

Aplicación de la ingeniería concurrente orientada a la fabricación de una herramienta para la extracción tuerca-corona en una excavadora

Application of concurrent engineering oriented to the manufacture of a tool for the extraction of a crown nut on an excavator

Milton Fabián Coba-Salcedo ¹, Guillermo Vanegas-Rojas ², Lisandro Vargas-Henríquez ^{3a}, Alfonso Rodríguez-Peña ^{3b}

¹ Grupo de Investigación DIMER, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Colombia.
Orcid: 0000-0002-2436-5536. Correo electrónico: miltoncoba@mail.uniatlantico.edu.co

² Empresa Austing Ingenieros, Barranquilla, Colombia. Correo electrónico: guillermov@austing.com.co

³ Grupo de Investigación IMTEF, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Colombia.
Orcid: ^a 0000-0002-0967-957X, ^b 0000-0002-2928-6044.

Correos electrónicos: ^a lisandrovargas@mail.uniatlantico.edu.co, ^b alfonsorodriguez1@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 20 enero, 2020. Aceptado: 10 octubre, 2020. Versión final: 18 noviembre, 2020.


Resumen

El artículo presenta la aplicación de la Ingeniería Concurrente integrando el diseño para la calidad (QFD) y el diseño para la manufactura y ensamble (DFMA), en la fabricación de una herramienta mecánica para el desmonte de una turca-corona de una excavadora sobre orugas. El estudio se desarrolló debido a la necesidad que tuvo el Departamento de Mantenimiento de una empresa de extracción de carbón, en desarmar una transmisión de propulsión de la excavadora hidráulica RH340B para reparar alguna de sus partes en mal estado. El análisis se basó en que el diseño de esta herramienta cumpliera con las especificaciones del torque necesario para el desarme del sistema. Se concluye que a través de los métodos aplicados da como resultado un diseño de 26 piezas, con valores aceptables en la eficiencia del ensamble y en el factor de complejidad. Además, la herramienta fabricada fue de gran ayuda para desarmar el mando final, pues su fabricación local consiguió que se ahorrara casi un 75% de los costos de inversión que exigía la adquisición de una herramienta original de TEREX|O&K.

Palabras clave: DFMA; ingeniería concurrente; QFD; tuerca-corona.

Abstract

The article presents the application of Concurrent Engineering integrating design for quality (QFD) and design for manufacture and assembly (DFMA), in the manufacture of a mechanical tool for the dismantling of a Turkish crown from a crawler excavator. The study was developed due to the need that the Maintenance Department of a coal extraction company had in disassembling a propulsion transmission of the hydraulic excavator RH340B to repair some of its parts in bad condition. The analysis was since the design of this tool met the specifications of the torque required for the disassembly of the system. It is concluded that through the applied methods it results in a design of 26 pieces,

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, CC BY-ND 4.0 

Como citar: M. F. Coba-Salcedo, G. R. Vanegas-Rojas, L. Vargas-Henríquez, A. Rodríguez-Peña, "Aplicación de la ingeniería concurrente orientada a la fabricación de una herramienta para la extracción tuerca-corona en una excavadora," *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 1, pp. 197-212, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n1-2021017](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021017)

with acceptable values in the efficiency of the assembly and in the complexity factor. In addition, the manufactured tool was of great help in disassembling the final control, since its local manufacture achieved savings of almost 75% of the investment costs required by the acquisition of an original TEREX|O&K tool.

Keywords: DFMA; concurrent engineering; QFD; crown-nut.

1. Introducción

La ingeniería concurrente también conocida como ingeniería simultánea, reemplaza el enfoque tradicional secuencial de diseño y fabricación de productos por un enfoque simultáneo en paralelo más organizados con menos procesos vinculados en serie [1], permitiendo mejorar el proceso de diseño de nuevos productos, del inglés New Product Process Design (NPPD) y las capacidades competitivas. Con una adecuada integración de las técnicas, Despliegue de la Función de Calidad también llamado Análisis de necesidades y expectativas o QFD (Quality Function Deployment) y Diseño para la Manufactura y Ensamble (también conocido como DFMA, Design for Manufacturing and Assembly), muchos de los problemas que pueden ocurrir bajo el proceso de diseño y desarrollo de productos, pueden ser completamente prevenidos, por ejemplo, la eliminación de la iteración del diseño reduce el costo del desarrollo del producto y acorta el tiempo de lanzamiento al mercado del nuevo producto [2]. El QFD es una técnica que combina los requisitos de los clientes con los requisitos técnicos, que ayuda a los diseñadores y fabricantes a producir mejores productos, mejorar su competitividad en el mercado y aumentar la satisfacción del cliente [3], y DFMA es una técnica cuyo principio es lograr una compatibilidad entre el diseño del producto y el proceso de fabricación para reducir los costos de fabricación [4].

Aunque los principios y conceptos de la ingeniería concurrente se consideran maduros, su implementación y gestión en las empresas presenta todavía muchos retos por la complejidad de los productos de ingeniería y por la gran variedad de herramientas existentes [5]. En la literatura se muestran ejemplos que ilustran como empresas han registrado, como consecuencia de la utilización del NPPD, mejoras en el rendimiento, costos reducidos, calidad mejorada y reducción del tiempo al mercado.

Xenophon et.al [6] estudió los diferentes métodos de ingeniería concurrente y sus consecuencias. Crearon un instrumento válido y fiable para la evaluación de los resultados en la ingeniería concurrente e identificaron algunas de sus principales consecuencias y lo aplicaron en un cierto número de empresas.

Tsai et.al [7] aplicó la ingeniería concurrente en la instalación del sistema de espumas en las tuberías para extinción de incendios. Ellos implementaron la ingeniería concurrente en la industria de la construcción para hacer una mejora en el proceso. Utilizaron el análisis Delphi para establecer un marco para la instalación de tuberías.

Abdelraoof et.al [8] desarrolló el uso del despliegue de funciones de la calidad y el proceso de jerarquía analítica para la selección de materiales para estructuras vehiculares. El análisis principal se realizó para describir la eficacia del proceso de ingeniería concurrente.

Siti et.al [9] realizaron el diseño de un termo usando un enfoque de ingeniería concurrente. Para su diseño se tuvo en cuenta la voz del cliente. Basado en los detalles recogidos, el termo fue rediseñado y mejorado utilizando la técnica de QFD.

Venkataraman et. al [10] utilizaron técnicas de mapeo de flujo de valor (VSM) para seleccionar el mejor proceso de fabricación entre los sistemas integrados. Vijaya et. al [11] utilizaron la técnica VSM para mejorar el flujo de materiales y la productividad de los procesos de un carburador.

