

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIRÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



“DISEÑO DE ACOUPLE Y EXTENSIÓN PARA
SISTEMA DE INSTALACIÓN Y EXTRACCIÓN DE
TUERCAS EN RUEDAS DE CAMIONES
EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA MINERA.”

GABRIEL ANTONIO PARADA MONTIEL

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: PHD. CHRISTOPHER COOPER VILLAGRÁN
PROFESOR CORREFERENTE: PHD. CHRISTOPHER NIKULIN CHANDÍA

Agosto - 2019

DEDICATORIA

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mi profesor guía y a mi profesor correferente, ya que su ayuda fue indispensable para llevar a cabo este trabajo de título, a todos los profesores y apoyos académicos que ayudaron a mi formación universitaria, con mención especial para Eduardo Piñones, que fue prácticamente un tercer profesor guía para mí durante este proceso. Por ultimo pero no menos importante a mi familia y amigos que estuvieron conmigo en todo momento, gracias a ellos soy la persona que soy.

RESUMEN

En Chile una de las principales actividades económicas y uno de los mercados más importantes es el de la minería. Actualmente, en nuestro país, la mayoría del transporte de mineral se realiza en camiones de grandes dimensiones, por lo tanto, resulta de vital importancia mantener estos camiones disponibles para su utilización durante el mayor tiempo posible.

El cambio de ruedas es una de las tareas de mayor riesgo dentro de la mantención de camiones mineros. Automatizar este proceso es una de las principales intenciones de la industria, pero el principal obstáculo se encuentra en las dificultades existentes para automatizar el proceso de instalación y extracción de tuercas en la rueda. Este trabajo busca dar alternativas de solución algunos de los principales problemas presentes en el mencionado proceso.

Para este propósito, se diseñan elementos y sistemas mecánicos capaces de suplir dichos problemas, basándose en un proceso de desarrollo de productos estructurado y el diseño asistido por computadoras. Analizando los diversos factores que envuelven al problema y comprobando la funcionalidad de dichos diseños, a través de la realización de pruebas y simulaciones basadas en el método de los elementos finitos.

De esta manera, se obtienen diseños fácilmente extrapolables, que cumplen con los requisitos de diseño necesarios, para poder formar parte de una herramienta automatizada de cambio de ruedas de camiones mineros.

El poder implementar este avance tecnológico, significaría potenciar a la industria de la minería. Permitiendo proteger a los operarios de mantenimiento, al liberarlos de la zona que es una de las principales causas de accidentes en faena. Además de entregar la posibilidad de disminuir el tiempo y recursos necesarios para realizar el proceso de mantención de ruedas de camiones mineros y por ende ofrecer un beneficio económico.

ABSTRACT

In Chile, one of the main economic activities and one of the most important markets is mining. Currently, in our country, most of the transport of ore is done in large trucks, therefore, it is vital to keep these trucks available for use for as long as possible.

The change of wheels is one of the tasks of greatest risk in the maintenance of mining trucks. Automating this process is one of the main intentions of the industry, but the main obstacle lies in the difficulties to automate the process of installing and extracting nuts on the wheel. This work seeks to provide alternatives to solve some of the main problems present in the aforementioned process.

For this purpose, mechanical elements and systems capable of supplying said problems are designed, based on a structured product development process and computer-aided design. Analyzing the various factors that surround the problem and checking the functionality of these designs, through the realization of tests and simulations based on the finite element method.

In this way, easily extrapolated designs are obtained, which comply with the necessary design requirements, in order to be part of an automated tool for changing the wheels of mining trucks.

Being able to implement this technological advance would mean strengthening the mining industry. Allowing to protect the maintenance operators, by releasing them from the area that is one of the main causes of accidents at the site. In addition to providing the possibility of diminishing the time and resources necessary to carry out the maintenance process of mining truck wheels and therefore offer an economic benefit.

GLOSARIO

ASME: The American Society of Mechanical Engineers, por sus siglas en inglés, es una asociación de profesionales, que ha generado una serie de normas de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos.

CAD: Computed-Aided Design por sus siglas en inglés, en español es diseño asistido por computadoras.

Caja Negra: Es una metáfora para designar aquel elemento estructural de un modelo abstracto sobre el funcionamiento de un sistema que se halla entre la entrada y la salida.

FDM: Fused Deposition Modeling por sus siglas en inglés, es un proceso de fabricación utilizado para el modelado de prototipos.

IDEF0: Definición de integración para el modelado de funciones. Es un método diseñado para modelar decisiones, acciones y actividades de una organización o sistema.

ISO: International Organization for Standardization, por sus siglas en inglés, es una organización para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de estandarización.

Ley de mineral: Hace referencia a la concentración de oro, plata, cobre, estaño, etc., presente en las rocas y en el material mineralizado de un yacimiento.

MEF: Método de Elementos Finitos por sus siglas en español, es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales, aplicado en diversos problemas de ingeniería.

OTR: Denominación para equipos que están contruidos especialmente para actuar en terrenos anormales y severos comúnmente en operaciones fuera de carretera, son llamados así por el significado de sus siglas en inglés Off-The-Road.

PDP: Product Development Process por sus siglas en inglés, en español Proceso de Desarrollo de Productos.

PoC o prueba de concepto: Del inglés proof of concept, es una implementación, a menudo resumida o incompleta, de un método o de una idea, realizada con el propósito de verificar que el concepto o teoría en cuestión es susceptible de ser explotada de una manera útil.

PLA: Polylactic acid por sus siglas en inglés, es un material utilizado para la construcción de prototipos mediante impresoras 3D.

TRIZ: Teoría de resolución de problemas de inventiva. Por sus siglas en ruso Tieoriya Riesheniya Izobrietatielskij Zadach.

D_1 : Diámetro exterior del resorte.

D_2 : Diámetro interior del resorte.

L : Largo del resorte en reposo.

σ_{ii} : Esfuerzo normal que actúa en la dirección i .

τ_{ij} : Esfuerzo cortante que actúa en la dirección i en un plano con una normal en la dirección j .

ν_{ij} : Menor coeficiente de poisson en el plano ij .

E_i : Módulo de Young en la dirección i .

G_{ij} : Módulo de cizalla en el plano ij .

S_y : Resistencia a la fluencia de un material.

σ' : Esfuerzo von Mises.

a : Relación de aspecto de un elemento.

