2
	Orientación definida por dos características principales y una de ellas es un escalón, chaflán o ranura	6	0.2	2	0.15	2	0.1	2.5	0.1	2	0.15	2	0.1	2.5	0.1	3
			0.1	3	0.1	3.5	0.1	4	0.1	3	0.1	3.5	0.1	4	0.1	5
			0.05	2	0.05	2	0.05	2.5	0.05	2	0.05	2	0.05	2.5	0.05	3
Otros - Incluyendo ligeras asimetrías, etc.	9	Requiere manipulación manual														

Tabla 1.7.- Manipulación automática - Costos adicionales del alimentador [9]

		Las piezas no se enredan o anidan				Se enredan o anidan pero no severamente				Se anidan severamente	Se enredan severamente			
		No es ligera		Ligera		No es ligera		Ligera						
		No es pegajosa	Pegajosa	No es pegajosa	Pegajosa	No es pegajosa	Pegajosa	No es pegajosa	Pegajosa					
		0	1	2	3	4	5	6	7					
Las piezas son pequeñas y no abrasivas	Las piezas no tienden a solaparse durante la alimentación	No es delicada	No es flexible	0	0	1	2	3	2	3	3	4	Requiere manipulación manual	Requiere manipulación manual
			Flexible	1	2	3	4	5	4	5	5	6		
Las piezas tienden a solaparse durante la alimentación	No es delicada	Delicada	No es flexible	2	1	2	3	4	3	4	4	5		
			Flexible	3	3	4	5	6	5	6	6	7		
Las piezas tienden a solaparse durante la alimentación	No es delicada	Delicada	No es flexible	4	2	3	3	4	4	5	4	5		
			Flexible	5	4	5	5	6	6	7	6	7		
Las piezas tienden a solaparse durante la alimentación	Delicada	Delicada	No es flexible	6	3	4	4	5	5	6	5	6		
			Flexible	7	5	6	6	7	7	8	7	8		

	Piezas muy pequeñas					Piezas grandes					
	Rotacional		No Rotacional			Rotacional		No Rotacional			
	$L/D \leq 1.5$	$L/D > 1.5$	$A/B \leq 3$ $A/C > 4$	$A/B > 3$	$A/B \leq 3$ $A/C \leq 4$	$L/D \leq 1.5$	$L/D > 1.5$	$A/B \leq 3$ $A/C > 4$	$A/B > 3$	$A/B \leq 3$ $A/C \leq 4$	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Las piezas son muy pequeñas o grandes pero no son abrasivas	8	2	2	2	2	2	9	9	9	9	9

	Las piezas no se enredan o anidan severamente									
	Piezas pequeñas					Piezas grandes		Piezas muy pequeñas		
	Orientación definida por características geométricas				Orientación definida por características no geométricas		Orientación definida por características geométricas	Orientación definida por características no geométricas	Orientación definida por características geométricas	Orientación definida por características no geométricas
	No son flexibles		Flexibles	No se traslapan	Se traslapan					
	No se traslapan	Se traslapan								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Piezas abrasivas	9	2	4	4			9		4	

Tabla 1.8.- Inserción automática - Costo relativo del cabezal [9]

<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; display: inline-block; vertical-align: middle;"></div> Pieza añadida pero no asegurada			Después del montaje no requiere de sujeción para mantener su orientación y ubicación				Requiere de sujeción durante los procesos siguientes para mantener su orientación y ubicación				
			Fácil de alinear y posicionar		No es fácil de alinear o posicionar (Sin características previstas para el propósito)		Fácil de alinear y posicionar		No es fácil de alinear o posicionar (Sin características previstas para el propósito)		
			0	1	2	3	6	7	8	9	
La sujeción final no se ha llevado a cabo	Inserción en línea recta	Verticalmente desde arriba	0	1	1.5	1.5	2.3	1.3	2	2	3
		No verticalmente desde arriba	1	1.2	1.6	1.6	2.5	1.6	2.1	2.1	3.3
	Inserción no en línea recta		2	2	3	3	4.6	2.7	4	4	6.1

<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; display: inline-block; vertical-align: middle;"></div> Pieza asegurada inmediatamente			No hay operación de atornillado o deformación plástica inmediatamente después de la inserción (ajustes a presión)		Deformación plástica inmediatamente después de la inserción						Atornillado inmediatamente después de la inserción		
					Flexión plástica			Ribeteado o deformación plástica similar					
					Fácil de alinear y posicionar, sin resistencia a la inserción	alinear o posicionar y/o resistencia a la inserción	Fácil de alinear y posicionar	No es fácil de alinear o posicionar (Sin características previstas para el propósito)	Fácil de alinear y posicionar	No es fácil de alinear o posicionar (Sin características previstas para el propósito)			Sin resistencia a la inserción
Adición de alguna pieza donde la sujeción final se lleva a cabo	Inserción en línea recta	Verticalmente desde arriba	3	1.2	1.9	1.6	2.4	3.6	0.9	1.4	2.1	0.8	1.8
		No verticalmente desde arriba	4	1.3	2.1	2.1	3.2	4.8	1	1.5	2.3	1.3	2
	Inserción no en línea recta		5	2.4	3.8	3.2	4.8	7.2	1.8	2.8	4.2	1.6	3.6

<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; display: inline-block; vertical-align: middle;"></div> Operación separada			Procesos de unión mecánicos (las piezas ya están en su lugar)				Procesos de unión no mecánicos (las piezas ya están en su lugar)			Procesos que no son de unión		
			No hay deformación plástica o está muy localizada				Presilla de pinza, conexión rápida, unión por presión	Procesos metalúrgicos		Procesos químicos (ej. Unión con pegamentos)	Manipulación de piezas o subensambles (ej. Orientaciones, ajustes, etc.)	Otros procesos (ej. Inserción de líquidos, etc.)
			Doblado o procesos similares	Ribeteado o procesos similares	Atornillado u otros procesos	No se requiere material adicional (soldadura por fricción, por resistencia)		Se requiere material adicional	Soldadura de penetración			
Procesos de ensamble donde todas las piezas solidas están en su lugar, se añaden piezas no solidas o se manipulan		9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			1.6	0.9	0.8	1.6	1.2	1.1	1.1	0.8	1.5	

Análisis DFA Automático

Para el análisis de DFA mediante operaciones automáticas del ejemplo mostrado en la Figura 1.12, además de las consideraciones realizadas en el DFA manual (página 13), se consideró un Feed Rate (FR) de 5 piezas por minuto. Los resultados de este análisis son los siguientes:

1	2	3	4	5			6		7	8	9	10	11	12	13	14	Índice requerido para el ensamble FR (por minuto)	5
No. de pieza	Número de veces que se realiza la operación simultáneamente	Código de manipulación automática de cinco dígitos	Eficiencia de orientación, OE	Costo relativo del alimentador, CR=FC+DC			Índice de alimentación máxima, FM		Índice de dificultad para alimentación automática, DI	Costo de la manipulación automática por pieza, CF=0.03xDF	Código de dos dígitos para la alimentación automática	Costo relativo del cabezal, WC	Índice de dificultad para la inserción automática, DI	Costo de la inserción automática por pieza, CI=0.06xDI	Costo de la operación en centavos de dólar (2)x[(8)+(12)]	Número teórico mínimo de piezas	Comentarios	
				FC	DC	CR	Y=Tamaño de la pieza	FM										
punta	1	22000	0.75	1	0	1	19.4	58	12	0.36	0.0.	1	12	0.72	1.08	1		
contenedor	1	22000	0.75	1	0	1	113	9.96	12	0.36	31	1.9	22.8	1.368	1.728	1		
cuerpo	1	25000	0.6	1	0	1	133	6.77	12	0.36	31	1.9	22.8	1.368	1.728	1		
tapón	1	12000	0.3	1	0	1	7.5	60	12	0.36	31	1.9	22.8	1.368	1.728	0		
reorientación para insertar tapa	1	0	0	0	0	0		0	0	0	98	1.5	18	1.08	1.08	0		
tapa	1	22000	0.75	1	0	1	57.2	19.7	12	0.36	30	1.2	14.4	0.864	1.224	1		
															8.568	4	Eficiencia = (0.09 x NM / CA) x (60/FR) =	0.504
															CA	NM		

Capítulo 2.- Evaluación de la eficiencia de ensamble considerando procesos mixtos

El método de análisis propuesto por Boothroyd [1, 2, 9] contempla los casos en que el proceso de ensamble se realiza en su totalidad de forma manual o de manera automática, dicho método como está planteado no permite la evaluación de los casos en los que se presenta una combinación de operaciones manuales y automáticas.

Se propone un método que posibilite la evaluación de procesos de ensamble con operaciones manuales y automáticas, utilizando las tablas presentadas por Boothroyd para la asignación de valores de tiempo y costo según las características de las piezas y del proceso de ensamble.

Tabla 2.1.- Combinaciones posibles para el proceso de ensamble.

	Manipulación	Inserción
1	Manual	Manual
2	Automática	Automática
3	Manual	Automática
4	Automática	Manual

2.1.- La eficiencia de ensamble en función de sus operaciones principales

De acuerdo a Boothroyd [1] el proceso de ensamble se encuentra formado por operaciones de manipulación y operaciones de inserción, por lo cual para poder evaluar la combinación de operaciones manuales y automáticas del proceso de ensamble (caso 3 y 4 de la Tabla 2.1), es necesario evaluar la manipulación e inserción de forma independiente. [1, 9]

Eficiencia de ensamble manual

Para un producto que se ensambla por medio de operaciones de manipulación e inserción manual, se tiene que su eficiencia de ensamble se puede evaluar por medio de la ecuación propuesta por Boothroyd [9], definida como:

$$\eta_{Manual} = \frac{3 NM}{TM} \quad (1)$$

Donde:

η_{Manual} = Eficiencia de ensamble manual

3 = Tiempo ideal de ensamble

NM = Número mínimo teórico de piezas

TM = Tiempo total de operación [Segundos]

Además el costo total de ensamble está dado como:

$$C_M = 0.4 * TM \quad (2)$$

Siendo:

C_M = Costo total del proceso de ensamble manual [Centavos]

Sustituyendo la ecuación (2) en (1), se tiene que la eficiencia de ensamble manual en términos de costo está dada como:

$$\eta_{Manual} = \frac{1.2 NM}{C_M} \quad (3)$$

Con el propósito de evaluar la eficiencia de los procesos de ensamble mixtos, se propone evaluar su eficiencia en términos de sus operaciones de manipulación e inserción, para la η_{Manual} tenemos:

$$\eta_{Manual} = \eta_{mm} + \eta_{im} \quad (4)$$

Donde:

η_{Manual} = Eficiencia de ensamble manual

η_{mm} = Fracción de la eficiencia correspondiente a la manipulación manual

η_{im} = Fracción de la eficiencia correspondiente a la inserción manual

De igual forma el costo total del ensamble manual se puede escribir como la suma del costo de manipulación más el costo de inserción, es decir:

$$C_M = C_{mm} + C_{im} \quad (5)$$

C_{mm} = Costo total de manipulación manual

C_{im} = Costo total de inserción manual

Al ser η_{mm} y η_{im} una parte de la η_{Manual} , la cual está dada como un porcentaje, es necesario escribir los costos de manipulación manual e inserción manual como un porcentaje del costo total de la operación de ensamble C_M .