En la industria de la minería del carbón, la extracción de éste se realiza por medio de grandes excavadoras mineras o palas electromecánicas. En donde pocas paladas alcanzan a llenar la tolva de un camión minero con gran capacidad. Para satisfacer esta demanda, la empresa alemana Terex O&K desarrolló una nueva generación de máquinas, la excavadora RH340B, más rápidas, eficientes y confiables. Su capacidad de cuchara estándar es de 14,8 m³. Esto se traduce en una carga útil de 60 toneladas, haciendo que se llenen los camiones de 240 toneladas con sólo cuatro llenadas del balde.

Esta excavadora es la más grande que se encuentra en nuestro país y solo la posee la Mina de Carbón del Cerrejón en La Guájira. Por ende, estas máquinas representan un elemento crítico en el proceso minero, ya que si fallan se detendría la extracción, lo que generaría consigo una interrupción de la producción y ocasionaría grandes pérdidas económicas. El área de mantenimiento se vio en la necesidad de desarmar el sistema de tren de rodaje que sirve para el avance en la oruga de la excavadora, este corresponde al Mando Final que mueve

la oruga. Pues, dentro del mando final de las RH340B se encuentran varias piezas que forman un sistema de transmisión, estas piezas están ajustadas por una tuerca de tipo corona (ver Figura 1).



Figura 1. Mando Final de Excavadora RH340B.

La tuerca tipo corona esta apretada por un gran torque de 181.000 N.m. y comercialmente no hay una herramienta extractora capaz de vencer este torque. Sin embargo, el fabricante de la excavadora vende una herramienta exclusiva para desenroscar dicha unión en el componente. Pero los costos de adquisición son demasiado elevados, además toca exportarla desde Alemania hacia nuestro país y viendo la posibilidad que solo se va a utilizar en un componente no es para nada rentable comprar dicha herramienta.

En el presente artículo, se plantea la integración de las técnicas de la ingeniería concurrente, QFD y DFMA para generar un diseño de la herramienta mecánica, dada la necesidad detectada en la industria minera, capaz de vencer el torque de apriete, y fabricar el modelo de herramienta con materiales que se pueden conseguir en el mercado local. Lo cual representaría un ahorro en el costo de adquisición y en la disminución de los tiempos de mantenimiento.

2. Metodología

El trabajo se articula en su desarrollo en tres grandes etapas, a saber: Despliegue de la Función de Calidad (QFD), Selección de la mejor alternativa y diseño para la manufactura y ensamble (DFMA); todo ello, aplicado al diseño de una herramienta para el desmonte de una turca tipo corona que ajusta el Mando Final de la Excavadora RH340B (Figura 2).

La primera etapa de la metodología de diseño conceptual fue traducir las necesidades del cliente en características técnicas que conduzcan a identificar las especificaciones

del diseño de la herramienta mecánica de extracción de la tuerca-corona, sobre las cuales se debe trabajar. Los requerimientos se agrupan y son ponderados en una escala de 1 al 5 para ser evaluados utilizando la técnica de QFD, para determinar los que presentan mayor relevancia en el diseño. Los requisitos relevantes encontrados en esta etapa se convierten en requerimientos funcionales (FRs) de ingeniería y a partir de estos requerimientos funcionales se elabora la estructura funcional que permite visualizar las funciones principales y auxiliares de diseño para facilitar la comprensión conceptual del producto.

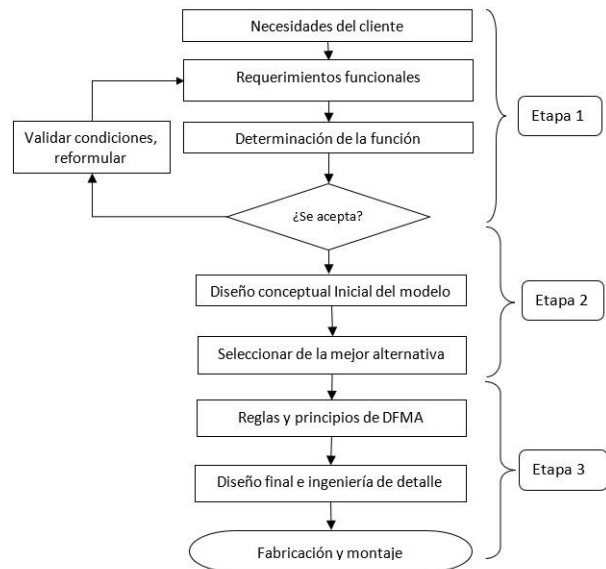


Figura 2. Metodología propuesta

En la segunda etapa, se procede a escoger la mejor alternativa de cada una de las partes que conforman el diseño, mediante una matriz de decisiones. A cada alternativa se la califica con un valor entre 1 y 9 dándole la importancia respectiva. Luego, al valor del criterio se le asocia la calificación de la alternativa multiplicando estos valores y así obtener un acumulado. Por último, se suman todos los valores obtenidos y se selecciona la alternativa que mayor resultado haya obtenido. Hasta aquí el diseño conceptual muestra la descripción del diseño y los mecanismos que se requieren para desarrollar el prototipo de herramienta.

La tercera etapa consiste, se aplica la técnica de DFMA, que busca dar la forma inicial al producto, mediante una estructura funcional, garantizando que las piezas a diseñar puedan fabricarse y ensamblarse con facilidad, entendiendo por ello, la simplificación y economía de los procesos [12].

Se recogieron las ideas necesarias para para clasificarlas en varios grupos que son determinantes en este método y determinar las que presentan mayor relevancia a la hora de diseñar la herramienta de extracción de la turca-corona.

Los requerimientos del cliente que tuvieron mayor importancia fueron; soportar altas presiones, rigidez, resistencia, baja inversión y aplicación segura de carga, ya que sus porcentajes de ponderación suman un 64,47%. Mientras que las incidencias de las especificaciones técnicas que tuvieron un valor mayor de 65,20% fueron: material, tamaño de sección, geometría, proceso de fabricación y peso.

A partir de los requerimientos establecidos en la Casa de la Calidad, se realiza un árbol de objetivos mostrando de una manera jerárquica las características funcionales de mayor importancia que se requiere en el prototipo de herramienta de desarme, describiendo sus aspectos fundamentales, como se observa en la Figura 4.

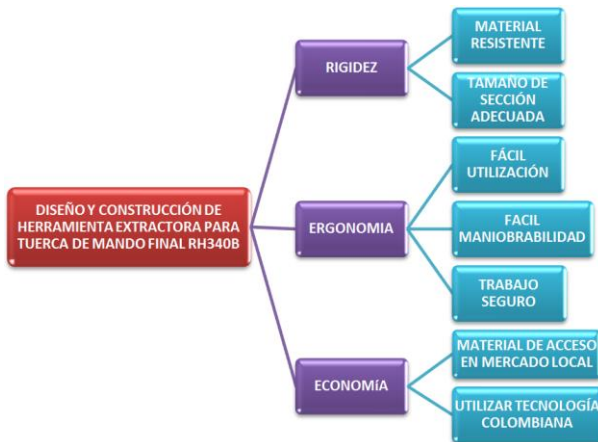


Figura 4. Árbol de objetivos. Fuente: elaboración propia.