$[K]$: Matriz de rigidez.

$\{u\}$: Vector de desplazamientos nodales.

$\{f\}$: Vector de fuerzas nodales.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
GLOSARIO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	3
1.1 Contexto	3
1.2 Definición del problema	4
1.2.1 Acople para la extracción o instalación de tuercas	5
1.2.2 Alcance de la herramienta	6
1.2.3 Brazo de reacción	7
1.3 Tecnologías utilizadas actualmente	8
1.4 Alcance de la memoria de titulación	10
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL	11
2.1 Proceso de diseño de productos	11
2.1.1 Requisitos de diseño.	12
2.1.2 Diseño conceptual.	12
2.1.3 Materialización.	13
2.1.4 Diseño de detalle.	13
2.2 Normas de diseño	13
2.3 Teoría de esfuerzos	15
2.4 Método de los elementos finitos	17
2.4.1 Software ANSYS	19
2.4.2 Mallado	20
2.4.2.1 Densidad de malla	21
2.4.2.2 Forma de los elementos de malla (distorsión)	22
2.4.2.3 Orden de los elementos	23
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	24
3.1 Herramienta de torque	24

3.2 Sistema de acople	25
3.2.1 Diseño de prototipo	25
3.2.1.1 Requisitos de diseño	25
3.2.1.2 Diseño conceptual	28
3.2.1.3 Materialización	30
3.2.1.4 Diseño de detalle	32
3.2.2 Prueba de concepto	33
3.2.3 Diseño industrial	35
3.3 Extensión	39
3.3.1 Parte interior	40
3.3.2 Brazo de reacción	43
3.4 Conjunto de sistema de acople y extensión	48
CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN	52
4.1 Análisis de esfuerzos mediante software de elementos finitos	52
4.1.1 Sistema de acople	55
4.1.2 Extensión	58
4.1.2.1 Parte interior	58
4.1.2.2 Brazo de reacción	61
4.2 Dimensionamiento de resorte	65
4.3 Análisis de resultados	67
4.3.1 Sistema de acople	67
4.3.2 Resorte	68
4.3.3 Parte interior	69
4.3.4 Brazo de reacción	70
CONCLUSIONES	71
TRABAJOS FUTUROS	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS	78
4.1 Figuras	78
4.2 Software utilizados	82
4.3 Equipos utilizados	83

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Operario realizando la tarea de Instalar/Extraer tuercas de una llanta OTR.	4
2	Acople perfecto entre dado de impacto y tuerca.	5
3	Acople fallido entre dado de impacto y tuerca.	6
4	Conjunto de rueda ACT.	6
5	Brazo inadecuado para la aplicación.	7
6	Sistema automatizado de NaS especificaciones técnicas (izquierda) e imagen de la herramienta (derecha).	9
7	Metodología a utilizar.	11
8	Gráficas de factores teóricos de concentración del esfuerzo.	16
9	Simulación del impacto de cascos de fútbol americano en el software ANSYS.	19
10	Diferencia relativa en los esfuerzos en los nodos compartidos para una malla gruesa(izquierda) y una malla fina (derecha).	21
11	Tipos de elementos comúnmente utilizados por softwares de elementos finitos.	22
12	Definición de la relación de aspecto para un cuadrilátero.	23
13	Plano de llave de torque controlado E-RAD 4000.	24
14	Características del modelo E-RAD 4000.	24
15	Plano de JP 2003181775.	27
16	Plano de WO/2003/031122.	27
17	Diagrama IDEF0 del prototipo de sistema de acople.	29
18	Diseño conceptual del sistema de acople.	29
19	Modelo 3D explosionado del sistema de acople.	30
20	Modelo 3D del sistema de acople armado y conectado al motor paso a paso.	31
21	Cada uno de los componentes del prototipo para la prueba de concepto por separado.	32

22	Prototipo de sistema de acople.	32
23	Arreglo implementado para efectuar la prueba de concepto.	33
24	Prueba de concepto de prototipo.	34
25	Dado de impacto, diseño industrial.	35
26	Base de dado de impacto, conexión a la extensión.	36
27	Sistema de acople, diseño industrial.	37
28	Plano de la base del sistema de acople, diseño industrial.	38
29	Plano del dado de impacto del sistema de acople, diseño industrial.	38
30	Plano de la tapa del sistema de acople, diseño industrial.	39
31	Parte interna de la extensión, conexión a sistema de movimiento rotacional. . .	41
32	Parte interna de la extensión, conexión a sistema de acople.	41
33	Parte interna de la extensión, diseño CAD.	42
34	Plano de parte interna de la extensión.	42
35	Sistema de rejilla, modelo CAD dos vistas.	44
36	Detalle de la conexión del brazo de reacción con la herramienta de torque. . . .	45
37	Detalle del cilindro que hace el punto de reacción 2 vistas.	45
38	Brazo de reacción de la extensión, diseño CAD.	46
39	Plano del acople cilíndrico del brazo de reacción de la extensión.	46
40	Plano del brazo de reacción.	47
41	Plano del cuadro del brazo de reacción de la extensión.	47
42	Plano del conjunto de brazo de reacción de la extensión.	48
43	Vista en corte de conjunto de sistema de acople y extensión.	48
44	Conjunto de sistema de acople, extensión y brazo de reacción, diseño CAD. . .	50
45	Plano de conjunto de sistema de acople, extensión y brazo de reacción, diseño CAD.	51

46	Vista desde el dado de las soluciones del sistema de acople.	55
47	Vista desde la base de las soluciones del sistema de acople.	56
48	Detalle de las concentraciones de esfuerzo para la solución del sistema de acople.	56
49	Detalle de las deformaciones en el sistema de acople vistas desde el dado. . . .	57
50	Gráfica de convergencia de resultados para sistema de acople.	57
51	Vista de las soluciones desde la conexión con la herramienta ERAD 4000. . . .	58
52	Vista de las soluciones desde la conexión con el sistema de acople.	58
53	Detalle de concentraciones de esfuerzo en la conexión con la herramienta ERAD 4000.	59
54	Detalle de las concentraciones de esfuerzo en la parte cilíndrica de la extensión.	59
55	Gráfica de convergencia de resultados para parte interna de la extensión.	60
56	Vista desde el acople a la tuerca adyacente para los esfuerzos aplicados en el brazo de extensión.	61
57	Vista desde el acople con la herramienta de torque para los esfuerzos aplicados en el brazo de extensión.	62
58	Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando la zona de acople a la tuerca adyacente.	62
59	Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando la malla fina en el eje redondo con filete en el hombro vista 1.	63
60	Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando la malla fina en el eje redondo con filete en el hombro vista 2.	63
61	Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando la zona de acople con la herramienta de torque.	64
62	Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando el riel, cuadro y golillas.	64
63	Gráfica de convergencia de resultados para el brazo de reacción.	65
64	Esquema de resorte, destacando sus dimensiones importantes.	66
65	Proceso de desarrollo de productos propuesto por Pahl.	78