Dividiendo entre C_M cada término de la ecuación (5) se tiene:

$$\frac{C_{mm}}{C_{mm} + C_{im}} + \frac{C_{im}}{C_{mm} + C_{im}} = 1 \quad (6)$$

Siendo $\%C_{mm}$ el porcentaje del costo de manipulación y $\%C_{im}$ el porcentaje del costo de inserción con respecto al costo total de operación, se tendría:

$$\%C_{mm} = \frac{C_{mm}}{C_{mm} + C_{im}} \quad (7)$$

$$\%C_{im} = \frac{C_{im}}{C_{mm} + C_{im}} \quad (8)$$

Con estas nuevas ecuaciones, se puede escribir η_{Manual} en términos de η_{mm} y η_{im} de la siguiente manera:

$$\eta_{Manual} = \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\frac{C_{mm}}{C_{mm} + C_{im}} \right) + \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\frac{C_{im}}{C_{mm} + C_{im}} \right) \quad (9)$$

De lo cual:

$$\eta_{mm} = \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\frac{C_{mm}}{C_{mm} + C_{im}} \right) \quad (10)$$

$$\eta_{im} = \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\frac{C_{im}}{C_{mm} + C_{im}} \right) \quad (11)$$

Eficiencia de ensamble automático

La ecuación para evaluar la eficiencia de ensamble automático propuesta en la metodología de Boothroyd [9], está definida como:

$$\eta_{Automático} = \frac{0.09 NM}{C_A} * \frac{60}{FR} \quad (12)$$

Donde:

$\eta_{Automático}$ = Eficiencia de ensamble automático

NM = Número mínimo teórico de piezas

C_A = Costo Total de la operación [Centavos]

FR = Número de piezas por minuto (Feed Rate)

Realizando un proceso similar al descrito para el ensamble manual, se analizó el proceso de ensamble automático en función de las dos operaciones que lo conforman, manipulación automática e inserción automática.

Siendo:

$$\eta_{Automático} = \eta_{ma} + \eta_{ia} \quad (13)$$

Donde:

η_{ma} = Fracción de la eficiencia correspondiente a la manipulación automática

η_{ia} = Fracción de la eficiencia correspondiente a la inserción automática

De la misma manera que en el caso de ensamble manual, se puede escribir el costo del proceso de ensamble automático como la suma del costo de la manipulación y el costo de inserción:

$$C_A = C_{ma} + C_{ia} \quad (14)$$

C_{ma} = Costo total de manipulación automática

C_{ia} = Costo total de inserción automática

Reacomodando la ecuación (14) y dividiendo entre C_A ambos lados, se tiene:

$$\frac{C_{ma}}{C_{ma} + C_{ia}} + \frac{C_{ia}}{C_{ma} + C_{ia}} = 1 \quad (15)$$

Tomando $\%C_{ma}$ como el porcentaje del costo de manipulación y $\%C_{ia}$ el porcentaje del costo de inserción con respecto al costo total de operación, se obtiene:

$$\%C_{ma} = \frac{C_{ma}}{C_{ma} + C_{ia}} \quad (16)$$

$$\%C_{ia} = \frac{C_{ia}}{C_{ma} + C_{ia}} \quad (17)$$

Reescribiendo la ecuación $\eta_{Automático}$ en función de η_{ma} y η_{ia} se consigue:

$$\eta_{Automático} = \frac{0.09 \text{ NM}}{C_A} * \frac{60}{FR} * \left(\frac{C_{ma}}{C_{ma} + C_{ia}} \right) + \frac{0.09 \text{ NM}}{C_A} * \frac{60}{FR} * \left(\frac{C_{ia}}{C_{ma} + C_{ia}} \right) \quad (18)$$

Obteniendo:

$$\eta_{ma} = \frac{0.09 \text{ NM}}{C_A} * \frac{60}{FR} * \left(\frac{C_{ma}}{C_{ma} + C_{ia}} \right) \quad (19)$$

$$\eta_{ia} = \frac{0.09 \text{ NM}}{C_A} * \frac{60}{FR} * \left(\frac{C_{ia}}{C_{ma} + C_{ia}} \right) \quad (20)$$

2.2.- Eficiencia en términos de las piezas individuales

Considerando las combinaciones mostradas en la Tabla 2.1 y analizando las ecuaciones (4) y (13), se nota que al tener manipulación o inserción manual necesariamente la manipulación o inserción automática, según sea el caso, no existirá. De igual forma al presentarse una manipulación automática la manipulación manual será inexistente, en el mismo sentido al tener inserción automática necesariamente no habrá inserción manual. En la Tabla 2.2 se muestran las combinaciones para cada uno de los casos posibles.

Tabla 2.2.- Operaciones de ensamble según sus combinaciones.

Combinaciones de las operaciones de ensamble	
1.- Manipulación e inserción manual	$\eta_{ma} = 0$ $\eta_{ia} = 0$
2.- Manipulación e inserción automática	$\eta_{mm} = 0$ $\eta_{im} = 0$
3.- Manipulación manual e inserción automática	$\eta_{ma} = 0$ $\eta_{im} = 0$
4.- Manipulación automática e inserción manual	$\eta_{mm} = 0$ $\eta_{ia} = 0$

De acuerdo a las combinaciones mostradas en la Tabla 2.2, se observa que se pueden tener procesos de ensamble en los cuales se tengan piezas que se manipulan e insertan ya sea manual o automáticamente, por lo que es necesario evaluar de manera independiente cada una de las piezas que conforman el ensamble en función de las operaciones a las que se encuentra sometida.

Eficiencia en términos de las piezas individuales en un ensamble manual

Con el fin de generalizar el proceso de evaluación se utilizó el término *i*-ésima para referirse a cualquier pieza del conjunto. Teniendo en cuenta que el costo de ensamble manual de la *i*-ésima pieza es la suma del costo de su manipulación e inserción se puede escribir:

$$C_{M_i} = C_{mm_i} + C_{im_i} \quad (21)$$

Donde:

$$C_{mm_i} = 0.4 * \#Op_i * T_{mm_i} \quad (22)$$

$$C_{im_i} = 0.4 * \#Op_i * T_{im_i} \quad (23)$$

Teniendo:

C_{M_i} = Costo de ensamble manual para la pieza *i*

C_{mm_i} = Costo de manipulación manual de la pieza *i*

C_{im_i} = Costo de inserción manual de la pieza i

$\#Op_i$ = Número de veces que la operación i se lleva a cabo consecutivamente

T_{mm_i} = Tiempo de manipulación manual de la pieza i

T_{im_i} = Tiempo de inserción manual de la pieza i

Los valores de Tiempo de manipulación manual y Tiempo de inserción manual son obtenidos de las tablas propuestas por Boothroyd y dependen de las características de las piezas y del proceso de ensamble.

Al ser C_{M_i} el costo de ensamble manual para la pieza i , se tiene que el costo total del proceso de ensamble C_M , está dado como la suma del costo individual de cada una de las piezas que conforman la totalidad del ensamble, por lo que:

$$C_M = \sum_{i=1}^n C_{M_i} \quad (24)$$

Con esta representación del costo total de ensamble en función del costo de ensamble de cada una de sus piezas, se puede escribir:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_{M_i}}{C_M} = 1 \quad (25)$$

De lo cual se nota que C_{M_i} es un porcentaje del costo total C_M , reescribiéndola en términos de las operaciones principales se tiene:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_{mm_i} + C_{im_i}}{C_M} = 1 \quad (26)$$

Separándola en función del costo de manipulación y el costo de inserción de la pieza i queda cómo:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_{mm_i}}{C_M} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{im_i}}{C_M} = 1 \quad (27)$$

Con esta nueva ecuación se puede escribir la ecuación (3) en términos de la i -ésima pieza, con lo que se obtiene:

$$\eta_{Manual} = \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{mm_i}}{C_M} \right) + \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{im_i}}{C_M} \right) \quad (28)$$

$$\eta_{Manual} = \sum_{i=1}^n \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\frac{C_{mm_i}}{C_M} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\frac{C_{im_i}}{C_M} \right) \quad (29)$$

Sustituyendo las ecuaciones (22) y (23) en la ecuación (29):

$$\eta_{Manual} = \sum_{i=1}^n \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\frac{0.4 * \#Op_i * T_{mm_i}}{C_M} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1.2 NM}{C_M} * \left(\frac{0.4 * \#Op_i * T_{im_i}}{C_M} \right) \quad (30)$$

Simplificando la ecuación anterior se tiene que la eficiencia de ensamble para un proceso manual en términos de la i -ésima pieza es:

$$\eta_{Manual} = \sum_{i=1}^n \frac{0.48 * \#Op_i * NM}{C_M^2} * (T_{mm_i} + T_{im_i}) \quad (31)$$

De lo cual:

$$\eta_{mm} = \sum_{i=1}^n \frac{0.48 * \#Op_i * NM}{C_M^2} * (T_{mm_i}) \quad (32)$$

$$\eta_{im} = \sum_{i=1}^n \frac{0.48 * \#Op_i * NM}{C_M^2} * (T_{im_i}) \quad (33)$$

Eficiencia en términos de las piezas individuales en un ensamble automático

Teniendo en cuenta que el costo de ensamble automático de la i -ésima pieza es la suma del costo de su manipulación e inserción multiplicado por el número de veces que se lleva a cabo la operación, se puede escribir:

$$C_{A_i} = (C_{ma_i} + C_{ia_i}) * \#Op_i \quad (34)$$

C_{A_i} = Costo de ensamble automático para la pieza i

C_{ma_i} = Costo de manipulación automático de la pieza i

C_{ia_i} = Costo de inserción automático de la pieza i

$\#Op_i$ = Número de veces que la operación se lleva a cabo consecutivamente

Los valores de costo de manipulación e inserción para ensamble automático son obtenidos de las tablas propuestas por Boothroyd y dependen de las características geométricas de las piezas y del proceso de ensamble.

Siendo el costo del proceso de ensamble manual automático igual a la suma del costo del ensamble automático de cada pieza del conjunto, se tiene:

$$C_A = \sum_{i=1}^n C_{A_i} \quad (35)$$

Por lo que se tiene que el costo de ensamble de una pieza del conjunto (C_{A_i}) es una fracción del costo total, siendo:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_{A_i}}{C_A} = 1 \quad (36)$$

Sustituyendo la ecuación (34) en la ecuación anterior y reescribiéndola en términos del costo de sus operaciones principales queda:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(C_{ma_i} + C_{ia_i}) * \#Op_i}{C_A} = 1 \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{(C_{ma_i}) * \#Op_i}{C_A} + \sum_{i=1}^n \frac{(C_{ia_i}) * \#Op_i}{C_A} = 1 \quad (38)$$

Usando esta ecuación se puede escribir la eficiencia de ensamble de un proceso automático (ecuación 12) en término de la i -ésima pieza, con lo que se obtiene:

$$\eta_{Automático} = \frac{0.09 NM}{C_A} * \frac{60}{FR} * \left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{ma_i}) * \#Op_i}{C_A} \right) + \frac{0.09 NM}{C_A} * \frac{60}{FR} * \left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{ia_i}) * \#Op_i}{C_A} \right) \quad (39)$$

$$\eta_{Automático} = \sum_{i=1}^n \frac{0.09 NM}{C_A} * \frac{60}{FR} * \left(\frac{(C_{ma_i}) * \#Op_i}{C_A} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{0.09 NM}{C_A} * \frac{60}{FR} * \left(\frac{(C_{ia_i}) * \#Op_i}{C_A} \right) \quad (40)$$

Simplificando la ecuación anterior se tiene que la eficiencia de ensamble para un proceso automático en términos de la i -ésima pieza es:

$$\eta_{Automático} = \sum_{i=1}^n \frac{5.4 * NM * \#Op_i}{C_A^2 * FR} * (C_{ma_i} + C_{ia_i}) \quad (41)$$

Separándola en función de la eficiencia de las operaciones de manipulación e inserción:

$$\eta_{ma} = \sum_{i=1}^n \frac{5.4 * NM * \#Op_i}{C_A^2 * FR} * (C_{ma_i}) \quad (42)$$

$$\eta_{ia} = \sum_{i=1}^n \frac{5.4 * NM * \#Op_i}{C_A^2 * FR} * (C_{ia_i}) \quad (43)$$

2.3.- Eficiencia total como suma de las fracciones de aporte individuales

Para poder evaluar la eficiencia de un proceso de ensamble mixto que contemple tanto operaciones manuales como operaciones automáticas es necesario evaluar la contribución que realiza cada pieza a la eficiencia total del procesos de ensamble, de forma que se pueda evaluar cada elemento de acuerdo a la combinación de operaciones que presente, véase Tabla 2.1.