Definidas las especificaciones técnicas y del cliente, que tienen mayor importancia en el desarrollo del diseño para lograr una excelente calidad en el producto terminado, se puede establecer las funciones principales del producto y la estructura funcional.

La función global, que es la extracción de la tuerca de mando final RH340B, se especifica en una caja negra, la cual relaciona las entradas y salidas del proceso mediante funciones de procedimiento principales y auxiliares establecidas, que juntas llegan a cumplir la función global, como se muestra en la Figura 5.

Las funciones principales son: sujetar la tuerca del Mando Final, movimiento rotacional de la tuerca, extraer la tuerca y desarmar el Mando Final. Y las funciones auxiliares son: utilizar una fuente de energía que de él torque de afloje y operar la carga de manera segura.

Después de identificadas las funciones principales y auxiliares se elabora la estructura funcional, ver Figura 6.

La estructura funcional muestra los diferentes bloques del sistema en general, pero esos bloques deben tener una geometría y forma que cumplan las funciones principales y auxiliares de la herramienta, ver Figura 7.

Como se puede observar en la Figura 6, el grupo de Actuador está conformado por tres tipos de accionamiento en que se aplica la carga para mover la herramienta y transmitir el torque que afloje a la tuerca.

También se observa, los diferentes tipos de sujeciones en que se apoyará la herramienta para transmitir la fuerza de reacción y los diferentes tipos de palanca en que se aprovechará la mejor ventaja mecánica de la herramienta.

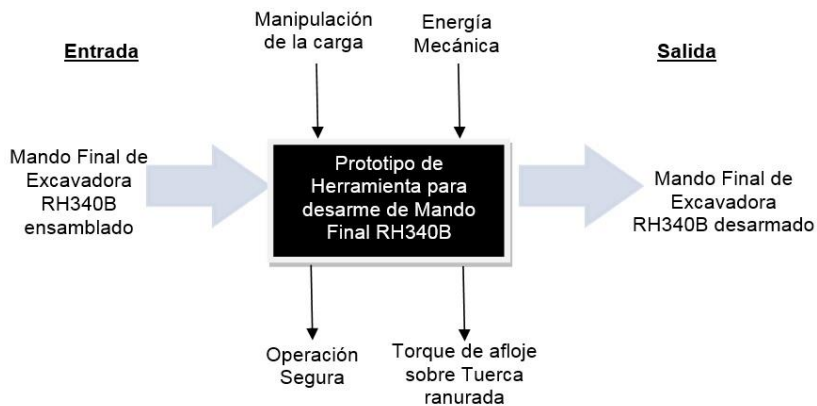


Figura 5. Diagrama de la caja negra. Fuente: elaboración propia.

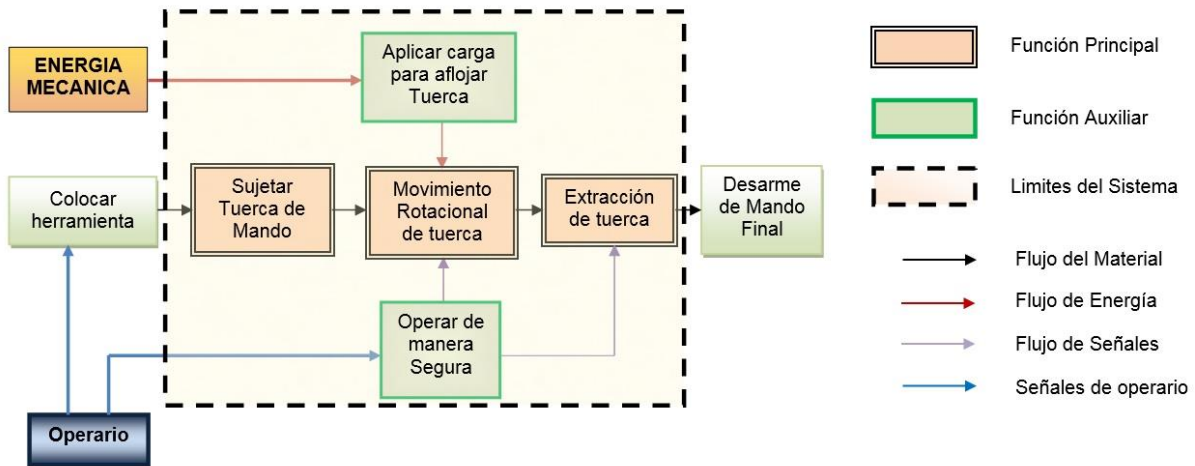


Figura 6. Estructura funcional de la herramienta. Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Diagrama funcional de la herramienta extractora. Fuente: elaboración propia.

Para tener conocimiento de cada componente, es necesario describirlos en la *matriz morfológica* que se ve en la Tabla 2. Esta matriz describe los diferentes tipos de actuadores para el prototipo.

De manera similar se plantean varias opciones para el tipo de sujeción de la herramienta para desarme, (Tabla 3), y diferentes tipos de palanca para mover la herramienta de extractora (Tabla 4).

Todo esto con el fin de analizarlos y determinar los pros y los contras de las distintas alternativas para luego evaluarlas por el método de los objetivos ponderados y escoger la mejor solución que se convierta en el objeto de este proyecto.

Tabla 2. Descripción de los tipos de actuadores para herramientas de alto torque

	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Hidráulico	Trasmiten altas cargas. Espacio reducido de trabajo. Fácil operación. Alta precisión.	Utilización de bombas hidráulicas de alta presión. Rango limitado para transmitir la carga. Utilización de controles para el actuador.	Herramientas hidráulicas para altos torques. Equipo de maquinaria pesada.
Mecánico	Trasmiten altas cargas con poco esfuerzo. Bajo costo. Fácil operación. Fácil transporte.	El uso de palancas grandes puede ocasionar accidentes. A mayor carga es más inestable. Operación manual.	Espacios reducidos de maquinaria pesada. Equipos de obras civiles y agrícolas.
Eléctrico	Altos torques Alta precisión. Excelente ergonomía y fácil transporte. Altos tiempos de funcionamiento. Excelente repetitividad.	Debe mantenerse en lugares limpios y secos porque se puede afectar el funcionamiento. Necesita de una fuente eléctrica regulada. Muy costoso.	Para equipos y herramientas automatizadas Equipos donde lo primordial sea la velocidad.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Descripción de los tipos de sujeción para la herramienta

Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Rueda Dentada Total	Sujeción total al componente Alta resistencia mecánica. Alta precisión.	Altos costos de maquinado. Más robusta. Atraso en los tiempos de montaje e instalación.	Transmisión de altos torques. Equipos de maquinaria pesada.
Rueda Dentada parcial	Fácil instalación Bajo costo. Fácil operación. Buena precisión.	Sujeción parcial del componente Sufren deformación por el uso constante.	Transmisión de altos torques. Equipos de obras civiles y agrícolas.
Con Brazo de Reacción	Fácil instalación Bajo costo. Buena precisión. Buena sujeción.	Debe adaptarse a una base para el apoyo. Si el brazo es grande puede ocasionar accidentes.	Para equipos livianos. Para componentes menores