66	Plano de rueda de camión KOMATSU 930e.	79
67	Tuerca comercial maraca IMPORTER.	80
68	Tuercas ubicadas muy cerca unas de otras en un camión OTR.	80
69	Relación de aspecto (aspect ratio) para ciertos tipos de celdas.	81
70	Elementos de primer y segundo orden.	81
71	Forma mas universal para punto de reacción.	82
72	Motor híbrido paso a paso OPENBUILDS utilizado en el arreglo.	83
73	Plano motor híbrido paso a paso.	83
74	Impresora 3D Ultimaker ² GO disponible en el laboratorio de prototipado de IDP UTFSM.	84
75	Paquete de actuadores lineales C-BEAM utilizado en el arreglo.	84
76	Placa controladora arduino CNC de 6 ejes utilizada en el arreglo.	85

ÍNDICE DE TABLAS

1	Normas y códigos utilizados.	14
2	Clasificación de recursos de TRIZ para la creación del prototipo de sistema de acople.	26
3	Requerimientos principales para el desarrollo del sistema de acople.	28
4	Definición de módulos funcionales para sistema de acople.	28
5	Lista de componentes del prototipo.	31
6	Requerimientos principales para la parte interior de la extensión.	40
7	Requerimientos principales para el brazo de reacción de la extensión.	44
8	Estado de requerimientos principales.	52
9	Propiedades mecánicas del bronce al estaño.	66
10	Pesos de los distintos elementos.	67

11	Lista de posibles materiales a utilizar para el sistema de acople.	68
12	Lista de posibles materiales a utilizar para el resorte.	68
13	Lista de posibles materiales a utilizar para la parte interior de la extensión. . . .	69
14	Lista de posibles materiales a utilizar para el brazo de reacción de la extensión.	70

INTRODUCCIÓN

En la minería chilena, gran parte del transporte de mineral se hace utilizando vehículos OTR. Como consecuencia de la caída en la ley del mineral, es necesario utilizar cada vez más vehículos o mantener a estos disponibles durante un mayor periodo de tiempo.

Para mantener la disponibilidad de estos, una de las tareas más frecuentes es la mantención de las ruedas. En este contexto, destaca el proceso de instalación y retiro de los neumáticos. Dadas las dimensiones de estos vehículos esta es una tarea muy peligrosa, y utiliza muchos recursos. Automatizar este proceso es un gran desafío para la industria, pero actualmente existen grandes obstáculos para realizar la instalación y extracción de tuercas en la rueda de forma automatizada.

El objetivo de este trabajo es dar alternativas de solución a los principales problemas existentes para automatizar el proceso de instalación y extracción de tuercas en ruedas de camiones OTR. Estos problemas son, el calce imperfecto existente entre el dado de impacto y la tuerca a extraer, el alcance limitado de las herramientas de torque, lo que le impide alcanzar las tuercas de difícil acceso en las ruedas OTR y la particularidad de los brazos de reacción.

Los ingenieros de diseño en general, requieren de una gran cantidad de información para la realización de soluciones concretas y funcionales. Utilizar una metodología estructurada, permite facilitar la obtención de información relevante para el desarrollo de la solución y sirve de guía durante el proceso de realización de un diseño conceptual.

Para solucionar el problema de calce, se propone el uso de una metodología basada en el proceso de desarrollo de productos propuesto por Pahl *et al.* [31]. A partir de este y en conjunto con otras técnicas de diseño, se manufactura un prototipo utilizando los recursos disponibles en los laboratorios de la Universidad Técnica Federico Santa María. Posteriormente, se realiza una prueba de concepto, la que entrega la información necesaria para desarrollar el producto para una escala industrial.

En lo que respecta a el diseño a escala industrial del sistema de acople, así como también los diseños de la extensión y brazo de reacción, que apuntan a ser parte de un sistema automatizado de extracción e instalación de tuercas para ruedas OTR. Se utilizan códigos y normas internacionales de diseño, al igual que técnicas como el Benchmarking, por razones económicas, de seguridad y por consideraciones de responsabilidad legal del producto.

Estos diseños son modelados en 3D y documentados mediante el software Autodesk Inventor. Y dada la complejidad en las geometrías de estos, para validar su capacidad de cumplir con los requerimientos planteados, de forma confiable. Se realiza un análisis de esfuerzos a través del software de elementos finitos ANSYS, para así obtener una caracterización numérica de las propiedades mecánicas de cada uno de estos diseños y de esta forma poder optimizarlos.

OBJETIVOS

El presente trabajo, tiene como objetivo general obtener una alternativa de solución al problema de calce entre la tuerca y la herramienta de torque, a través del desarrollo y prueba de un prototipo de sistema de acople. Además se contempla el diseño de una extensión y brazo de reacción para lograr alcanzar tuercas de difícil acceso.

Los objetivos específicos son:

- Identificar un proceso de diseño de productos adecuado para la aplicación.
- Definir los parámetros fundamentales tanto para el sistema de acople como para la extensión y brazo de reacción, tal que estos diseños sean extrapolables o fácilmente intercambiables dependiendo de la rueda a tratar.
- Desarrollar modelos 3D de los elementos en estudio.
- Caracterizar numéricamente las propiedades mecánicas de los diseños utilizando un software comercial como herramienta de análisis.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Contexto

En Chile, la minería es una de las principales actividades económicas. Aporta el 9.9 % del PIB nacional y es el área con mayor inversión extranjera con un 20 % del total [13]. Chile es el principal productor a nivel mundial de variados minerales, tales como, el cobre, renio, nitratos naturales, yodo y litio. Además destaca su participación en la producción de molibdeno, plata y oro. Posicionándose a nivel mundial 3°, 8° y 14° respectivamente [10]. Actualmente de todos los minerales explotados, el que tiene mayor relevancia para la economía del país es el Cobre.