Suma de las fracciones de aporte individuales para un proceso manual

De las ecuaciones (32) y (33) desarrolladas en la sección anterior, se observa que esta forma de evaluar la eficiencia de ensamble permite la identificación de la proporción que aporta cada pieza de manera individual a la eficiencia total del proceso, lo cual da la ventaja de reconocer las piezas con mayores posibilidades de ser mejoradas, por lo que la fracción que aporta la i -ésima pieza a la eficiencia total del proceso de ensamblado se puede escribir cómo:

$$\eta_{M_i} = \eta_{mm_i} + \eta_{im_i} \quad (44)$$

Siendo:

$$\eta_{mm_i} = \frac{0.48 * \#Op_i * NM * T_{mm_i}}{C_M^2} \quad (45)$$

$$\eta_{im_i} = \frac{0.48 * \#Op_i * NM * T_{Im_i}}{C_M^2} \quad (46)$$

Donde:

η_{M_i} = Fracción de aporte de la pieza i a la eficiencia de ensamble manual

η_{mm_i} = Fracción de aporte de la pieza i correspondiente a su manipulación manual

η_{im_i} = Fracción de aporte de la pieza i correspondiente a su inserción manual

NM = Número mínimo teórico de piezas

Por lo que la ecuación (31) sería equivalente a la suma de las fracciones de aporte de cada pieza i a la eficiencia del proceso de ensamblado:

$$\eta_{Manual} = \sum_{i=1}^n \eta_{M_i} \quad (47)$$

Suma de las fracciones de aporte individuales para un proceso automático

De la misma forma que en el proceso manual, esta forma de evaluación nos permite el análisis de manera individual de cada una de las piezas, donde la contribución de la i -ésima pieza a la eficiencia de ensamble total es:

$$\eta_{A_i} = \eta_{ma_i} + \eta_{ia_i} \quad (48)$$

De lo cual:

$$\eta_{ma_i} = \frac{5.4 * NM * \#Op_i}{C_A^2 * FR} * (C_{ma_i}) \quad (49)$$

$$\eta_{ia_i} = \frac{5.4 * NM * \#Op_i}{C_A^2 * FR} * (C_{ia_i}) \quad (50)$$

Donde:

η_{A_i} = Fracción de aporte de la pieza i a la eficiencia de ensamble automática

η_{ma_i} = Fracción de aporte de la pieza i correspondiente a su manipulación automática

η_{ia_i} = Fracción de aporte de la pieza i correspondiente a su inserción automática

NM = Número mínimo teórico de piezas

Por lo que la ecuación (41) es semejante a la suma de las fracciones de aporte de cada una de las piezas del proceso de ensamble automático:

$$\eta_{Automático} = \sum_{i=1}^n \eta_{A_i} \quad (51)$$

Suma de las fracciones de aporte individuales para un proceso de ensamble mixto

La participación de la i -ésima pieza en la eficiencia total del proceso de ensamble mixto, está dada como la suma de las fracciones de aporte de las operaciones manuales y/o automáticas a las que se encuentra sometida, esto es:

$$\eta_{Mixto_i} = \eta_{M_i} + \eta_{A_i} \quad (52)$$

En donde:

η_{Mixto_i} = Fracción de aporte de la pieza i a la eficiencia de ensamble mixto

Escribiendo cada termino en función de la fracción de aporte de sus operaciones principales:

$$\eta_{Mixto_i} = (\eta_{mm_i} + \eta_{im_i}) + (\eta_{ma_i} + \eta_{ia_i}) \quad (53)$$

Dado que las fracciones de contribución de la pieza i a la eficiencia de ensamble manual (η_{M_i}) y automático (η_{A_i}), están en función del costo total del proceso manual o automático según sea el caso, es necesario escribir η_{M_i} en función del costo total del proceso mixto (C_{Mixto}), siendo este:

$$C_{Mixto} = C_M + C_A \quad (54)$$

Sustituyendo las ecuaciones (45, 46, 49 y 50) en la ecuación (53) y reescribiéndola en términos del costo total del proceso de ensamble mixto (C_{Mixto}), se tiene:

$$\eta_{Mixto_i} = \left(\frac{0.48 * \#Op_i * NM * T_{mm_i}}{C_{Mixto}^2} + \frac{0.48 * \#Op_i * NM * T_{Im_i}}{C_{Mixto}^2} \right) + \left(\frac{5.4 * NM * \#Op_i * (C_{ma_i})}{C_{Mixto}^2 * FR} + \frac{5.4 * NM * \#Op_i * (C_{ia_i})}{C_{Mixto}^2 * FR} \right) \quad (55)$$

Se puede observar que esta ecuación es útil para evaluar cada una de las combinaciones posibles de las operaciones de ensamble mostradas en la Tabla 2.2. Generalizando la ecuación de la fracción de aporte de la i -ésima pieza a la eficiencia total del proceso mixto, para cada uno de los elementos del ensamble mixto, se obtiene:

$$\eta_{Mixto} = \sum_{i=1}^n \eta_{Mixto_i} \quad (56)$$

Remplazando la ecuación (55) en la ecuación (56) se tiene que la eficiencia total de un proceso de ensamble formado por una combinación de operaciones manuales y automáticas es:

$$\eta_{Mixto} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{0.48 * \#Op_i * NM * T_{mm_i}}{C_{Mixto}^2} + \frac{0.48 * \#Op_i * NM * T_{Im_i}}{C_{Mixto}^2} \right) + \left(\frac{5.4 * NM * \#Op_i * (C_{ma_i})}{C_{Mixto}^2 * FR} + \frac{5.4 * NM * \#Op_i * (C_{ia_i})}{C_{Mixto}^2 * FR} \right) \right] \quad (57)$$

2.4.- Ejemplo de aplicación del análisis DFA Mixto

Usando las ecuaciones propuestas en la sección anterior, se retomó el ejemplo propuesto en la Figura 1.12 y se realizó un análisis para un proceso de ensamble en el que se contemplan tanto operaciones manuales como automáticas, para este análisis se retoman las consideraciones utilizadas para el análisis manual y el análisis automático, con el agregado que para el caso mixto, las operaciones de manipulación se suponen manuales y las inserciones automáticas, los resultados son mostrados en la Tabla 2.3.

En la Tabla 2.3, la sección de manipulación automática no contiene valores ya que estos corresponden a la manipulación manual, así mismo la inserción tomará los valores del caso automático.

En la columna “Fracción de aporte de la pieza a la eficiencia de operaciones manuales” se encuentra evaluada la fracción que aporta la pieza i a la eficiencia de ensamble manual descrita en la ecuación (44), mientras que en la columna “Fracción de aporte de la pieza a la eficiencia de operaciones automáticas” se evalúa la ecuación (48). En ambos casos al tratarse de un proceso mixto se evalúan con respecto al costo total del proceso combinado siendo este la suma del costo de operaciones manuales y automáticas de todo el conjunto, que en este caso en particular con las condiciones establecidas el costo total del proceso de ensamble mixto es de 9.74 centavos de dólar.

La suma de las fracciones de aporte de cada una de las piezas que conforman el ensamble da como resultado la eficiencia total del proceso de ensamble mixto descrita en la ecuación (57) de la sección anterior. De acuerdo a las condiciones descritas, el análisis del proceso de ensamble mixto usando las ecuaciones propuestas se tiene una eficiencia de ensamble para el bolígrafo del 45.86%.

Tabla 2.3.- Eficiencias de ensamble para un proceso mixto.

Operaciones de ensamble automático											Índice requerido para el ensamble FR (por minuto)	5			
1	2	3	4	5			6		7	8	9	10	11	12	13
No. de pieza	Número de veces que se realiza la operación simultáneamente	Código de manipulación automática de cinco dígitos	Eficiencia de orientación, OE	Costo relativo del alimentador, CR=FC+DC			Índice de alimentación máxima, FM		Índice de dificultad para alimentación automática, DF	Costo de la manipulación automática por pieza, CF=0.03xDF	Código de dos dígitos para la alimentación automática	Costo relativo del cabezal, WC	Índice de dificultad para la inserción automática, DI	Costo de la inserción automática por pieza, CI=0.06xDI	Costo de la operación en centavos de dólar (2)x[(8)+(12)]
				FC	DC	CR	Y=Tamaño de la pieza	FM							
punta	1									0	0.0.	1	12	0.72	0.72
contenedor	1									0	31	1.9	22.8	1.368	1.368
cuerpo	1									0	31	1.9	22.8	1.368	1.368
tapón	1									0	31	1.9	22.8	1.368	1.368
reorientación para insertar tapa	1									0	98	1.5	18	1.08	1.08
tapa	1									0	30	1.2	14.4	0.864	0.864
														6.768	
														CA	

Operaciones de ensamble manual								
14	15	16	17	18	19	20	21	22
Código de manipulación	Tiempo de manipulación	Código de inserción	Tiempo de inserción	Tiempo de operación	Costo de la manipulación	Costo de la inserción	Costo de la operación	Número teórico mínimo de piezas
10	1.5			1.5	0.6		0.6	1
0	1.13			1.13	0.452		0.452	1
10	1.5			1.5	0.6		0.6	1
11	1.8			1.8	0.72		0.72	0
				0	0		0	0
10	1.5			1.5	0.6		0.6	1
				7.43			2.972	4
				TM			CM	NM

Eficiencia de las operaciones mixtas				
23	24	25	26	27
Costo de la operación	Aporte de la pieza a la eficiencia de las operaciones manuales	Aporte de la pieza a la eficiencia de las operaciones automáticas	Contribución de la pieza a la eficiencia total del proceso	Comentarios
1.32	0.0304	0.0328	0.0631	
1.82	0.0229	0.0623	0.0852	
1.968	0.0304	0.0623	0.0927	
2.088	0.0364	0.0623	0.0987	
1.08	0	0.0492	0.0492	
1.464	0.0304	0.0393	0.0697	
9.74			0.4586	
Costo total			Eficiencia del diseño	

El análisis de la eficiencia de ensamble mixto en el ejemplo presentado, permite observar que el método de evaluación propuesto funciona de manera adecuada, por lo que el siguiente paso será evaluar un proceso de ensamble mixto en sus condiciones reales de ejecución.

Capítulo 3.- Análisis de la eficiencia de un proceso de ensamble mixto real

Para la realización del análisis de la eficiencia de un proceso de ensamble mixto, se contó con el apoyo de la empresa Bocar que permitió la observación del proceso de ensamble de dos bombas de aceite (modelo R1 y A4, véase Figura 3.1) fabricadas para Volkswagen y Audi.