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Descripción de los tipos de palancas para la herramienta

	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Primera clase	Trasmiten altas cargas. Baja Potencia. Fácil operación. Alta precisión. Bajo Costo	Poca velocidad de reacción. Más distancia para aplicar altos torques. Rango limitado para transmitir la carga.	Herramientas como Alicates, Tijeras, tenazas.
Segunda clase	Altas cargas con poco esfuerzo. Alta precisión. Fácil operación. Poca distancia para aplicar la carga.	Poca velocidad de reacción. Alto costo. Más deformación.	Herramientas como Llaves, Carretillas, remos.
Tercera clase	Baja velocidad de reacción. Bajo costo Fácil operación. Menos distancia para aplicar carga.	Baja carga. Mayor distancia de desplazamiento. Muy costoso. Rango limitado para transmitir la carga	Para herramientas de oficina, como quita grapas. Pinzas. Caña de Pescar.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Selección de la alternativa más adecuada

Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a escoger la mejor alternativa mediante una matriz de decisiones. La matriz de decisión para los diferentes tipos de actuadores se muestra en la tala 5.

Para el diseño del prototipo se selecciona la unidad de potencia hidráulica para el tipo de accionamiento de la carga hacia la herramienta, ya que el resultado de la matriz de decisiones presenta la calificación más alta de 8,48.

Tabla 5. Matriz de decisiones para los tipos de actuador

Valor del Criterio (%)	Alternativa Criterios	Hidráulico		Mecánico		Eléctrico	
		C	A	C	A	C	A
		13,16	Alta precisión.	9	1,18	7	0,92
56,41	Transmitir altas cargas	9	5,08	9	5,8	9	5,08
4,64	Fácil operación.	9	0,42	1	0,05	3	0,14
25,79	Menor costo	7	1,81	9	2,32	1	0,26
100	Calificación Total	8,48		8,37		6,66	
C = Calificación (de 1 a 9); A = Acumulado (= C * Valor del criterio)							

Fuente: elaboración propia.

La matriz de decisión para seleccionar el tipo de palanca se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Matriz de decisiones para la clase de palanca

Valor del Criterio (%)	Alternativas Criterios	Primera Clase		Segunda Clase		Tercera Clase	
		C	A	C	A	C	A
		20,25	Alta precisión	8	1,62	8	1,62
25,83	Alta aplicación de carga	8	2,07	6	1,55	7	1,81
3,93	Bajo esfuerzo	7	0,28	7	0,28	4	0,16
14,38	Poca distancia al aplicar la carga	7	1,01	6	0,86	9	1,29
35,61	Menor costo	5	1,78	7	2,49	2	0,71
100	Calificación Total	6,75		6,80		5,39	
C = Calificación (de 1 a 9); A = Acumulado (= C * Valor del criterio)							

Fuente: elaboración propia.

La palanca de segunda clase es la más apropiada para desarrollar el torque necesario para mover la tuerca con la herramienta de extracción. Pues su calificación es la más alta, 6,80, en comparación de las otras clases de palanca.

Igualmente, la matriz de decisión para determinar la mejor selección entre los cuatro criterios del tipo de sujeción para la herramienta se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Matriz de decisiones para la sujeción de la herramienta en el componente

Valor del Criterio (%)	Alternativas Criterios	Rueda dentada total		Rueda dentada Parcial		Brazo de Reacción	
		C	A	C	A	C	A
		28,28	Buena precisión	9	2,40	8	2,13
28,38	Facilidad de fabricación	4	1,14	8	2,27	6	1,70
4,19	Facilidad de montaje en el sistema	8	0,34	7	0,29	4	0,17
40,75	Menor costo	4	1,63	7	2,85	2	0,82
100	Calificación Total	5,50		7,55		4,29	
C = Calificación (de 1 a 9); A = Acumulado (= C * Valor del criterio)							

Fuente: elaboración propia.

Se selecciona para el tipo de sujeción de la herramienta al mando final aquel que posee la rueda dentada parcial.

Con las etapas de diseño anterior, el diseño conceptual muestra la descripción de las características y funciones que se requieren para desarrollar el prototipo de herramienta. Las cuales servirán de referencia para la siguiente etapa, donde se le da forma al diseño. Entonces, se elabora una matriz morfológica que muestra cómo desarrollar las funciones del mecanismo para la herramienta, con diseños y mecanismos establecidos que buscan cumplir con las especificaciones planteadas anteriormente (Tabla 8).

Tabla 8. Matriz morfológica para el diseño del prototipo de herramienta

Alternativas Función		1	2	3
		A	Tipo de mecanismos	Con Sujeción de Gancho
B	Aplicación de la carga	Por actuador tangencial	Con actuador perpendicular	Con dos actuadores
C	Tipo de agarre	Acople con dado	Muelas roscadas	Muelas soldadas

Fuente: elaboración propia.

Para el diseño y construcción de la herramienta se evalúan por medio de la matriz de decisión, las siguientes combinaciones de alternativas: Combinación 1: A1-B1-C3, combinación 2: A2-B2-C2, combinación 3: A2-B3-C2. Tabla 9.

Tabla 9. Matriz de decisiones para las diferentes combinaciones

Valor del Criterio (%)	Combinación Criterios	1		2		3	
		C	A	C	A	C	A
		8,69	Facilidad de instalación	7	0,61	4	0,35
20,95	Fácil operación	6	1,26	8	1,67	7	1,46
34,95	Mejor Fijación	8	2,79	6	2,10	9	3,14
35,95	Menor costo	5	1,77	7	2,47	4	1,42
100	Calificación Total	6,43		6,60		6,72	

C = Calificación (de 1 a 9); A = Acumulado (= C * Valor del criterio)

Fuente: elaboración propia.

Con base en los resultados arrojados por la matriz de decisión se escoge la combinación 3, que está compuesta por los siguientes elementos:

- La sujeción de la herramienta va a ser en la rueda dentada del Spindle mediante el sistema de Yugo Escocés.
- La transmisión de la carga que va a ser entregada por el cilindro hidráulico hacia la herramienta constará de dos actuadores hidráulicos apoyados en dos brazos de palanca.

- La extracción de la tuerca estará dada por muelas desmontables que permitirán el intercambio de cada una de ella cuando se desgaste.

A partir de la matriz morfológica y la matriz de decisión de las posibles combinaciones se elabora un prototipo de la herramienta que desarmará al mando final por medio de dos unidades de potencia hidráulica, que se muestra en la Figura 8.