De manera paralela a este contexto favorable de la minería Chilena, se presentan varias problemáticas, tales como: La nula existencia de empresas nacionales que desarrollen productos manufacturados derivados de los ánodos y cátodos de cobre, la casi inexistencia de empresas nacionales dedicadas a la producción de tecnología necesaria en el proceso de extracción de minerales y el aumento de los recursos necesarios para procesar una misma cantidad de mineral final a lo largo de los últimos años, asociados principalmente a las caídas en la ley del mineral[15]. Con este escenario económico, resulta evidente la necesidad de realizar investigación en tecnologías que permitan potenciar a esta industria.

En cuanto a la problemática del aumento de recursos necesarios para procesar la misma cantidad de mineral, se destaca el transporte de material. Esta tarea es realizada por camiones OTR, como afirma COCHILCO [11] “en una mina a cielo abierto la compra de camiones de extracción representa el 29 % del Capex”. Que va en aumento año a año, producto de la caída en la ley del mineral, como consecuencia, en la actualidad “el transporte de material es uno de los aspectos más importantes en una operación minera a cielo abierto, llegando a representar alrededor del 50 % de los costos operacionales e incluso el 60 %”.

Las proyecciones de movimiento de material en operación, indican que entre los años 2018 y 2025 el volumen de material (lastre + mineral), que requerirá ser movido en las minas a cielo abierto será de entre 2700 a 3100 Millones de toneladas por año, alcanzado su peak en los años 2021 y 2022, para luego comenzar a decrecer [12]. Una forma lógica de enfrentar este problema, es aumentando la disponibilidad de la flota de camiones OTR en las faenas a cielo abierto.

Dentro de la mantención de camiones OTR, una de las tareas que se realiza con mayor frecuencia es la mantención de las ruedas. Los neumáticos de un camión de OTR pueden llegar a medir casi 4 metros de diámetro y pesan 3 toneladas al estar desinflados[35]. En la mantención de este activo, destaca el proceso de instalación y retiro del neumático del camión, ya que, es la tarea que más recursos utiliza y la que conlleva el mayor porcentaje de accidentes.

Así como existen grandes empresas internacionales dedicadas al mercado de los neumáticos OTR como lo son Michelin, Goodyear, Bridgestone, Titan, Salfa, entre otras. También existen un numero reducido empresas nacionales que se dedican tanto a la mantención y reparación de neumáticos OTR, como también al estudio y desarrollo de tecnologías, que aportan en el crecimiento de esta industria, tales como Bailac, FMA Industrial y RFID Chile.[28]

1.2. Definición del problema

El proceso de instalación/retiro de neumáticos OTR requiere de la instalación/extracción de tuercas respectivamente. Actualmente, en la mayoría de las faenas mineras de nuestro país, esta tarea se realiza a través de un operario, el cual por medio de pistolas neumáticas e hidráulicas hace entrega del torque necesario para apretar las tuercas de los neumáticos ya reparados, o bien suelta y extrae las mismas para la posterior mantención del neumático. Como se muestra en la figura 1



Figura 1: Operario realizando la tarea de Instalar/Extraer tuercas de una llanta OTR.

Fuente: <http://www.bailac.cl/>.

Tan sólo la tarea de apretar las tuercas de una rueda de un camión OTR, de forma manual, toma al rededor de 2 horas, puesto que, para cumplir con su labor el operario debe completar una cierta cantidad de protocolos y procesos. Además las herramientas tienen un peso superior a los 10 [kg] y trabajan entregando torques del orden de los 3500 [Nm] [20]. En consecuencia, esta es una tarea de alto riesgo, de hecho es una de las principales causas de accidentes en las faenas mineras.

Por esta razón si se logra el desarrollo de una herramienta automatizada que cumpla con el objetivo de extraer e instalar las tuercas de las ruedas de camiones OTR. Se pueden obtener una serie de beneficios tales como:

- Evitar la interacción humano - máquina, y de esta forma evitar posibles errores humanos en el desarrollo de la tarea.
- Liberar al personal del área de riesgo o línea de fuego, para de esta reducir a 0 esta fuente de accidentes dentro de las faenas mineras.
- Ahorro de tiempo, considerando que la tarea será llevada a cabo bajo un protocolo y sin una gran utilización de los recursos, lo que reduce los costos de mano de obra y materiales.

Toda herramienta automatizada para la instalación o extracción de tuercas debe contar con un mecanismo que permita el movimiento de una o más llaves de impacto a través de la rueda, como por ejemplo brazos robóticos¹, para realizar las tareas de instalación o extracción de tuercas según un protocolo programado previamente, dependiente de la rueda a tratar.

A continuación se presentan los principales problemas que impiden el desarrollo de una herramienta automatizada para la instalación y extracción de tuercas en ruedas OTR.

1.2.1. Acople para la extracción o instalación de tuercas

El dado de impacto de una herramienta automatizada se puede alinear de forma concéntrica con la tuerca (por ejemplo a través de un alineamiento con láser), no obstante, para el proceso de instalación o extracción de tuercas es necesario un alineamiento de la geometría completa del dado de impacto y la tuerca a extraer para poder lograr un acople correcto.

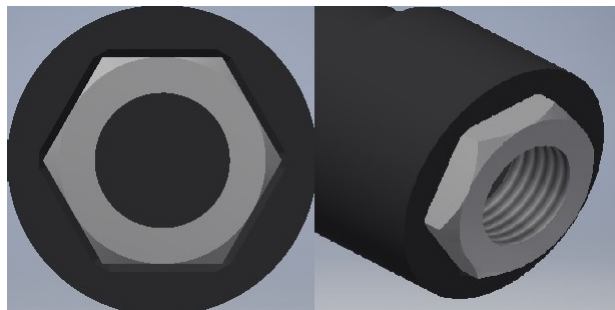


Figura 2: Acople perfecto entre dado de impacto y tuerca.

Fuente: Elaboración propia.

¹el tipo de mecanismo de movimiento no es un gran impedimento para el desarrollo de una herramienta automatizada, por lo que, para efectos de este trabajo de título se tratará como una “caja negra”.