Como es habitual en diversos procedimientos de ensamble industriales, el proceso de ensamble utilizado en Bocar para las bombas de aceite, se compone de operaciones manuales y automáticas en diferentes piezas y etapas del proceso. Al tratarse de un proceso de ensamble mixto es necesario utilizar las ecuaciones desarrolladas en el capítulo anterior para evaluar la eficiencia de ensamble de sus operaciones combinadas.

Con las observaciones realizadas y los datos proporcionados por la empresa Bocar, se realizó el análisis de la eficiencia de ensamble para las dos bombas de aceite.



Figura 3.1.- Bombas de aceite modelo R1 y A4.

3.1.- Análisis del proceso de ensamble mixto para la bomba de aceite modelo R1

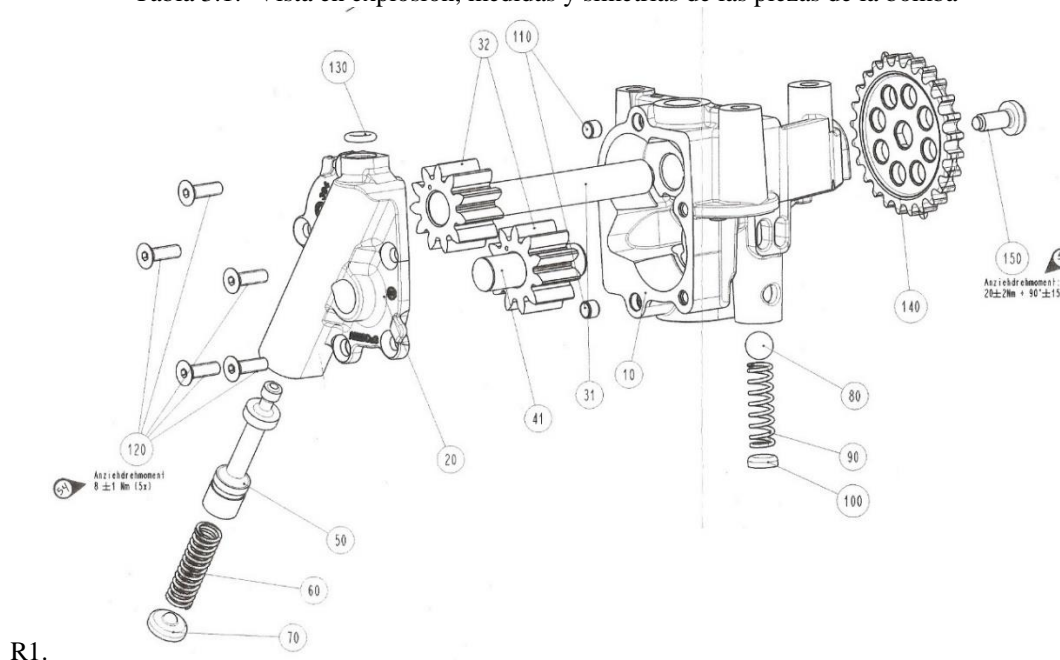
El proceso mediante el cual se ensambla la bomba R1 es un conjunto de operaciones manuales y automáticas para las actividades de manipulación e inserción, por lo cual se aplicaron las ecuaciones para la evaluación de procesos mixtos para cada una de las piezas que forman la bomba.

Para la asignación de los costos de cada operación de ensamble de acuerdo a sus características, se incluye una breve descripción de las operaciones de manipulación e inserción de los componentes.

3.1.1.- Descripción de las operaciones de ensamble Bomba R1

En la Tabla 3.1 se encuentra un diagrama con una vista en explosión de la bomba R1, así como el nombre y las dimensiones necesarias para la evaluación de cada una de sus piezas.

Tabla 3.1.- Vista en explosión, medidas y simetrías de las piezas de la bomba



R1.

Número de Pieza	120	70	60	50	20	130	41	32	31	110	10	100	90	80	140	150
Longitud [mm]	20	19	25	76	122	14.6	56	42	124	8	118	14	37.5	13	75.5	28
Espesor [mm]	11.8	8	16.7	17	28.2	3	16	22.9	16	6	100	5	13	13	8.57	15.6

Simetría de Bomba 1	120	70	60	50	20	130	41	32	31	110	10	100	90	80	140	150
α	360	360	180	360	360	180	180	360	360	180	360	360	180	0	360	360
β	0	0	0	0	360	0	0	0	0	0	360	0	0	0	360	0
$\alpha+\beta$	360	360	180	360	720	180	180	360	360	180	720	360	180	0	720	360

La pieza nombrada *tapa de cuerpo* identificada en el diagrama de la Tabla 3.1 con el número {20}, es tomada por un operador que coloca en ella el *O-Ring* {130}, para posteriormente trasladar este *subensamble tapa-O-ring* a una máquina (prensa), en la cual se realizarán otras operaciones. El *subensamble tapa-O-ring* se asegura a la prensa, en donde el operador toma el *tapón* {70} y lo coloca en la prensa a la espera de su inserción. Las piezas *pistón* {50} y *resorte* {60} son tomadas e insertadas en el *subensamble tapa-O-ring* de forma manual por un operador; una vez que estas piezas se encuentran en su lugar se aseguran mediante la inserción automática del *tapón* {70} con la ayuda de la prensa. Una vez aseguradas las piezas, este *subensamble tapa-piezas* se coloca en un rack para llevarlo a otra sección del área de ensamble.¹

Para la formación del *subensamble Cuerpo-piezas* el operador toma de forma manual el *cuerpo* {10} de la bomba y lo coloca en una prensa, dentro de esta prensa el operador pone los dos *taponos de centrado* {110} y el *tapón 2* {100} para su futura inserción automática. Mediante operaciones manuales se coloca la *esfera* y el *resorte 2* en sus posiciones correspondientes y se aseguran por medio de la inserción a presión del *tapón 2*. La inserción automática de los *taponos de centrado* y el *tapón 2* se realizan en diferentes direcciones, ya que el *tapón 2* se inserta en línea recta de arriba hacia abajo y los *taponos de centrado* se insertan en línea recta por uno de los costados del cuerpo de la bomba.² El *subensamble Cuerpo-piezas* se sitúa en el rack junto al *subensamble tapa-piezas*.

El *subensamble eje largo* y el *subensamble eje corto*, se realizan en otra sección del área de ensamblado con la ayuda de una prensa hidráulica en la cual se pueden asegurar los dos subensambles de manera simultánea; el operador comienza tomando un *engrane* {32} y lo coloca en uno de los dos espacios de la prensa para a continuación tomar un *engrane* {32} y ponerlo en el espacio correspondiente. De igual manera el operador toma los *ejes* {31} y {41}, y los ubica dentro de la prensa en posición vertical de forma tal que la inserción a presión de los ejes dentro de su engrane respectivo se realiza en línea recta descendente.³ Ambos subensambles se mantienen en la prensa a la espera de ser utilizados en operaciones posteriores.

En la siguiente etapa se unen los cuatro subensambles hasta ahora terminados para formar el *subensamble cuerpo-ejes-tapa*, el operador coge el rack en el que se encuentra el *subensamble cuerpo-piezas* que servirá como base para el resto de las operaciones. El operador toma el *subensamble eje largo* que se encuentra en la prensa y lo coloca en el cuerpo de la bomba para a continuación realizar el mismo procedimiento con el *subensamble eje corto*.⁴ El *subensamble tapa-piezas* se coloca sobre el cuerpo de la bomba mediante operaciones manuales, asegurando los ejes y engranes en su sitio.

¹ Una vez terminado el subensamble Tapa-Piezas se le realizan pruebas para verificar su correcto funcionamiento y se hace una marca que sirve para identificar esta pieza durante el proceso de ensamblado. Este tipo de operaciones no se considera parte del proceso de ensamble, ya que no se agrega o asegura alguna pieza y las operaciones realizadas no interfieren con los procedimientos necesarios para la finalización del ensamblado del producto.

² Se aplica lubricante y se verifica que los componentes se encuentren en su sitio.

³ La inserción de los ejes {31} y {41} en sus respectivos engranes se realiza de forma simultánea en la misma prensa con un movimiento descendente en línea recta.

⁴ Con los ejes y engranes colocados en su sitio el operador hace pruebas de giro para comprobar su funcionamiento.

Una vez con el *subensamble cuerpo-ejes-tapa* terminado, el operario lo reubica llevándolo al alimentador de tornillos, en el cual se suministra e inserta de manera automática los cinco *tornillos* {120} que fijan la tapa al cuerpo de la bomba.

Con todas las piezas del *subensamble cuerpo-ejes-tapa* fijas en su lugar correspondiente, el operador lleva a todo el conjunto a una máquina en la que asegura el *engrane* {140} y se realizan pruebas del funcionamiento de la bomba. El operador sujeta el *engrane* {140} y lo inserta en el extremo libre del *eje largo* {31} que sobresale del *subensamble cuerpo-ejes-tapa*, en seguida toma el *tornillo de engrane* {150} y lo posiciona a la espera de ser asegurado en una operación de atornillado posterior, la máquina realiza el *atornillado* usando un torquimetro automático, en esta misma máquina se realizan pruebas de succión de aceite para garantizar el correcto funcionamiento de la bomba.⁵

El procedimiento descrito se realiza para una producción de 52 piezas por hora, con lo cual se tiene una razón de alimentación (Feed Rate FR) de 0.86 piezas por minuto.

⁵ Una vez terminado el ensamble de la bomba se graba en ella la fecha y hora de producción, para posteriormente prepararla para su embalaje.

3.1.2.- Criterios de eliminación o combinación para las piezas de la bomba R1

El análisis de cada pieza en el ensamble permite decidir cuál de ellas es candidata a ser eliminada o combinada con alguna otra pieza del ensamble. Para determinar el número mínimo teórico de piezas (NM), en la columna 22 de la Tabla 3.2 se muestran los resultados de la aplicación de los lineamientos de eliminación y combinación de la metodología DFA (véase página 8). La aplicación de dichos criterios para las piezas, subensambles y operaciones que resultaron candidatos a eliminación, combinación o sustitución fue como sigue:

1. *Subensamble Tapa-O-Ring.*- La realización de este subensamble y su reorientación manual no es necesaria, ya que se puede evitar hacer este subensamble y su respectiva reorientación haciendo todo el proceso con la pieza *tapa* {20} asegurada en la prensa e insertar el *O-Ring* y las demás piezas en la *tapa* para formar el *subensamble Tapa-piezas*. Al colocar la *tapa* de la bomba en la prensa, se sugiere posicionar de forma vertical para que el *resorte* y *pistón* no requieran de una sujeción posterior para mantener su posición una vez insertadas en su sitio, el poner la *tapa* de la bomba de manera vertical también favorece a la dirección de inserción del *tapón*, ya que al insertarse por medio de una operación automática está se beneficia al realizarse en un movimiento en línea recta descendente.
2. *Tapones de centrado.*- La función de estas piezas es permitir una orientación más rápida de la cubierta al momento de colocarla sobre el cuerpo de la bomba, pero debido a que es una pieza pequeña, su manipulación es complicada. La fijación de los tapones de centrado se realiza a presión lo cual aumenta el costo de inserción. De acuerdo a los criterios de eliminación o combinación de piezas, los tapones de centrado se pueden integrar a la cubierta de la bomba o al cuerpo de la misma ya que no es necesario que sean de un material diferente que la pieza a la que se insertan.