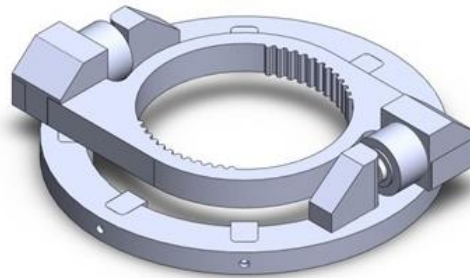


Figura 8. Diseño del prototipo de herramienta.

Fuente: elaboración propia.

3.3. Diseño para la fabricación y ensamble (DFMA)

Primero, a través de un diseño preliminar, se busca dar la forma inicial al producto, mediante una estructura modular, y al final tener un modelo virtual sólido 3D con los detalles de cada uno en una vista explosionada.

Para el diseño de la parte móvil de la máquina, se debe contar con un mecanismo articulado por medio de un movimiento rotacional, para lo cual se propone el siguiente diseño. Véase Figura 9.

Después de haber realizado un estudio del número mínimo de partes funcionales (principio DFMA), se tiene un diseño que cuenta con: una corona de extracción, seis muelas extractoras, cuatro cuñas de apoyo de los cilindros y la herramienta, la cual se fija a la parte dentada del Spindle. El diseño del mecanismo para la aplicación de la carga consta de dos unidades de potencia hidráulica, conformada por dos cilindros hidráulicos, los cuales se ajustan a los cuatro apoyos (cuñas) del cilindro. Ver Figura 10.

En la Figura 11 se muestra una vista explosionada de la herramienta para la extracción de tuerca en Mando Final RH340B, en la cual se puede apreciar la manera correcta como se ensamblan las partes.

Se utiliza la metodología DFMA, Diseño para la Fabricación y el Ensamble de Boothroyd and Dewhurst [13], dado que esta herramienta de la ingeniería concurrente permite desde la fase de diseño garantizar que las piezas a diseñar puedan fabricarse y ensamblarse con facilidad, entendiendo por ello, la simplificación y economía de los procesos, etc.

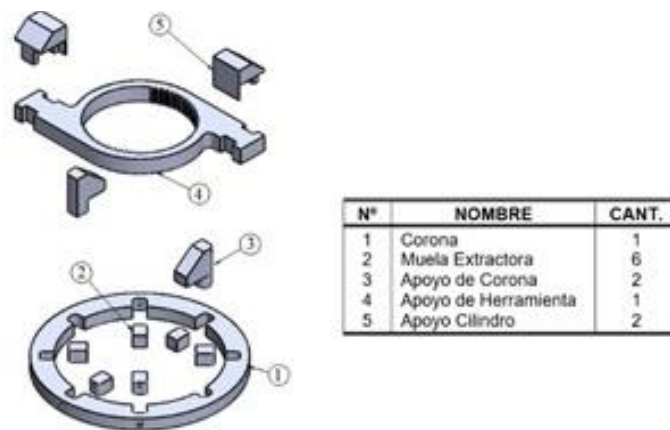


Figura 9. Vista explosionada de la parte móvil de la Herramienta de extracción de tuerca en Mando Final RH340B. Fuente: elaboración propia.



Figura 10. Vista del mecanismo de aplicación de la carga de la herramienta para el desarme de Mando Final RH340B. Fuente: elaboración propia.

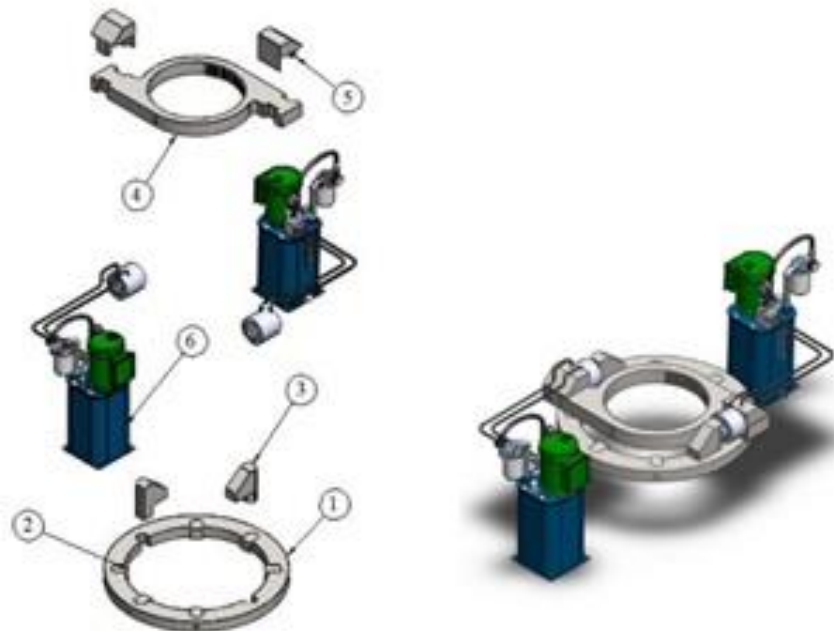


Figura 11. Vista en detalle de la herramienta para el desarme de Mando Final RH340B. Fuente: elaboración propia

En la Tabla 10, se enumera cada una de sus partes y su función en el sistema y en la Tabla 11 se relaciona el tiempo (segundos) estimado para el montaje de cada una de las piezas constitutivas de la herramienta para desarme de mando Final RH340B.

Tabla 10. Caracterización del DFMA de las piezas de la herramienta extractora.

N.º	Nombre	Cant.	Función	Proceso de Fabricación
1	Corona	1	Trasmitir movimiento rotacional.	Fresado CNC
2	Muela Extractora	6	Transmitir el torque de afloje a la tuerca. Sujetar la tuerca por las ranuras.	Fresado. Taladrado
3	Apoyo de Corona	2	Trasmitir carga de cilindro hidráulico Sujetar la corona por las ranuras. Fijar el cilindro hidráulico.	Fresado.
4	Apoyo de Herramienta	1	Fijar la herramienta al Spindle.	Oxicorte. Fresado.
5	Apoyo Cilindro	2	Servir de apoyo al cilindro. Fijar el cilindro hidráulico.	Fresado.
6	Bomba Hidráulica	2	Transmitir Energía potencial al fluido de trabajo. Accionar el movimiento del cilindro hidráulico.	Estándar.
7	Tanque de almacenamiento	2	Almacenar el fluido de trabajo	Estándar.
8	Unidad de Mantenimiento	2	Limpiar el fluido de trabajo contra suciedades.	Estándar.
9	Válvula de control	2	Direccionar el fluido hacia el cilindro, Bomba y tanque. Regular el flujo que entra y sale del cilindro.	Estándar.
10	Manguera	4	Servir de conexión entre la válvula y el cilindro.	Estándar.
11	Cilindro hidráulico	2	Aplicar la carga a la herramienta Mover la corona de extracción.	Estándar.
Número total de piezas		26		

Tabla 11. Tiempos en segundos estimados para el ensamble de la herramienta para desarme de Mando Final RH340B