Como se muestra en la figura 2 los 6 vértices del dado hexagonal deben estar perfectamente alineados con los 6 vértices de la zona interior del dado de impacto para poder lograr el acople necesario para el proceso de instalación o extracción. Pero esto no siempre es posible, ni siquiera utilizando técnicas sofisticadas, como el mapeo de texturas, ya que estas herramientas deben estar diseñadas para operar en faenas mineras en donde es común estar sujeto a levantamientos de polvo y vibraciones del terreno.



Figura 3: Acople fallido entre dado de impacto y tuerca.
Fuente: Elaboración propia.

En caso de que el dado de impacto y la tuerca estén alineados de forma concéntrica, pero sus vértices se encuentren desalineados, tal como se muestra en la figura 3 el acople será imposible de lograr, puesto que la tuerca no se insertará en el dado, esto tiene como consecuencia de que la herramienta quede trabada, lo que además de provocar que la herramienta no cumpla con su función puede generar la destrucción de algún elemento de la misma o la tuerca a tratar.

1.2.2. Alcance de la herramienta

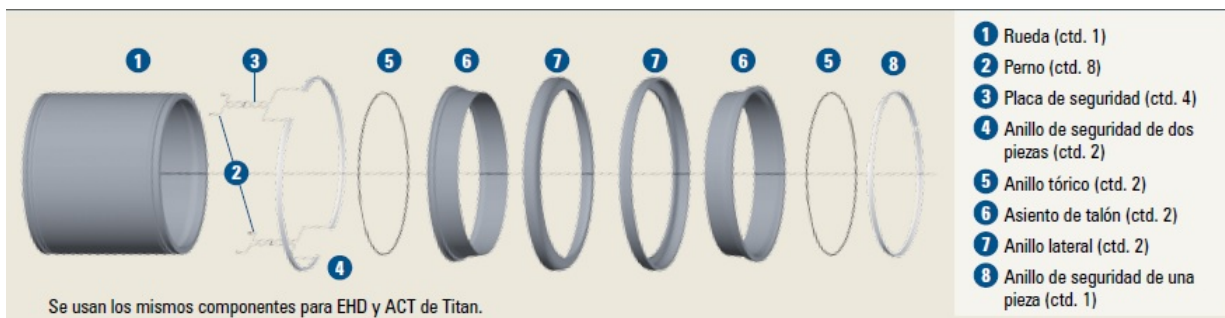


Figura 4: Conjunto de rueda ACT.
Fuente: Catálogo de productos Titan Mining [38].

Una llanta OTR cuenta con diferentes componentes, los cuales están sujetos entre sí a través de tuercas ubicadas en distintas partes de la llanta, algunas en lugares de muy difícil acceso, como se aprecia en la figura 4. Para este trabajo de título, se asume, que el mecanismo de movimiento de las herramientas de torque (“caja negra”) de la herramienta automatizada, tiene un alcance o capacidad suficiente, sólo para extraer o instalar tuercas de la zona exterior de las llantas, sin opciones de acceso a las tuercas interiores, por lo que, de esta manera, resulta imposible montar o desmontar las ruedas de camiones OTR.

1.2.3. Brazo de reacción

En un sistema automatizado, tanto para los brazos de reacción, al igual que para el alcance de las herramientas, resulta una gran desventaja las diversas posiciones que puede tener una tuerca en una rueda de un camión OTR, donde en algunas ocasiones, estas se encuentran muy juntas unas con otras, lo que dificulta el posicionamiento correcto de la herramienta (ver figura 68 en el apartado anexos).

En el caso particular de los brazos de reacción, dependiendo de la forma de los mismos su uso se ve muy limitado al tipo de tuerca que se este tratando, ya que estos tienen posiciones específicas en las cuales deben estar ubicados, tal como se aprecia en la siguiente figura:

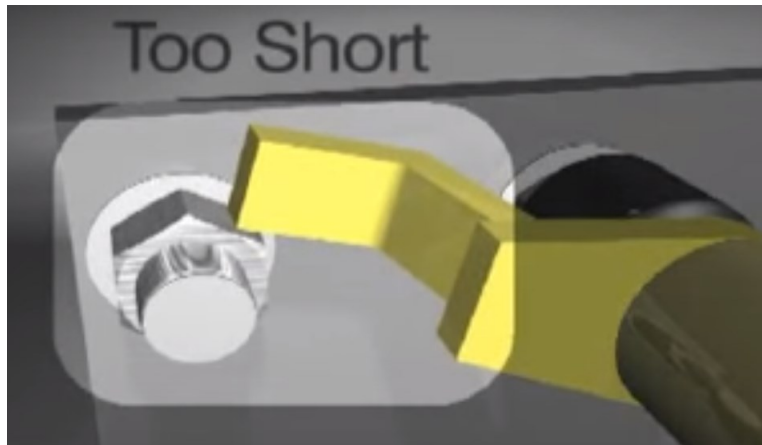


Figura 5: Brazo inadecuado para la aplicación.
Fuente: radtorque.com

1.3. Tecnologías utilizadas actualmente

Actualmente en el mercado de la región es posible encontrar una gran variedad de empresas dedicadas a al diseño y comercialización herramientas y accesorios de impacto. Como es el caso de:

- Urrea [40]
- Makita [26]
- Stanley [36]
- Bosch [6]
- DeWalt [17]
- Gearwrech [19]

Pero estas no necesariamente son aplicables a la industria minera, si bien, el principio de funcionamiento es el mismo, sus herramientas y accesorios de impacto no se encuentran diseñados para trabajar a la escala requerida por la industria minera (Ruedas OTR). Mas bien, sus principales aplicaciones son la industria de la construcción y la industria automotriz.

En cuanto a las herramientas de este tipo utilizadas en minería, se destaca en Sudamérica la marca RAD, esta marca presenta una gran variedad de herramientas y accesorios de impacto que son capaces de cumplir con los requerimientos necesarios para realizar la mantención a las ruedas OTR. RAD actualmente no cuenta con sistemas automatizados para el tratamiento de ruedas OTR, en efecto, sus herramientas se encuentran diseñadas para ser manejadas por un operario, en consecuencia, sus diseños cuentan con muchas desventajas e impedimentos para ser implementados en un sistema automatizado, como por ejemplo el elevado peso de las extensiones [34].

Cabe destacar que los sistemas automatizados para extracción e instalación de tuercas no son muy comunes y su información es escasa. Algunas de las patentes existentes son estudiadas en el punto 3.2.1.1 muchas de las cuales se implementan para ciertas aplicaciones en específico.