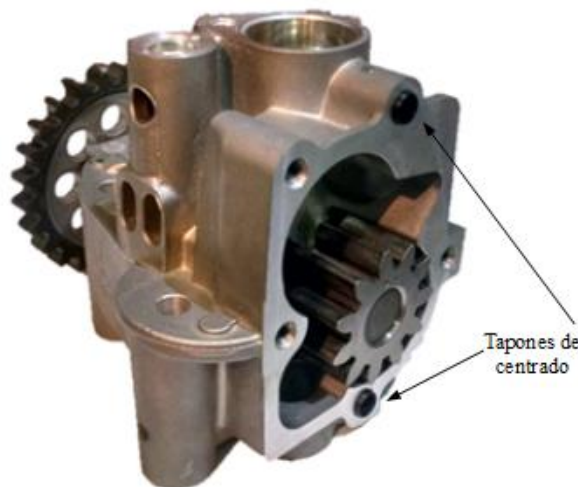


Figura 3.2.- Tapones de centrado en el cuerpo de la bomba.

3. *Ejes y engranes.*- Analizando los elementos *engrane* {32} y *eje largo* {31} se observa que no presentan un movimiento relativo entre sí y de acuerdo a los criterios de eliminación y combinación de piezas dichos elementos pueden ser del mismo material, por lo que se sugiere combinar ambas piezas para formar una sola, la pieza resultado de esta combinación sería el *Subensamble eje largo*. Con los componentes *eje corto* {41} y *engrane* {32} se presenta la misma situación, por lo que se propone fusionar el *eje corto* {41} con su *engrane* {32} formando un solo elemento que corresponde al *Subensamble eje corto*.
4. *Tornillos de tapa.*- El proceso de ensamblado de los tornillos es el procedimiento más costoso de todo el conjunto. Las operaciones de manipulación e inserción de esta pieza se realizan de forma automática, dando como resultado un costo de 9.55 centavos de dólar. Debido a que se necesitan 5 tornillos el costo total de esta operación es de 47.7 centavos de dólar. De acuerdo a Boothroyd al tratarse de elementos de sujeción separados deben ser considerados para eliminación, combinación o sustitución por algún otro método de sujeción. Se aconseja el uso de elementos de sujeción tipo snap-fit. [9, 15].

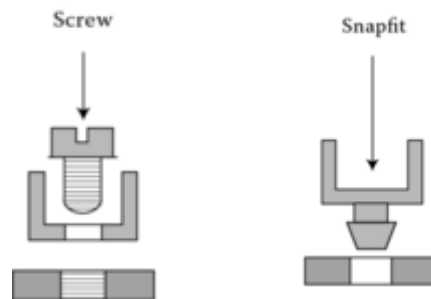


Figura 3.3.- Elementos de sujeción externos. [1]

5. *Reorientación.*- Las reorientaciones son una de las actividades más costosas dentro de la metodología DFA y debido a que es una actividad que no aporta algún otro componente al ensamble, se sugiere de ser posible su eliminación.
6. *Tornillo de engrane.*- Al ser un elemento de sujeción externa es una pieza candidata a ser eliminada o sustituida por algún otro método de sujeción. Se recomienda utilizar sujetadores tipo snap-fit o proveer de una rosca para una operación de atornillado entre el eje y el engrane.
7. *Atornillado.*- Con la eliminación del *tornillo del engrane* se elimina la necesidad de un proceso de atornillado posterior.

Además de la eliminación y combinación de piezas, este método de análisis permite la identificación de aquellos elementos que requieran de un mayor costo para ser ensamblados, las piezas que resulten con un costo excesivo deben ser examinadas en busca de disminuir el costo de sus operaciones de ensamble.

De acuerdo a los resultados obtenidos y siguiendo las recomendaciones para la eliminación de las piezas no indispensables y la disminución del costo del proceso de ensamble de las piezas imprescindibles, se presenta el análisis del proceso de ensamble de acuerdo a las recomendaciones establecidas.

Tabla 3.3.- Análisis de ensamble mixto del rediseño la bomba R1.

Operaciones de ensamble automático													0.867			
1	2	3	4	5			6		7	8	9	10	11	12	13	
				FC	DC	CR	Y=Tamaño de la pieza	FM								
Subensamble Tapa - Piezas																
20	Tapa de cuerpo	1														
130	O-Ring	1														
70	Tapón	1								34	3.6	249.2	14.95385	14.95		
50	Pistón	1														
60	Resorte	1														
Subensamble Tapa - Piezas																
Se realizan pruebas de funcionamiento y se marca la pieza																
Subensamble Cuerpo - Piezas																
10	Cuerpo	1														
100	Tapón 2	1								44	4.8	332.3	19.93846	19.94		
80	Esfera	1														
90	Resorte 2	1														
Subensamble Cuerpo - Piezas																
Se realizan pruebas de succión																
Se realizan pruebas de giro libre, prueba de succión de la bomba, lubricación de engranes																
Subensamble cuerpo-ejes-tapa																
Subensamble Cuerpo - Piezas																
Subensamble eje largo																
Subensamble eje corto																
Subensamble Tapa - Piezas																
Subensamble cuerpo-ejes-tapa																
120	Snapfit de la tapa	5	21000	0.9	1	0	1	20	67.5	69.23	2.077	30	1.2	83.08	4.984615	35.31
Reorientación de todo el conjunto																
140	Engrane sinterizado	1														
150	Snapfit engrane	1														
Se realizan pruebas de giro libre, balanceo, prueba de succión de la bomba, graba fecha y hora																
														70.2		
														CA		

Operaciones de ensamble manual										
14	15	16	17	18	19	20	21	22		
Código de manipulación	Tiempo de manipulación	Código de inserción	Tiempo de inserción	Tiempo de operación	Costo de la manipulación	Costo de la inserción	Costo de la operación	Número teórico mínimo de piezas		
30	1.95	0.6	5.5	7.45	0.78	2.2	2.98	1		
0.1	1.43	30	2	3.43	0.57	0.8	1.37	1		
10	1.5			1.5	0.6	0	0.6	1		
10	1.5	0.0	1.5	3	0.6	0.6	1.2	1		
0.0	1.13	0.0	1.5	2.63	0.45	0.6	1.05	1		
		98	9	9	0	3.6	3.6	0		
				0	0	0	0			
				0	0	0	0			
30	1.95	0.0	1.5	3.45	0.78	0.6	1.38	1		
11	1.8			1.8	0.72	0	0.72	1		
0.1	1.43	0.0	1.5	2.93	0.57	0.6	1.17	1		
0.0	1.13	0.0	1.5	2.63	0.45	0.6	1.05	1		
		98	9	9	0	3.6	3.6	0		
				0	0	0	0			
				0	0	0	0			
				0	0	0	0			
30	1.95	0.0	1.5	3.45	0.78	0.6	1.38	1		
10	1.5	0.0	1.5	3	0.6	0.6	1.2	1		
10	1.5	0.0	1.5	3	0.6	0.6	1.2	1		
30	1.95	0.3	3.5	5.45	0.78	1.4	2.18	1		
		98	9	9	0	3.6	3.6	0		
				0	0	0	0			
				0	0	0	0			
				0	0	0	0			
30	1.95	0.0	1.5	3.45	0.78	0.6	1.38	1		
10	1.5	30	2	3.5	0.6	0.8	1.4	0		
				0	0	0	0			
				0	0	0	0			
							34.7	14		
				TM			CM	NM		

Eficiencia de las operaciones mixtas					
23	24	25	26	27	
Costo de la operación	Aporte de la pieza a la eficiencia de las operaciones manuales	Aporte de la pieza a la eficiencia de las operaciones automáticas	Contribución de la pieza a la eficiencia total del proceso	Comentarios	
2.98	0.01254	0	0.01254	Proceso manual	
1.37	0.00577	0	0.00577	Proceso manual	
15.6	0.00253	0.11861	0.12114	Manipulación manual e inserción automática	
1.2	0.00505	0	0.00505		
1.05	0.00443	0	0.00443		
3.6	0.01515	0	0.01515	Sólo manipulación manual, sacar de la máquina y poner en el rack	
0	0	0	0		
0	0	0	0		
1.38	0.00581	0	0.00581		
20.7	0.00303	0.15815	0.16118	Manipulación manual e inserción automática	
1.17	0.00493	0	0.00493		
1.05	0.00443	0	0.00443		
3.6	0.01515	0	0.01515		
0	0	0	0		
0	0	0	0		
0	0	0	0		
1.38	0.00581	0	0.00581		
1.2	0.00505	0	0.00505		
1.2	0.00505	0	0.00505		
2.18	0.00917	0	0.00917		
3.6	0.01515	0	0.01515	Reorientación manual	
35.3	0	0.28006	0.28006	L=19.8, D=11.6; Long cylinder=1.71;2	
3.6	0.01515	0	0.01515	Al eliminar el tornillo del engrane, es necesario girar el conjunto para insertar el engrane siguiente	
1.38	0.00581	0	0.00581		
1.4	0.00589	0	0.00589		
0	0	0	0		
105	0.11906	0.27677	0.70273		
COSTO			Eficiencia del diseño		

Resumen de los cambios en el diseño de la bomba R1

Comparando entre si los resultados de los análisis mostrados en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3, se observa que el realizar los cambios sugeridos para el rediseño de la bomba representa un ahorro de 53 centavos de dólar por pieza, manteniendo una producción de 52 piezas por hora, (Feed Rate = 0.86 piezas por minuto).

Tabla 3.4.- Resumen de los cambios sugeridos de rediseño de la bomba R1.

Cambios en el diseño	Pieza asociada al cambio
1.- Cambios en el secuencia de ensamble y eliminación de una reorientación	Subensamble Tapa-O-Ring, tapa, O-Ring, resorte, pistón.
2.- Combinación de los tapones de centrado con el cuerpo de la bomba	Tapones de centrado, cuerpo de bomba
3.- Combinación de engrane y eje largo	Engrane y eje largo
4.- Combinación de engrane y eje corto	Engrane y eje corto
5.- Sustitución de tonillos por elementos snapfit y eliminación del atornillado	Tornillos de tapa y tornillos de engrane

En el rediseño de la Bomba R1 se tiene una mejora de la eficiencia de ensamble pasando de un 42.6% de la bomba original a un 70.2% con los cambios propuestos para el rediseño de la bomba.

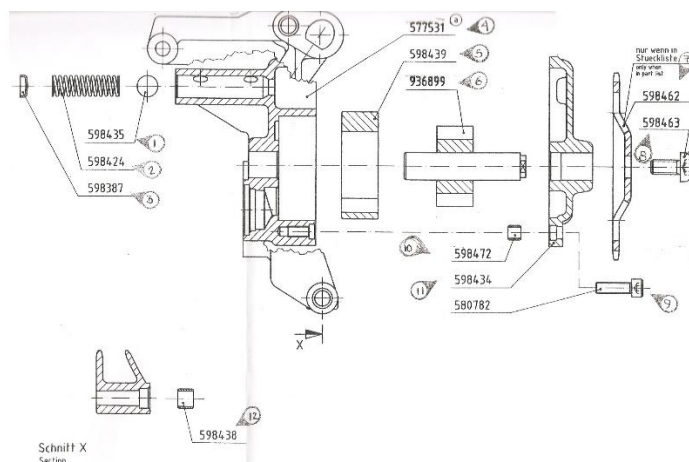
3.2.- Análisis del proceso de ensamble mixto para la bomba de aceite modelo A4

A continuación se describe el proceso por el cual se ensambla la bomba A4, en la Tabla 3.5, se encuentra el diagrama con la vista en explosión de las piezas que forman la bomba, el número de identificación de cada pieza, sus medidas principales y su simetría alfa y beta correspondiente.