N.º pieza	Pieza	Cantidad	Código de manipulación	Tiempo de manipulación manual	Código de inserción	Tiempo de inserción manual	Tiempo de montaje	Piezas funcionales
1	Corona	1	99	9	6	5,5	14,5	1
2	Muela Extractora	6	0	1,13	38	6	7,13	6
3	Apoyo de Corona	2	96	4	0	1,5	5,5	2
4	Apoyo de Herramienta	1	99	9	6	5,5	14,5	1
5	Apoyo Cilindro	2	96	4	0	1,5	5,5	2
6	Bomba Hidráulica	2	99	9	6	5,5	14,5	2
7	Tanque de almacenamiento	2	99	9	6	5,5	14,5	2
8	Unidad de Mantenimiento	2	96	4	6	5,5	9,5	2
9	Válvula de control	2	96	4	6	5,5	9,5	2
10	Manguera	4	0	1,13	32	4	5,13	4
11	Cilindro hidráulico	2	94	3	6	5,5	8,5	2
Número total de piezas		26		Tiempo total de montaje			108,76	

Con los datos de la Tabla 11 se determina que tan eficiente es el montaje. La ecuación 1 determina la eficiencia del montaje.

$$E_m = \frac{N_{min} * t_a}{t_m} = \frac{26 * 3seg}{108,76 seg} = 0,72 \quad (1)$$

Donde: N_{min} es el número mínimo de piezas del conjunto considerado (eliminando las que no son funcionalmente necesarias), t_a es el tiempo genérico de montaje de una pieza (se toma $t_a = 3$ seg.), t_m es el tiempo estimado para el montaje del producto real.

A continuación, se elabora la evaluación del factor de complejidad del conjunto, con el cual se busca medir que tan fiable será el conjunto, por medio de la ecuación 2.

$$C_f = \frac{K}{f} * \sqrt[3]{N_p * N_t * N_i} \quad (2)$$

Donde: N_p es el número de piezas o componentes del conjunto, N_t es el número de tipos distintos de piezas o componentes, N_i es el número de interfaces, enlaces o conexiones del conjunto, f es el número de funciones que realiza el conjunto, K es un factor de conveniencia.

Suponiendo que $K/f = 1$, se tiene el valor del factor de complejidad (Ecuación 3):

$$C_f = \sqrt[3]{26 * 11 * 25} = 19,26 \quad (3)$$

Se puede apreciar que se tienen valores de eficiencia y de complejidad aceptables, lo cual quiere decir que el diseño puede ser mejorado, esto se lograría aplicando nuevamente la metodología DFMA, para aumentar la eficiencia del montaje y disminuir la complejidad.

4. Análisis y resultados

Esta herramienta diseñada debe superar un torque de apriete de 181.000 N.m para aflojar la tuerca del Mando Final. De acuerdo con ello se tiene la ecuación 4:

$$T = LxF \quad (4)$$

Dónde: T es el torque, F es la fuerza aplicada y L es la distancia perpendicular entre la fuerza y el punto de apoyo.

La unidad de potencia hidráulica a utilizar entrega una presión nominal de 70 MPa, y el área efectiva del cilindro hidráulico es de 3511,6 mm². Por lo tanto, la fuerza que se debe aplicar para vencer el torque de 181000 Nm debe

ser de 242 KN aproximadamente. Reemplazando en la ecuación 3 se tiene que $L = 374,5$ mm, Figura 12.

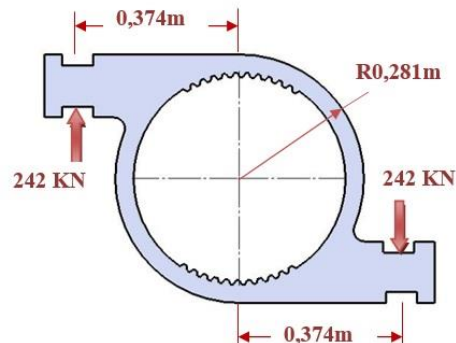


Figura 12. Detalle de cargas sobre herramienta. Fuente: elaboración propia. Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, la fuerza que se debe aplicar para vencer el torque de 181000 Nm debe ser de 242 kN.

Para la selección del material a utilizar en la fabricación de la herramienta se realiza el procedimiento de selección aplicando la metodología DFMA. En donde se evalúan varios materiales que cumplan con los requerimientos de carga última y se escoge el que mejor se adapte a las necesidades. La selección se realizó teniendo en cuenta el factor de seguridad que brindaría cada uno, el precio y la facilidad de adquisición en el mercado. Como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Tabla comparativa para la selección del acero apropiado para la fabricación de la herramienta

Material (acero AISI)	n	Precio (\$/Kg)	Disponibilidad en el Mercado
1045	1.32	5.100.00	Abundante
4135	1.47	-----	No es comercial
4140	1.62	5.300.00	Abundante
4340	1.77	7.800.00	No es comercial

Fuente: elaboración propia

Se selecciona un acero 1045 en una lámina de 3 pulgadas (76 mm) de espesor, por su abundancia en el mercado y por su diferencia de precios, ya que el factor de seguridad de todos los aceros es muy próximo entre sí.

Para tener más información acerca del comportamiento de la herramienta, frente a las cargas estáticas y determinar los esfuerzos de tensiones y deformaciones del modelo, de acuerdo con los criterios de diseño de VonMises, se realiza el análisis computacional por el Método de elementos finitos (MEF) en el software SolidWorks Simulations.

En el modelo evaluado se utilizó el material de Acero AISI 1045 como estudio de diseño. Para el cual se quería verificar si el modelo era capaz de resistir y vencer un Torque de 181000 N.m. En este estudio se utilizó una malla no muy gruesa de 20 x 20 mm por elemento y con un total de más de 16000 elementos, que cumplía con los requerimientos computacionales para el procesador del equipo de trabajo, ver Tabla 13.

Las Figuras 13 muestra el análisis de los esfuerzos según el criterio de Von Mises y la Figura 14 muestra el análisis de desplazamiento.

Tabla 13. Parámetros usados en la simulación

Tipo de malla:	Malla sólida
Mallador utilizado:	Estándar
Superficie suave:	Activar
Verificación jacobiana:	4 Points
Tamaño de elementos:	20 mm
Tolerancia:	1 mm
Calidad:	Alta
Número de elementos:	16299
Número de nodos:	25962

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos a partir del análisis en elementos finitos, Tabla 14, se puede decir que los esfuerzos a los que está sometida la herramienta debido a las cargas estáticas producidas por el cilindro hidráulico están por debajo del límite elástico del material, el máximo esfuerzo soportado se encuentra localizado en el radio de acuerdo entre el brazo palanca y la parte que se fija al Splinder.