En el marco de sistemas automatizados la empresa Atlas Copco consta de un sistema de brazos de reacción y detección de posición de herramientas [4]. Pero este sistema no cuenta con las características necesarias para trabajar a la escala de neumáticos OTR.

FMA Industrial es una empresa dedicada a entregar soluciones de ingeniería para la industria minera, de hecho a fines del año 2017 Bailac Thor incorporó para su faena en Minera Collahuasi una Destalonadora de Neumáticos, una herramienta para sacar el anillo de protección de los neumáticos OTR [18]. Pero actualmente la empresa no cuenta con un sistema automatizado para la extracción e instalación de tuercas en neumáticos OTR.

Por su parte la empresa Naman Automotive Solutions cuenta con un sistema automatizado para realizar cambios de llantas de neumáticos, tal como se muestra en la figura 6.

Fully Automatic Truck Tyre Changer	
Technical Specifications:	
Rim Diameter	14' to 26'
Max. Wheel Diameter	2300 mm
Max. Wheel Width	1300 mm
Gear Box Motor	2.4/3.0 kw, 415-3ph, 50Hz
Hydraulic Pum Motor	1.1 kw
Operating Pressure	0-130 bar
Noise	<70db
Versatile 4 jaw universal chuck with tow rotation speeds	
Versatile locking jaws with several gripping positions	
Balancing Type : Statetic / Dynamic / Alloy	
Can handle OTR wheels upto 56' diameter with ease	
Moveable control unit and tool support and platform	
Hydraulic motor with pressure regulating device	



Figura 6: Sistema automatizado de NaS especificaciones técnicas (izquierda) e imagen de la herramienta (derecha).

Fuente: Naman Automotive Solutions (2013) [29].

Con la información, a rasgos generales, que se puede obtener de la misma, se destaca que si bien, de lo disponible en el mercado, es la solución más cercana a lo que se busca diseñar, esta no cumple con las especificaciones técnicas necesarias para tratar todas las ruedas de camiones OTR existentes en el mercado, ya que puede trabajar tan solo con ruedas OTR cuyo diámetro no exceda las 56 pulgadas [29]. Además de otras especificaciones y detalles técnicos de la máquina, que pudiesen generar impedimentos para implementar su uso en algunas faenas mineras.

1.4. Alcance de la memoria de titulación

En el desarrollo de este trabajo se entregan alternativas de solución para los principales problemas que dificultan el desarrollo de una herramienta automatizada para la instalación o extracción de tuercas en camiones OTR. Se realiza el diseño de un sistema de acople, de una extensión y de un brazo de reacción², a partir de las dimensiones de la rueda de un camión OTR que presenta sus planos de diseño disponibles de manera gratuita en la web, siguiendo un proceso de desarrollo de productos estructurado y aplicando normas y códigos internacionales de diseño, tales como lo son ASME e ISO.

Para esto se realizan diseños asistidos por computadora utilizando los software disponibles en el laboratorio de mecánica computacional del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María además del desarrollo prototipos en el taller de prototipado del departamento de Ingeniería en diseño de productos de la misma institución.

Se diseña en base a la información sobre ruedas de camiones mineros disponible de manera pública a través de la web e información disponible en las bibliotecas de la Universidad Técnica Federico Santa María (ver sección bibliográfica), con el objetivo de que la propuesta de solución cumpla con su función bajo las condiciones más desfavorables posibles, vale decir donde los diseños sean sometidos al mayor esfuerzo interno posible (esfuerzo normal y esfuerzo cortante), teniendo en cuenta sólo la información recopilada. De manera tal que el diseño realizado para la rueda especificada este trabajo sea fácilmente extrapolable a la mayor cantidad de ruedas OTR disponible en el mercado y sea posible diseñar elementos intercambiables según la rueda a tratar. Para que de esta forma estos diseños puedan ser implementados en la mayor cantidad posible de sistemas automatizados para instalación o extracción de tuercas en ruedas de camiones utilizados en la industria minera³

²En este trabajo de título, se consideraran ambos elementos como parte de un mismo sistema de extensión

³Por esta razón las condiciones de borde que entregará la “caja negra”, serán las más comunes posibles según la información recopilada.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

2.1. Proceso de diseño de productos

El proceso de diseño de un producto nuevo, implica complejas actividades y requiere de una gran cantidad de información proveniente de diversas fuentes, por esta razón resulta de gran utilidad seguir una metodología estructurada, para facilitar la obtención de la información relevante y servir de guía en el proceso de diseño conceptual. A estas metodologías se les llama proceso de desarrollo de productos (PDP), en la actualidad existe una variedad PDP de diversos autores, cada uno de los cuales define una serie de fases de diseño esenciales, las cuales son consideradas como necesarias para desarrollar un producto.

Se plantea la diseñar la solución para el problema de acople siguiendo el PDP propuesto por Piñones [32] el cual se basa en el modelo propuesto por Pahl *et al.* [31]⁴. Las distintas etapas de la metodología propuesta por Piñones se describen en la Figura 7, la cual corresponde a 4 etapas que constan de sub-etapas con el objetivo de enfocar el proceso de aplicación.

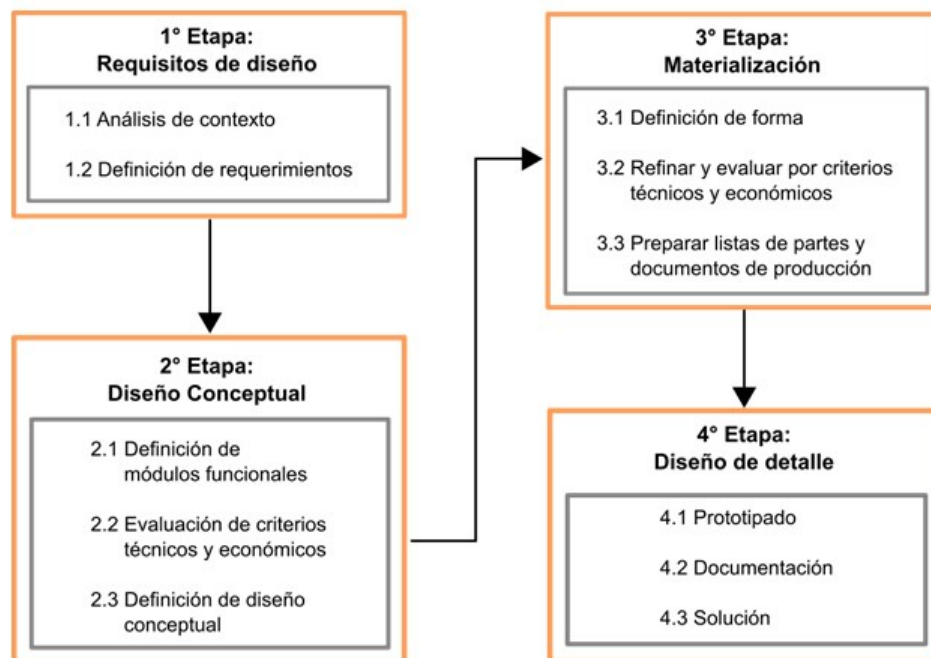


Figura 7: Metodología a utilizar.