3.2.1.- Descripción de las operaciones de ensamble Bomba A4

Para comenzar el ensamblado de la bomba A4 un operador toma el *cuerpo* de la bomba, el cual está identificado en el diagrama de la Tabla 3.5 con el código {577531}, el operador sujeta el *cuerpo* y coloca en él la *esfera* {598436} y el *resorte* {598436}, formando así el *Subensamblado Cuerpo-Piezas 1*, este subensamblado es transportado por el operador hacia una prensa.

Tabla 3.5.- Vista en explosión, medidas y simetrías de la bomba A4.



Número de Pieza	59838 7	59842 4	59843 6	598438	57753 1	59843 9	93689 9	57748 4	598472	59843 4	58078 2	59846 2	59846 3	06A 115 251	909 450	
Nombre de la pieza	Tapón	Resorte	Esfera	Centrado	Cuerpo 577885	Rotor exterior	Engrane	Eje	Centrado	Tapa	Tornillo de tapa	Catalina 038 115 121	Tornillo Catalina	Tubo de succión	Tornillo de tubo	O-Ring
Longitud [mm]	12	38	8	6.7	138.5	58.15	43.67	67	8	104.5	25.85	96.3	28	152.75	27.1	18
Espesor [mm]	4	8	8	6	90	19.96	19.96	15	6	24	9.89	10	16	56.78	14.2	3

Simetría de piezas bomba A4	59838 7	59842 4	59843 6	598438	57753 1	59843 9	93689 9	57748 4	93689 9	598472	59843 4	58078 2	59846 2	59846 3	06A 115 251	909 450	
	Tapón	Resorte	Esfera	Centrado	Cuerpo	Rotor exterior	Engrane	Eje	Centrado	Tapa	Tornillo de tapa	Catalina 038 115 121	Tornillo Catalina	Tubo de succión	Tornillo de tubo	O-Ring	
α	360	180	0	180	360	360	360	360	360	180	360	360	360	360	360	360	360
β	0	0	0	0	360	0	0	0	0	360	0	0	0	360	0	0	0
$\alpha+\beta$	360	180	0	180	720	360	360	360	360	180	720	360	360	720	360	360	360

Para formar el *Subensamble Cuerpo-Piezas All*, el operador coloca en la prensa el *tapón* {598387} y los *taponos de centrado* {598472} esperando su inserción automática posterior. Una vez con las piezas en la prensa el operador toma el *Subensamble Cuerpo-Piezas I* y lo asegura en la prensa, con todos los elementos en su sitio se realiza la inserción del *tapón* con ayuda de la prensa con un movimiento en línea recta de arriba hacia abajo, la dirección del movimiento para la inserción de los *taponos de centrado* es en línea recta por uno de los costados del *cuerpo* de la bomba.

Cuando el *Subensamble Cuerpo-Piezas All* está terminado se lleva a otra área para continuar con el proceso, el operador toma y orienta el *rotor exterior* {598439}, (se aceita antes de insertar) y lo ubica dentro de este subensamble, para después continuar con la realización del *Subensamble Engrane-Eje*, para ello se hace uso de una prensa hidráulica en la cual el operador sitúa el *engrane* {577484} y en seguida coloca el *eje* {936899} en posición vertical, de manera que este *eje* se inserta a presión en el *engrane* {577484}. El *Subensamble Engrane-Eje* se saca de la prensa y se posiciona dentro del *Subensamble Cuerpo-Piezas All*.

El conjunto hasta el momento ensamblado se lleva a otra sección del área de trabajo en donde por medio de operaciones manuales se incorpora la *tapa* {598434}, el operador coloca los *tornillos de tapa* {580782} en un su sitio y quedan a la espera de ser asegurados en una operación de *atornillado* posterior la cual se realiza de forma automática.

Una vez que todas las piezas están aseguradas en su sitio, el operador toma este ensamble y lo traslada a otra máquina, en esta sección las piezas *catarina* {598462} y *tornillo de catarina* {598463} son agregadas de forma manual al ensamble para a continuación ser fijadas en su posición por medio de una operación de *atornillado* automático.⁶

Para terminar el ensamble de la bomba A4 el operador lleva el conjunto hacia otra área, ahí toma el *O-Ring* y el *tubo de succión* {06A 115 251} y los coloca en su sitio correspondiente dentro del ensamble. El operador sitúa los *tornillos del tubo* {909450} mientras sujeta el *tubo de succión* para mantener su posición, estos *tornillos del tubo* se aseguran posteriormente⁷. Este procedimiento se realiza para una producción de 78 piezas por hora.

⁶ Se realiza la lubricación de los *engranes* además se hacen pruebas de giro libre, de igual forma en esta sección se realizan pruebas de succión para verificar el funcionamiento de la bomba.

⁷ Los *tornillos del tubo* se aprietan de manera automática para después verificar su sujeción con el torquimetro manual. En esta etapa final del proceso se hace una prueba de giro no forzado, para finalmente sacar la bomba de la máquina y colocarla en una bolsa para su embalaje.

Tabla 3.6.- Análisis de ensamble mixto de la bomba A4.

Operaciones de ensamble automático											Índice requerido para el ensamble FR (por minuto)	1.3					
1 No. de pieza	2 Número de veces que se realiza la operación manual	3 Código de manipulación automática de cinco dígitos	4 Eficiencia de orientación, OE	5 Costo relativo del alimentador, CR=FC+DC			6 Índice de alimentación máxima, FM		7 Índice de dificultad para alimentación automática, DF	8 Costo de la manipulación automática por pieza, CE=0.034DE	9 Código de dos dígitos para la alimentación automática	10 Costo relativo del cabezal, WC	11 Índice de dificultad para la inserción automática, DI	12 Costo de la inserción automática por pieza, CI=0.068DI	13 Costo de la operación en centavos de dólar chileno		
				FC	DC	CR	Y=Tamaño de la pieza	FM									
Subensamble Cuerpo-Piezas 1																	
Cuerpo 577885	1												0	0	0		
Esfera	1												0	0	0		
Resorte	1												0	0	0		
Subensamble Cuerpo-Piezas 1	1												0	0	0		
Subensamble Cuerpo-Piezas All													0	0	0		
Tapón	1									34	3.6	166.2	9.96923	9.969			
Centrado	4									41	2.1	96.92	5.81538	23.26			
Subensamble Cuerpo-Piezas 1	1												0	0	0		
Subensamble Cuerpo-Piezas All	1												0	0	0		
Rotor exterior	1												0	0	0		
Subensamble Engrane-Eje													0	0	0		
Engrane	1												0	0	0		
Eje	1									31	1.9	87.69	5.26154	5.262			
Subensamble Engrane-Eje	1												0	0	0		
Reorientar	1												0	0	0		
Tapa	1												0	0	0		
Tornillo de tapa	5												0	0	0		
Atornillado	5									92	0.8	36.92	2.21538	11.08			
Reorientar	1												0	0	0		
Catarina 038 115 121	1												0	0	0		
Tornillo catarina	1												0	0	0		
Atornillado	1									92	0.8	36.92	2.21538	2.215			
Se realizan pruebas de giro libre, prueba de succión de la bomba, lubricación de engranes															0	0	0
Reorientar	1												0	0	0		
O-Ring	1												0	0	0		
Tubo de succión	1												0	0	0		
Tornillos de tubo	2												0	0	0		
Atornillado	2									92	0.8	36.92	2.21538	4.431			
Se realizan pruebas de giro libre, prueba de succión de la bomba, lubricación de engranes															0	0	0
														56.22			
														CA			

Operaciones de ensamble manual									
14 Código de manipulación	15 Tiempo de manipulación	16 Código de inserción	17 Tiempo de inserción	18 Tiempo de operación	19 Costo de la manipulación	20 Costo de la inserción	21 Costo de la operación	22 Número teórico mínimo de piezas	
30	1.95	0.6	5.5	7.45	0.78	2.2	2.98	1	
0.1	1.43	0.0	1.5	2.93	0.572	0.6	1.172	1	
0.5	1.84	0.0	1.5	3.34	0.736	0.6	1.336	1	
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
				0	0	0	0		
11	1.8			1.8	0.72	0	0.72	1	
0.1	1.43			1.43	2.288	0	2.288	0	
30	1.95	0.0	1.5	3.45	0.78	0.6	1.38	0	
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
10	1.5	0.0	1.5	3	0.6	0.6	1.2	1	
				0	0	0	0		
10	1.5	0.0	1.5	3	0.6	0.6	1.2	0	
10	1.5			1.5	0.6	0	0.6	0	
10	1.5	0.2	2.5	4	0.6	1	1.6	1	
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
30	1.95	0.2	2.5	4.45	0.78	1	1.78	1	
10	1.5	0.0	1.5	3	3	3	6	0	
				0	0	0	0	0	
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
10	1.5	0.0	1.5	3	0.6	0.6	1.2	1	
10	1.5	0.0	1.5	3	0.6	0.6	1.2	0	
				0	0	0	0	0	
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
0.3	1.69	0.0	1.5	3.19	0.676	0.6	1.276	1	
30	1.95	0.6	5.5	7.45	0.78	2.2	2.98	1	
10	1.5	0.0	1.5	3	1.2	1.2	2.4	0	
				0	0	0	0	0	
				0	0	0	0	0	
							104		
							TM		CM NM

Eficiencia de las operaciones mixtas				
23 Costo de la operación	24 Aporte de la pieza a la eficiencia de las operaciones manuales	25 Aporte de la pieza a la eficiencia de las operaciones automáticas	26 Contribución de la pieza a la eficiencia total del proceso	27 Comentarios
2.98	0.003	0	0.003	Inserción manual
1.172	0.001	0	0.001	Proceso Manual
1.336	0.001	0	0.001	Proceso Manual
3.6	0.004	0	0.004	Reorientación
0	0	0	0	
10.69	8E-04	0.037	0.038	Inserción automática
25.55	0.002	0.087	0.089	Inserción automática
1.38	0.001	0	0.001	Asegurarlo
3.6	0.004	0	0.004	
1.2	0.001	0	0.001	Proceso Manual
0	0	0	0	
1.2	0.001	0	0.001	
5.862	6E-04	0.02	0.02	
1.6	0.002	0	0.002	Proceso Manual
3.6	0.004	0	0.004	
1.78	0.002	0	0.002	Proceso Manual
6	0.006	0	0.006	
11.08	0	0.041	0.041	Atornillado automático posterior
3.6	0.004	0	0.004	
1.2	0.001	0	0.001	Proceso Manual
1.2	0.001	0	0.001	Proceso Manual
2.215	0	0.008	0.008	Atornillado automático posterior
0	0	0	0	
3.6	0.004	0	0.004	
1.276	0.001	0	0.001	Proceso Manual
2.98	0.003	0	0.003	Proceso Manual
2.4	0.003	0	0.003	Se colocan los tornillos para ser asegurados después en la máquina
4.431	0	0.017	0.017	Las piezas ya están en su lugar, sólo se atornillan
0	0	0	0	
105.5			0.263	
Costo			Eficiencia del diseño	

3.2.2.- Criterios de eliminación o combinación para las piezas de la bomba A4

El razonamiento para determinar si un elemento del ensamble es candidato a eliminación o combinación de acuerdo a la aplicación de los criterios para la determinación del número mínimo teórico de piezas (NM), dio como resultado que las piezas y procesos susceptibles de mejora son los siguientes:

1. *Subensamble Cuerpo-Piezas 1*.- Se propone cambiar el orden del proceso de ensamble y comenzar colocando el *cuerpo* de la bomba en la prensa y una vez asegurada la pieza en dicha máquina agregar la *esfera* y el *resorte*, este cambio en el orden de ensamblado es favorable ya que en el proceso de ensamble original la *esfera* y el *resorte* son agregadas al *cuerpo*, para formar el subensamble llamado *Subensamble Cuerpo-Piezas 1*, para después transportar este subensamble a la prensa. Realizar el ensamble de las piezas con el *cuerpo* de la bomba asegurado en la prensa desde el inicio elimina la necesidad de la reorientación del *Subensamble Cuerpo-Piezas 1* y su posterior montaje dentro de la prensa.
2. *Tapones de centrado*.- De acuerdo a los criterios de eliminación o combinación de piezas, se recomienda integrar los dos *tapones de centrado* al *cuerpo* o a la *tapa* de la bomba, de esta forma se disminuiría el costo total del proceso de ensamblado, ya que el costo de ensamble de los dos *tapones de centrado* es de 18.6 centavos de dólar.
3. *Eje y Engrane*.- Analizando estos elementos de acuerdo a los criterios para determinar el número teórico de piezas se observa que no existe movimiento relativo entre ellos y pueden ser del mismo material, por lo que se propone formar un sólo elemento con ambas piezas, este nuevo componente sería el llamado *Subensamble Engrane-Eje*.
4. *Reorientación*.- Durante el ensamblado de la bomba se realizan diversas operaciones de reorientación lo que aumenta el costo del proceso, se recomienda la eliminación de este tipo de operaciones ya que no agregan ningún componente al conjunto, de no ser posible su eliminación se sugiere la disminución del número de veces que se realiza.
5. *Tornillos*.- Para los elementos de sujeción externa (*tornillos de tapa*, *tornillos de catarina*, *tornillos de tubo*) es aconsejable su eliminación o en su defecto la sustitución por métodos de sujeción más simples como los elementos *snapfit*, esto con el objetivo de disminuir el costo total de la operación [1]. El costo de las operaciones de ensamble para un sujetador *snapfit* es de 1.4 centavos de dólar por pieza el cual supera a los 1.2 centavos de la manipulación y colocación en su sitio para cada uno de los *tornillos*, esto se debe a que los *tornillos* solo son colocados en sitio sin ser asegurados quedando a la espera de la operación de *atornillado* y los elementos *snapfit* son asegurados inmediatamente lo cual hace innecesario el *atornillado* posterior.
6. *Atornillado*.- Al sustituir los *tornillos* por elementos *snap-fit* la operación de *atornillado* posterior se vuelve innecesaria, lo cual significa un ahorro de 2.21

centavos de dólar por cada *tornillo* sustituido, este ahorro compensa el ligero aumento del costo de las operaciones de ensamblado de los elementos *snapfit*.

Tabla 3.7.- Análisis de ensamble mixto del rediseño la bomba A4.

Operaciones de ensamble automático												Índice requerido para el ensamble FR (por minuto)	1.3		
1	2	3	4	5			6		7	8	9	10	11	12	13
No. de pieza	Número de veces que se realiza la operación	Código de manipulación automática de cinco dígitos	Eficiencia de orientación, OE	Costo relativo del alimentador, CR=FC+DC			Índice de alimentación máxima, FM		Índice de dificultad para alimentación automática, DF	Costo de la manipulación automática por pieza, CE=0.033DE	Código de dos dígitos para la alimentación automática	Costo relativo del cabezal, WC	Índice de dificultad para la inserción automática, DI	Costo de la inserción automática por pieza, CI=0.068DI	Costo de la operación en centavos de dólar, CDA
				FC	DC	CR	Y=Tamaño de la pieza	FM							
Subensamble Cuerpo-Piezas All													0	0	0
Cuerpo 577885	1												0	0	0
Esfera	1												0	0	0
Resorte	1												0	0	0
Tapón	1										34	3.6	166.2	9.96923	9.969
Subensamble Cuerpo-Piezas All	1												0	0	0
Rotor exterior	1												0	0	0
Subensamble Engrane-Eje	1												0	0	0
Reorientar	1												0	0	0
Tapa	1												0	0	0
Snapfit de tapa	5												0	0	0
Reorientar	1												0	0	0
Catarina 038 115 121	1												0	0	0
Snapfit catarina	1												0	0	0
Se realizan pruebas de giro libre, prueba de succión de la bomba, lubricación de engranes												0	0	0	
Reorientar	1												0	0	0
O-Ring	1												0	0	0
Tubo de succión	1												0	0	0
Snapfit de tubo	2												0	0	0
Se realizan pruebas de giro libre, prueba de succión de la bomba, lubricación de engranes												0	0	0	
														9.969	
														CA	

Operaciones de ensamble manual									
14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Código de manipulación	Tiempo de manipulación	Código de inserción	Tiempo de inserción	Tiempo de operación	Costo de la manipulación	Costo de la inserción	Costo de la operación	Número teórico mínimo de piezas	
				0	0	0	0		
30	1.95	0.0.	1.5	3.45	0.78	0.6	1.38	1	
0.1	1.43	0.0.	1.5	2.93	0.572	0.6	1.172	1	
0.5	1.84	0.0.	1.5	3.34	0.736	0.6	1.336	1	
11	1.8			1.8	0.72	0	0.72	1	
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
10	1.5	0.0.	1.5	3	0.6	0.6	1.2	1	
10	1.5	0.2	2.5	4	0.6	1	1.6	1	
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
30	1.95	0.2	2.5	4.45	0.78	1	1.78	1	
10	1.5	30	2	3.5	3	4	7	0	
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
10	1.5	0.0.	1.5	3	0.6	0.6	1.2	1	
10	1.5	30	2	3.5	0.6	0.8	1.4	0	
				0	0	0	0		
		98	9	9	0	3.6	3.6	0	
0.3	1.69	0.0.	1.5	3.19	0.676	0.6	1.276	1	
30	1.95	0.6	5.5	7.45	0.78	2.2	2.98	1	
10	1.5	30	2	3.5	1.2	1.6	2.8	0	
				0	0	0	0		
				83.11			40.24	10	
				TM			CM	NM	

Eficiencia de las operaciones mixtas				
23	24	25	26	27
Costo de la operación	Aporte de la pieza a la eficiencia de las operaciones manuales	Aporte de la pieza a la eficiencia de las operaciones automáticas	Contribución de la pieza a la eficiencia total del proceso	Comentarios
0	0	0	0	
1.38	0.007	0	0.007	Inserción manual
1.172	0.006	0	0.006	Proceso Manual
1.336	0.006	0	0.006	Proceso Manual
10.69	0.003	0.164	0.168	Inserción automática
3.6	0.017	0	0.017	Verificar proceso de ensamble
1.2	0.006	0	0.006	Proceso Manual
1.6	0.008	0	0.008	Proceso Manual
3.6	0.017	0	0.017	
1.78	0.008	0	0.008	Proceso Manual
7	0.033	0	0.033	
3.6	0.017	0	0.017	
1.2	0.006	0	0.006	Proceso Manual
1.4	0.007	0	0.007	Proceso Manual
0	0	0	0	
3.6	0.017	0	0.017	
1.276	0.006	0	0.006	Proceso Manual
2.98	0.014	0	0.014	Proceso Manual
2.8	0.013	0	0.013	Se colocan los tornillos para ser asegurados despues en la máquina
0	0	0	0	
50.21			0.356	
Costo			Eficiencia del diseño	

Resumen de los cambios en el diseño de la bomba A4

En el caso de la bomba A4 los cambios propuestos para su rediseño suponen un beneficio de 55.3 centavos de dólar con una producción de 78 piezas por hora (Feed Rate = 1.3 piezas por minuto), este ahorro se debe a que en el análisis del proceso original se tiene un costo de 105.5 centavos por pieza y en el rediseño de la bomba el costo disminuye a 50.2 centavos manteniendo la misma tasa de producción. Este ahorro en el costo del proceso de ensamble es mayor al 50% del costo del proceso original.

En términos de la eficiencia del ensamble, el rediseño presenta una eficiencia de 35.6% contra el 26.3% obtenido en el análisis del ensamble original.

Tabla 3.8.- Resumen de los cambios sugeridos de rediseño de la bomba A4.

Cambios en el diseño	Pieza asociada al cambio
1.- Cambios en el secuencia de ensamble y eliminación de una reorientación	Subensamble Cuerpo-Piezas 1, cuerpo, esfera, resorte, pistón.
2.- Combinación de los tapones de centrado con el cuerpo de la bomba	Tapones de centrado, cuerpo de bomba
3.- Combinación de engrane y eje largo	Engrane y eje largo
4.- Combinación de engrane y eje corto	Engrane y eje corto
5.- Sustitución de tonillos por elementos snapfit y eliminación del atornillado	Tornillos de tapa y tornillos de engrane

3.3.- Conclusiones

En este trabajo se presentó una propuesta para la evaluación de la eficiencia de los procesos de ensamble que se realizan mediante la combinación de operaciones manuales y automáticas. Para los valores de los tiempos y costos de las operaciones de ensamble se toma como base el sistema de clasificación de la metodología DFA de Boothroyd.

El método tradicional de Boothroyd ha sido utilizado por muchos años en la industria, lo cual ha demostrado su efectividad cuando los procesos son totalmente manuales o totalmente automáticos. La propuesta presentada permite la aplicación de la evaluación de la facilidad de ensamble para procesos mixtos, tomando como base el sistema de clasificación del método DFA de Boothroyd.

Se muestra el desarrollo de las ecuaciones para la evaluación de los procesos de ensamble mixto y su aplicación en el caso de estudio de dos bombas de aceite considerando las condiciones reales de su proceso de ensamblado. El método de análisis mostrado permite estudiar de manera individual cada una de las piezas que forman el producto e identificar las piezas o procesos susceptibles de mejora, esto representa el punto de partida para el diseñador para generar propuestas de rediseño con el objetivo de aumentar la eficiencia y disminuir el costo del proceso de ensamble.

Las propuestas de rediseño generadas para los casos de estudio se evaluaron con las ecuaciones para el análisis de la eficiencia de ensamble de procesos mixtos. Los resultados de los análisis del proceso de ensamble original y del rediseño evidencian la utilidad de aplicar la metodología DFA al tiempo que se muestra la posibilidad de analizar y evaluar procesos de ensamble que combinan operaciones manuales y operaciones automáticas.

El incremento de la eficiencia y la reducción del costo del proceso de ensamble no son los únicos beneficios que acarrea el uso de la metodología DFA, otros factores presentan mejoras pero medir el ahorro en esas áreas es muy complicado, por ejemplo, al eliminarse una pieza del ensamble se tienen ahorros en la eliminación de documentos (planos y especificaciones) relacionados a la pieza, menor manejo de inventario, reducción de los gastos de producción de las piezas y disminución de gastos en almacenaje.

Con esto se tiene que el método de análisis propuesto para procesos de ensamble que se componen de una mezcla de operaciones manuales y automáticas puede ser utilizado para analizar el diseño, identificar las dificultades de ensamble y estimar el costo total del proceso, así como comparar diferentes diseños a fin de dar al diseñador una herramienta que lo ayude a crear y elegir la mejor opción de acuerdo a los requerimientos de volumen de producción, personal, maquinaria y equipo disponible.