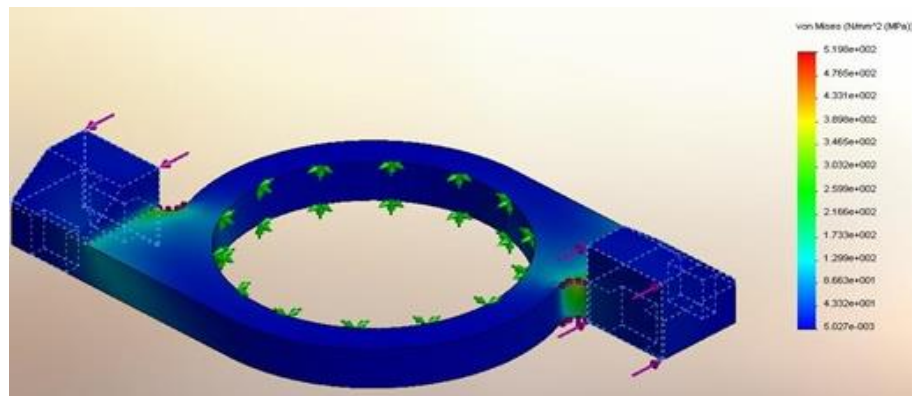


Figura 13. Esfuerzo de tensión según Von Mises arrojada por el Software SolidWorks®. Fuente: elaboración propia

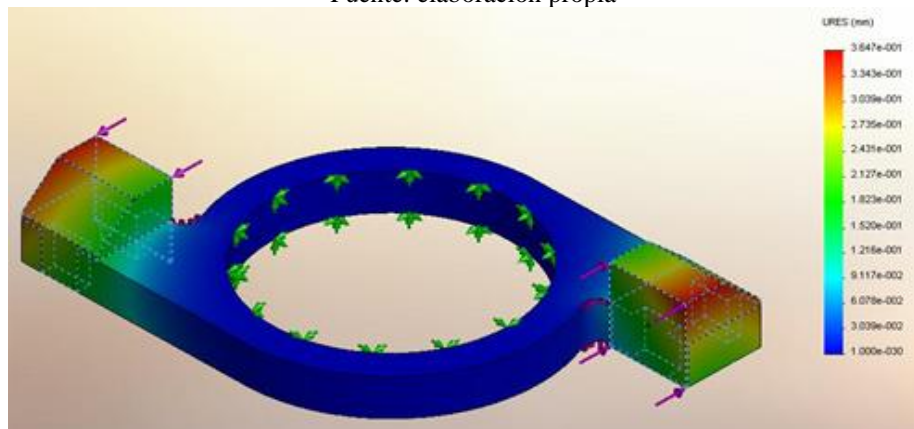


Figura 14. Análisis de desplazamiento arrojado por SolidWorks®. Fuente: elaboración propia.

Generando así un máximo esfuerzo de 519,76 MPa., aproximadamente, lo cual generará una deformación que no afecta la rigidez de la herramienta y se garantiza su correcto funcionamiento. Por lo que se puede concluir que la selección del material ha sido la mejor y que la valoración del diseño para la herramienta es óptima.

Tabla 14. Resultado del estudio de esfuerzos y desplazamientos

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.	Prom.
Tensiones I	VON: Tensión de Von Mises	0.0050	519.76	1,299
		2659 N/mm ² (MPa)	6 N/mm ² (MPa)	N/ mm ² (MPa)
Desplazamientos	URES: Desplazamiento resultante	0 mm	0.364	0,121
		Nodo: 6564	692 mm	6 mm
		Nodo: 17	Nodo: 25508	

Fuente: elaboración propia

Con base a lo anterior se tiene que el valor del factor de seguridad viene dado por la ecuación 5.

$$F.S = \frac{\sigma_{\text{Limite}}}{\sigma_{\text{Carga}}} = \frac{530 \text{ N/mm}^2}{519 \text{ N/mm}^2} \cong 1 \quad (5)$$

De acuerdo con la valoración del análisis, el modelo presenta un factor de seguridad de 1. Este resultado puede tener un error entre el 0,5 - 5% de acuerdo con las condiciones normales de operación.

El esfuerzo de 519,76 MPa. generará una deformación de la herramienta no muy apreciable en la sección crítica. Ver en la Figura 15.

Por lo que se puede concluir que la selección del material ha sido la mejor y que la valoración del diseño para la herramienta es óptima.

4.1. Fabricación y montaje de la herramienta

Para la determinación de los costos de fabricación y de montaje de la herramienta extractora de tuerca corona para mandos finales RH340B, se realiza una evaluación detallada de cada uno de los procesos que la conforman. Teniendo en cuenta los costos de materiales, costos de procesos de maquinado y mano de obra, los costos se muestra en la Tabla 15.

El costo total del proyecto es de \$ 19'235.509, valor que, comparado con el precio de una herramienta de extracción en el mercado hoy en día se encuentra en el orden de los \$90.000.000, ahorrándole al cliente aproximadamente \$70.000.000 casi un 300%.

La pieza maquinada según el plano, se muestra en la Figura 16.

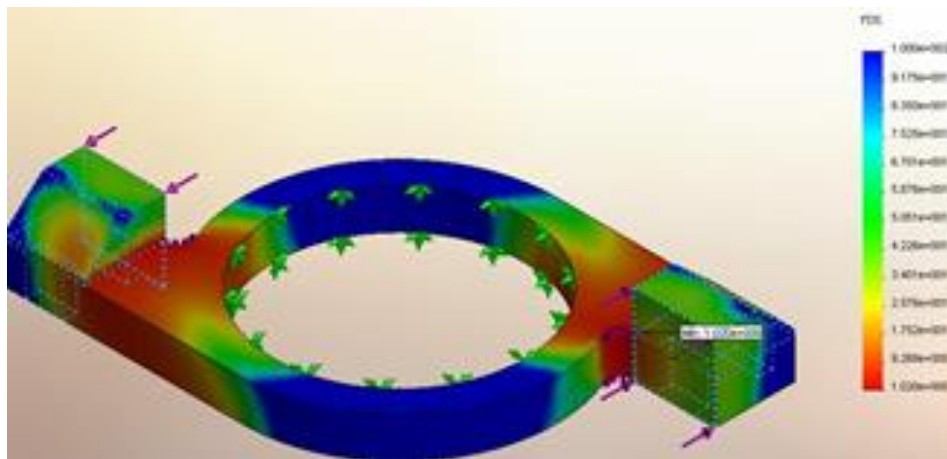


Figura 15. Dedución del Factor de Seguridad arrojado por SolidWorks®, para el análisis de esfuerzos estáticos

Tabla 15. Estimación de costo

#	Actividad	Horas	Valor unitario (\$)	Valor total (4)
1	Ingeniería de Diseño	80	25.000	2.000.000
2	asesorías	25	50.000	1.250.000
3	Costo de Materiales			3.488.806
4	Costo del maquinado			8.135.106
5	Costo de la modificación de la Herramientas			3.916.597
6	Costo de la Instalación de la Unidad de Potencia			145.000
7	papelería			80.000
8	Varios			220.000
Total costos				19.235.509



Figura 16. Herramienta fabricada.