Fuente: Piñones (2016). Casos de estudio de la aplicación de una metodología de diseño en el contexto de la industria minera [32].

⁴La Metodología propuesta por Pahl *et al.* [31] se encuentra en la sección anexos figura 65

En este caso en particular, se desarrolla un prototipo que tiene como objetivo realizar de manera satisfactoria una prueba de concepto y no un producto final, por esta razón algunas de las sub-etapas del PDP son omitidas (algunos criterios técnicos y económicos, documentación, etc.) Dichas etapas son incluidas en el diseño industrial, además se integran técnicas puntuales de diseño al proceso de desarrollo del prototipo, tales como diagramas IDEF0, TRIZ, Benchmarking y algunas normas de diseño para tolerancias dimensionales y para llaves y diversos accesorios de impacto, con el fin de obtener información relevante para el diseño del prototipo y facilitar el diseño final.

A continuación se explica de forma general cada etapa:

2.1.1. Requisitos de diseño.

Es una situación común, que al momento de ser planteado un problema de diseño a un diseñador los requerimientos y especificaciones no estén definidos en su totalidad, en consecuencia, el objetivo de esta etapa es obtener información adicional tanto de la problemática como del cliente que solicita la resolución de esta. Para así, a partir de este proceso, poder definir los requerimientos y limitantes que posee el proyecto de diseño, y de esta forma utilizarlos como guía en las siguientes etapas.

En esta etapa se realiza un análisis del contexto del proyecto, desde el punto de vista del cliente que lo plantea y desde el proyecto en sí. En esta parte se realiza un estudio en base a la clasificación de recursos de TRIZ para detectar las limitantes y oportunidades de desarrollo del proyecto mismo y el Benchmarking para obtener información relacionada al diseño de proyectos similares.

Para finalmente poder realizar una definición exacta de los requerimientos del proyecto de diseño.

2.1.2. Diseño conceptual.

El objetivo de esta segunda etapa es integrar los requerimientos detectados en la etapa anterior en un conjunto de módulos funcionales y definir los límites del diseño. De esta forma se obtiene una primera visualización del proyecto en su totalidad para de esta forma poder realizar cambios que impliquen un costo menor en cuanto a tiempo y recursos en comparación a que si se realizaran en etapas posteriores.

En esta etapa en base al análisis del contexto se utilizan los elementos que pueden ser de utilidad en términos de funciones. Además se deben reconocer las funciones a integrar en el producto que son necesarias para que este cumpla con su objetivo y los requerimientos planteados así como las limitantes del mismo.

Para luego definir un diseño conceptual del producto mediante un diagrama que plantee la estructura funcional del mismo.

2.1.3. Materialización.

Luego de definir el diseño conceptual y los módulos funcionales, se llega a esta etapa que tiene como objetivo definir de forma precisa aquellos componentes que compondrán dichos módulos. De esta manera, mientras más precisión exista en esta etapa, con mayor facilidad se podrá saber si la solución responde a los requerimientos planteados.

En esta etapa se plantea definir la forma del producto final a través de un software CAD, para poder visualizar con absoluta precisión la forma en la que se encuentran conectados los componentes y las dimensiones generales del producto a desarrollar. Además de preparar una lista de partes y los documentos necesarios para su producción.

2.1.4. Diseño de detalle.

Finalmente esta etapa tiene como objetivo la realización física del producto, el planteamiento de modificaciones referentes a la selección de componentes, materiales, formas o acabados. Convirtiéndose en el vínculo entre el producto en desarrollo y un producto que se inserta en el mercado. Dentro de esta etapa se encuentra la sub-etapa de prototipado, que servirá para determinar las modificaciones que sean necesarias y servir como base para el producto final. Luego la sub-etapa de documentación, que hace referencia a todos los documentos necesarios para la fabricación del producto final, como planimetrías modelos CAD listados de piezas y componentes a utilizar en el producto así como sus especificaciones. Y finalmente la sub-etapa de solución, que corresponde a la realización física del producto final que puede ser replicado gracias a la documentación generada previamente.

2.2. Normas de diseño

Una norma técnica es un documento aprobado por un organismo reconocido que establece especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico, que hay que cumplir en determinados productos, procesos o servicios.

Budynas R.G.(2008) [7] afirma “Una norma es un conjunto de especificaciones para partes, materiales o procesos establecidos a fin de lograr uniformidad, eficiencia y cantidad especificadas. Uno de los propósitos importantes de una norma es poner un límite al número de artículos en las especificaciones para proporcionar un inventario razonable de herramientas, tamaños, formas y variedades”(p.12) además define “Un código es un conjunto de especificaciones para analizar, diseñar, manufacturar y construir algo. El propósito de un código consiste en lograr un grado específico de seguridad, eficiencia y desempeño o calidad. Es importante observar que los códigos de seguridad no implican seguridad absoluta. De hecho, la seguridad absoluta es imposible de obtener”. (p.12)

El nombre de la organización proporciona una guía de la naturaleza de la norma o código, algunas de las organizaciones de interés para los ingenieros mecánicos son [7]

- American Gear Manufacturers Association (AGMA)
- American Iron and Steel Institute (AISI)
- American National Standards Institute (ANSÍ)
- American Society of Mechanical Engineers (ASME)
- American Society of Testing and Materials (ASTM)
- British Standards Institution (BSI)
- Institution of Mechanical Engineers (I. Mech. E.)
- International Bureau of Weights and Measures (BIPM)
- International Standards Organization (ISO)
- Society of Automotive Engineers (SAE)