Trabajo a futuro

Los resultados obtenidos han probado la efectividad del método propuesto. Para realizar la validación de esta propuesta es necesario aplicarla a una mayor variedad de casos de estudio en productos con diferentes tipos de operaciones manuales y automáticas en su proceso de ensamble, con una mayor diversidad en la cantidad de piezas que forman el producto y en la complejidad del procedimiento de ensamblado. Esto con el objetivo de evaluar la eficiencia de las diversas situaciones posibles en los procesos de ensamble mixtos y verificar el alcance de la metodología propuesta.

Dentro de esta línea de investigación se recomienda el desarrollo de un sistema de clasificación especializado en los procesos de ensamble mixtos, esto con el objetivo de contar con una herramienta especializada y dedicada al análisis de este tipo de procesos de ensamble, ya que la propuesta actual se basa en el uso de los sistemas de clasificación desarrollados para procesos que se realizan totalmente de forma manual o automática, por lo que se puede considerar como una extensión al uso de la metodología de análisis de Diseño para Ensamble.

Para el desarrollo del sistema de clasificación para los procesos de ensamble mixtos, se sugiere el análisis de numerosos procesos de ensamble en los cuales se haga uso de operaciones manuales y automáticas de manera combinada, esto para identificar las operaciones y factores que intervienen en este tipo de procesos y la manera en que influye cada operación en la eficiencia total del proceso.

Apéndice A

Procedimiento para el análisis de ensamble manual por la metodología DFA de Boothroyd. [9, 16]

PASO 1. Obtener la mejor información acerca del producto o ensamble.

Algunas ayudas son:

- Planos
- Vistas explosivas tridimensionales
- Un producto existente
- Un prototipo

PASO 2. Se debe desensamblar (o imaginar cómo se podría desensamblar), asignando un número a cada pieza, conforme se retira. Si el producto contiene subensambles, estos se deben tratar primero como piezas y posteriormente analizarlos por separado.

PASO 3. Se debe de llenar la hoja de trabajo (Tabla A1)

PASO 4. Se comienza el reensamble del producto. Primero se ensambla la pieza con el más alto número de identificación, añadiendo las piezas restantes una por una. Para utilizar correctamente este procedimiento de análisis, nunca se debe asumir que se puede sujetar una pieza en cada mano, y ensamblarlas antes de colocarlas en el ensamble. Se debe llenar una fila en la hoja de trabajo para cada pieza, cada columna se detalla a continuación:

Columna 1 En esta se anota el número de pieza.

Columna 2 Se anota el número de veces que se realiza la operación.

Columna 3 Se indica el código de dos dígitos de manejo de la pieza, a partir de la Tabla 1.1.

Columna 4 El tiempo de manejo de la pieza se obtiene de la Tabla 1.1.

Columna 5 El código del proceso de inserción se obtiene de la Tabla 1.2.- Inserción manual - Tiempos estimados (segundos) [9].

Columna 6 El tiempo de inserción se obtiene de la Tabla 1.2.

Columna 7 El tiempo total en segundos es calculado por medio de la suma de los tiempos de manejo y de inserción de las columnas (4) y (6) y multiplicando esta suma por el número de operaciones de la columna (2).

Columna 8 El costo total de operación en centavos se obtiene por la multiplicación del tiempo de operación de la columna (7) por el costo de ensamble manual en centavos por segundo.

Columna 9 Es en esta columna donde se indica el número mínimo de piezas teórico para el ensamble. Esta columna implica ya un rediseño de la pieza, para determinar esto, se deben responder las siguientes preguntas:

1. Durante la operación del producto, ¿esta pieza se mueve relativamente con respecto a otras piezas ensambladas? Solamente se deben de considerar los movimientos grandes, ya que los pequeños que se pueden lograr con articulaciones elásticas no representarían una respuesta positiva.

2. ¿La pieza debe ser de un material distinto o permanecer aislada de las otras piezas del ensamble? Solamente se aceptan razones concernientes con las propiedades de los materiales.

3. ¿La pieza debe estar separada de las otras porque de otra manera el ensamble o desensamble sería imposible?

Si la respuesta a alguna de estas preguntas es SI, entonces se debe de colocar un número "1" en la columna (9), excepto el caso en el que se han indicado múltiples operaciones en la columna (2), en cuyo caso el número de piezas debe ser separado y colocado en la columna (9).

PASO 5. Cuando se han completado todas las columnas (el reensamble se ha concluido) los números de la columna (7) se suman para obtener el tiempo total estimado para el ensamble manual. Los de la columna (8) se suman para obtener el costo total del ensamble y los de la columna (9) para obtener el número mínimo teórico de piezas para completar el ensamble.

PASO 6. Finalmente, la eficiencia del ensamble manual se obtiene al sustituir los datos obtenidos de la hoja de trabajo en la siguiente ecuación:

$$\eta_{Manual} = \frac{3 NM}{TM}$$

En donde:

EM: Eficiencia del ensamble manual.

NM: Número mínimo de piezas teórico.

TM: Tiempo total del ensamble manual.

Esta ecuación compara el tiempo estimado de ensamble para un producto que contenga el número mínimo de piezas de las cuales cada una puede ser ensamblada en el tiempo ideal de 3 segundos. Este tiempo ideal se obtiene al asumir que cada pieza es fácil de sujetar y de insertar. Además, aproximadamente un tercio de las piezas se aseguran inmediatamente en la inserción.

Apéndice B

Procedimiento para el análisis de ensamble automático por la metodología DFA de Boothroyd. [9]

PASO 1. Obtener la mejor información acerca del producto o ensamble.

Algunas ayudas son:

- Planos
- Vistas explosivas tridimensionales
- Un producto existente
- Un prototipo

PASO 2. Se debe desensamblar (o imaginar cómo se podría desensamblar), asignando un número a cada pieza, conforme se retira. Si el producto contiene subensambles, estos se deben tratar primero como piezas y posteriormente analizarlos por separado.

PASO 3. Se debe de llenar la hoja de trabajo (Tabla A1)

PASO 4. Se comienza el reensamble del producto. Primero se ensambla la pieza con el más alto número de identificación, añadiendo las piezas restantes una por una.. Se debe llenar una fila en la hoja de trabajo para cada pieza, el procedimiento para llenar cada columna se detalla a continuación:

Columna 1 En esta se anota el número de pieza.

Columna 2 Se anota el número de veces que se realiza la operación.

Columna 3 Se indica el código de cinco dígitos para la alimentación y orientación de la pieza, usando las tablas Tabla 1.5 y Tabla 1.6, según sea el caso. Esta columna determina los datos para la columna 4 y 5.

Columna 4 Eficiencia de orientación OE.

Columna 5 CR

Columna 6 Se calcula la tasa máxima de alimentación (FM). Siendo Y= La dimensión del lado más largo de la pieza.

$$FM = 1500 * \frac{OE}{Y}$$

Columna 7 Se calcula el índice de dificultad para la alimentación automática, para lo cual se tienen las ecuaciones:

$$DF = \frac{60}{FR} * CR \quad \text{Sí: } FR < FM$$

$$DF = \frac{60}{FM} * CR \quad \text{Sí: } FR \geq FM$$

Columna 8 Se calcula el costo para la alimentación y orientación de la pieza (CF), mediante la ecuación: $CF = 0.03 * DF$

Columna 9 De acuerdo a las características de inserción de la pieza, se obtiene el código de inserción de dos dígitos apropiado usando la Tabla 1.8.

Columna 10 De la Tabla 1.8 se obtiene el costo relativo del cabezal de inserción (WC).

Columna 11 Se calcula el nivel de dificultad para la inserción automática (DI) mediante la ecuación:

$$DI = \frac{60}{FR} * WC \quad \text{Sí: } FR < 60$$

$$DI = WC \quad \text{Sí: } FR \geq 60$$

Columna 12 Se calcula el costo de inserción (CI). $CI = 0.06 * DI$

Columna 13 Se calcula el costo total de las operaciones (CA) de ensamble automático (alimentación y orientación, inserción). Para lo cual se suman los datos de la columna 8 y 12, multiplicando el resultado de esta suma por el número de veces que se realiza la operación (Columna 2).

$$CA = \text{Columna 2} * (\text{Columna 8} + \text{Columna 12})$$

Columna 14 En esta columna se indica el número mínimo teórico de piezas para el ensamble, para ello se aplican los tres criterios de eliminación o combinación de piezas.

PASO 5. Se continúa evaluando cada pieza del ensamble, hasta que la evaluación de la última pieza se haya realizado.

PASO 6 Se obtiene el total del costo del proceso de ensamble automático (CA) y el número mínimo teórico de piezas (NM), para lo cual se suma la columna 13 y 14 respectivamente.

PASO 6. Finalmente, la eficiencia del ensamble automático se obtiene al sustituir los datos obtenidos en la siguiente ecuación:

$$\eta_{Automático} = \frac{0.09 NM}{C_A} * \frac{60}{FR}$$

Donde:

$\eta_{Automático}$ = Eficiencia de ensamble automático

NM = Número mínimo teórico de piezas

C_A = Costo Total de la operación [Centavos]

FR = Número de piezas por minuto (Feed Rate)

La constante 0.09 es el costo de usar un alimentador estándar por un segundo (0.03 centavos) más el costo de usar un cabezal estándar por un segundo (0.06 centavos)

Bibliografía

- [1] G. Boothroyd, P. Dewhurst and W. Knight, *Product Design for Manufacture and Assembly*, Third Edition ed., Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [2] G. Boothroyd, *Assembly automation and product design*, Second Edition ed., Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [3] Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de nuevos productos*, Quinta edición, México, Mc Graw Hill, 2013.
- [4] G.J. Kim, G.A. Bekey, *Design for assembly (DFA) by Reverse Engineering*, *Artificial Intelligence in Design*: 717-734, 1994.
- [5] Jesús M. Dorador, *Product and process information interactions in assembly decision support systems*. Loughborough, Loughborough University, 2001.
- [6] Munro and Associates, Inc., 911 West Big Beaver Road, Troy, MI 48084.
- [7] D. Whitney, *Mechanical Assemblies, Their Design, Manufacture and role in product Development*, New York: Oxford University Press, 2004.
- [8] George Dieter, *Engineering Design*, Mac Graw Hill, 1983.
- [9] G. Boothroyd and P. Dewhurst, *Product Design for Assembly*, Rhode Island, Bothroyd Dewhurst Inc, 1991.
- [10] M. Socorro Armenta, *Creación de un modelo del producto para asistir en la evaluación de la facilidad de ensamble*, Tesis. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2003.
- [11] W. Karger, F.H. Bayha, *Engineered Work Measurement*, Industrial Press, Inc. New York, 1966.
- [12] Jesús M. Dorador, *Aplicación de técnicas de diseño para ensamble en el desarrollo de una impresora Braille*, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería.
- [13] W.V Tipping, *Component and Product Design for Mechanized Assembly*, Conference on Assembly, Fastening and joining Techniques and Equipment, Production Engineering Research Association, England, 1965.
- [14] S.P. Baldwin, *How to Make Sure of Easy Assembly*, *Tool and Manufacturing Engineering*, May 1966, p. 67.
- [15] G. Boothroyd, A.H. Redford, *New Automatic feeding and orienting system*, London, Taylor and Francis Ltd, 1971.
- [16] Pedro A. Pérez Olivas, *Aplicación del diseño para ensamble en el rediseño de una bomba axial acuícola*, Tesis. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2011.