5. Conclusiones

Se diseñó una herramienta extractora para mando finales en excavadoras, mediante una estructura de diseño enfocada hacia el diseño concurrente, teniendo en cuenta etapas como: reconocimiento de la necesidad, diseño conceptual, diseño para la calidad, diseño de la forma, diseño de detalle entre otros, lo cual hizo que se consiguiera el modelo más eficiente. De esta manera se logró una estructura metodológica, que sirve como guía para la toma de decisiones en torno a la automatización del proceso y a la viabilidad de desarrollar nuevos productos en la región.

La aplicación de los métodos de la ingeniería concurrente, QFD y DFMA en la elaboración de la herramienta extractora de tuerca corona en mando finales

RH340B, dio como resultado, que las características técnicas que tiene mayor incidencia en la satisfacción del cliente son los materiales, el tamaño de la sección, la geometría, el proceso de fabricación y el peso, además, se creó un diseño con 26 piezas, una eficiencia en el ensamble de 0,72 y un factor de complejidad de 19,26, facilitando la consecución de los objetivos mediante una integración de todos los procesos relacionados con el diseño de máquinas, se logró enfocar el problema desde diferentes puntos de vista (clientes, Ingeniería, fabricante entre otros) y de esta manera se obtuvo un producto con altos estándares de calidad, al momento de juntar todos aquellos procesos relacionados se llega a minimizar todos los pasos necesarios para llegar al producto deseado, ahorrando tiempo y energía, y por ende dinero.

Según el modelo elaborado, el cliente sugirió utilizar un acero AISI 4340, pero esa lamina de tres pulgadas en espesor no se conseguía en nuestro país, por lo tanto, se seleccionó un acero AISI 1045 que tiene propiedades similares al 4340, y cumple con las exigencias de carga para la cual está diseñada la herramienta. Y según el método de los elementos finitos la herramienta sufrirá una mínima deformación que no será lo suficientemente grande para doblarla ni romperla. Por lo cual, se utilizó en la herramienta el material AISI 1045, que es de mejor adquisición comercial que el 4340, y cumplió con la función de desapretar sin que sufriera daño de deformación plástica ni ruptura de la pieza.

Después de haber culminado con el diseño y fabricación de la herramienta extractora de tuerca corona para mando final de excavadora RH340B, se consigue llegar a un modelo que cumple con las especificaciones técnicas para vencer al altísimo torque, con un costo muy por debajo del que ofrece la fabrica O&K (obteniéndose una disminución en el costo del 74.44%), convirtiéndose en una herramienta que se ajusta a las necesidades del cliente, al mismo tiempo que se puede generar más confianza en la industria local para un mejor desarrollo económico de nuestra región.

Se debe tener precaución con los fluidos a alta presión que se generan cuando la bomba hidráulica ejerce su trabajo. Igualmente, cuando se acople el cilindro hidráulico a los apoyos de la herramienta, pues el movimiento del actuador es lineal y la geometría de ésta es circular, lo que puede ocasionar que el cilindro se salga de las cuñas de apoyos. Para evitar alguna condición insegura debido a esta configuración es recomendable colocar un apoyo que ajuste al actuador y evitar que la misma potencia lo saque de la herramienta o al cilindro de su fijación. Las investigaciones futuras en el área del diseño de maquinaria deberían indagar sobre los efectos

de la fabricación sobre la seguridad de los productos mediante la adición de elementos pertinentes al modelo.

Referencias

- [1] M. D. A. Serna, C. A. U. Serna, A. C. G. Builes, “Inferencia difusa aplicada a la ingeniería concurrente para el diseño de productos de manufactura en condiciones de incertidumbre”, *Revista Ingeniería, Universidad de Medellín*, vol. 11, no. 21, pp. 127-138, 2012.
- [2] H. M. Ramírez, E. E. N. Núñez, J. T. Salcedo, *Diseño para la Fabricación y Ensamble de Productos Soldados. Barranquilla*, Colombia: Ediciones Uninorte, 2009.
- [3] J. Y. Farsi, N. Hakimezhad, “The integration of QFD technique, value engineering and design for manufacture and assembly (DFMA) during the product design stage”, *Journal of Advances in Environmental Biology*, vol. 6, no. 7, pp. 2096-2104, 2012.
- [4] J. Serrano, J. M. Bruscas, F. Romero, *Diseño para Fabricación y Montaje, Ingeniería Concurrente: una Metodología Integradora*. Ed. Riba C. molina A, editorial de la Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.
- [5] C. Velasco Meseguer; “Metodología de diseño y desarrollo de productos basada en la ingeniería concurrente: aplicación al diseño de utillajes progresivos”, en *6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Vigo*, 2012, pp. 919-926.
- [6] X. A. Koufteros, M. Vonderembse, “Concurrent engineering and its consequences. journal of operations management”, *Journal of Operations Management*, vol. 19, no. 1, pp. 97-115, 2001, doi: 10.1016/S0272-6963(00)00048-6
- [7] T. P. Tsai, H. C. Yang, P. H. Liao, “The application of concurrent engineering in the installation of foam fire extinguishing piping system”, *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 1920-1928, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.241
- [8] A. Mayyas, Q. Shen, A. Mayyas, D. Shan, A. Qattawi, M. Omar, “Using quality function deployment and analytical hierarchy process for material selection of body-in-white”, *Materials and Design*, vol. 32, no. 5, pp. 2771-2782, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.01.001
- [9] S. M. Mohamad, A. R. Yusoff, “Improvement of take-away water cup design by using concurrent engineering approach”, *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 536-541, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.069
- [10] K. Venkataraman, B. Vijaya Ramnath, S. Kannapan, L. Vinoth, K. V. Velmurugan, “Comparative analysis of ahp and anp model for lean production system justification”, *International Journal Applied Mechanics and Materials*, vol. 591, pp. 197-201, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.591.197
- [11] B. V. Ramnath, V. Chandrasekhar, C. Elanchezian, L. Vinoth, K. Venkatraman, “Value stream evaluation and simulation to improve material flow and productivity”, *International Journal Applied Mechanics and Materials*, vol. 612, pp. 89-95, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.612.89
- [12] E. E. N. Nuñez, “Modelo de diseño y conocimiento en tecnologías de soldadura para el desarrollo de productos soldados”, *Revista Scientia et Technica*, vol. 1, no. 36, 2007, doi: 10.22517/23447214.5003
- [13] G. G. Boothroyd, P. Dewhurst, W. A. Knight, *Product Design for Manufacture and Assembly, 3rd edn*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2011.
- [14] C. R. Romeva, *Diseño Concurrente*. Ediciones UPC, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2010.
- [15] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger, *Diseño y Desarrollo de Productos*. Mc. Graw-Hill. Quinta Edición, México, 2013.