Entre otras. Las normas utilizadas en este trabajo y una breve descripción de ellas se presentan en la tabla 1

Tabla 1: Normas y códigos utilizados.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Descripción
ASME ASME B107.110 [1]	“Socket Wrenches, Handles, and Attachments”
ASME B107.33M [2]	“Metric Impact Sockets”
ASME B107.4M [3]	“Driving and Spindle Ends for Portable Hand, Impact, Air, and Electric Tools (Percussion Tools Excluded)”
Código ASME [23]	“Factor de seguridad y diseño”
ISO 286 [22]	“Tolerancias Dimensionales”

2.3. Teoría de esfuerzos

La supervivencia de muchos productos depende de la forma en que el diseñador ajusta el esfuerzo inducido por la carga para que sea menor que la resistencia en un punto de interés. Debe permitir que la resistencia exceda al esfuerzo por un margen suficiente, de manera que a pesar de las incertidumbres, la falla no sea frecuente.

Los ingenieros deben adecuarse a la incertidumbre, pues ésta siempre acompaña al cambio. Existen métodos matemáticos para enfrentar las incertidumbres. Las técnicas básicas son los métodos determinísticos y estocásticos. El método determinístico establece un factor de diseño basado en las incertidumbres absolutas de un parámetro de pérdida de función y un parámetro máximo permisible. En ciertos casos el parámetro puede ser la carga, el esfuerzo, la deflexión, etc. Por lo tanto, el factor de diseño n_d se define como:

$$n_d = \frac{PPF}{PMP} \quad (1)$$

Donde: PPF es parámetro de pérdida de función y PMP es parámetro máximo permisible. Después de terminar el diseño, el factor de diseño real puede cambiar como resultado de cambios como el redondeo a un tamaño estándar de una sección transversal o el uso de componentes recién lanzados con clasificaciones más altas en lugar de emplear lo que se había calculado usando el factor de diseño. En este caso, el factor se conoce como factor de seguridad, n , que tiene la misma definición que el factor de diseño, pero por lo general difiere en su valor numérico. Como el esfuerzo puede no variar en forma lineal con la carga, el uso de la carga como el parámetro de pérdida de función puede no ser aceptable. Entonces, es más común expresar el factor de diseño en términos del esfuerzo y una resistencia relevante. Budynas R.G.(2008). [7]

Para este trabajo en particular se utiliza la siguiente definición de factor de seguridad:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (2)$$

Donde debido a la aplicación del diseño el valor numérico para este factor es de 3 [23].

Debido a que el material utilizado en el diseño es un acero dúctil, la teoría de falla a utilizar es la teoría de la energía de distorsión o Teoría de von Mises, dicha teoría predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material. Usando las componentes xyz del esfuerzo tridimensional, el esfuerzo von Mises puede escribirse como:

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} * [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Cualquier discontinuidad en una parte de una máquina altera la distribución del esfuerzo en las inmediaciones de la discontinuidad, de manera que las ecuaciones elementales del esfuerzo ya no describen el estado de esfuerzo en la parte. A estas discontinuidades se les denomina intensificadores de esfuerzos, mientras que a las regiones en las cuales ocurren se les llama áreas de concentración del esfuerzo. La concentración de esfuerzos provoca alguna irregularidad no inherente en el elemento, como marcas de herramientas, agujeros, estrías, ranuras o roscas. Se dice que el esfuerzo nominal existe si el elemento se presenta libre del intensificador de esfuerzos. Se emplea un factor teórico o geométrico de la concentración de esfuerzos K_t o K_{ts} para relacionar el esfuerzo máximo real en la discontinuidad con el esfuerzo nominal. Los factores se definen por medio de las ecuaciones.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (4)$$

$$K_{ts} = \frac{\tau_{max}}{\tau_0} \quad (5)$$

Estos factores de esfuerzo solo dependen de la geometría de la parte a diseñar, no obstante el análisis de las formas geométricas para determinar los factores de concentración de esfuerzos es un problema difícil y no se encuentran muchas soluciones. La mayoría de los concentradores de esfuerzos se determina por medio de técnicas experimentales. Budynas R.G.(2008). [7]. La figura 8 presenta a modo de ejemplo las gráficas de factores teóricos de concentración del esfuerzo para un eje redondo con un filete en el hombro de torsión.

Figura A-15-8

Eje redondo con filete en el hombro en torsión. $\tau_0 = Tc/J$, donde $c = d/2$ y $J = \pi d^4/32$.

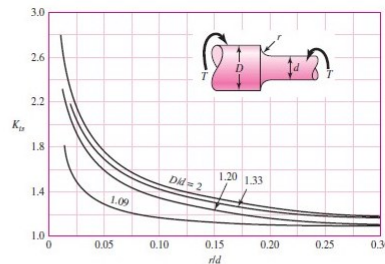


Figura A-15-9

Eje redondo con filete en el hombro en flexión. $\sigma_0 = Mc/I$, donde $c = d/2$ y $I = \pi d^4/64$.

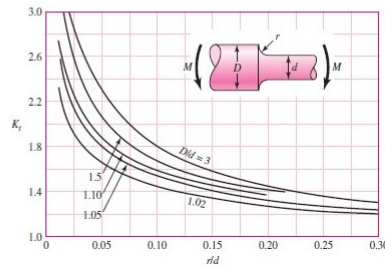


Figura 8: Gráficas de factores teóricos de concentración del esfuerzo.
Fuente: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. [7].

2.4. Método de los elementos finitos

Para una comprensión acabada de este trabajo, resulta necesario dar a conocer al menos a grandes rasgos este método, debido a que, mediante este método se valida la solución como se aprecia en el capítulo 4.

Muchos de los problemas de ingeniería pueden ser expresados en forma de ecuaciones gobernantes (ecuaciones diferenciales) y condiciones de borde, el método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales.

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos (nodos) e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada.

Algunas ventajas del MEF son:

- Menores costos y tiempo requeridos en la búsqueda de nuevos diseños.
- Capacidad de estudiar fenómenos difíciles de observar por la vía experimental.
- Permite modelar cuerpos compuestos por distintos materiales.
- Permite analizar una gran variedad de condiciones de contorno, incluyendo condiciones ideales.
- Resultados caracterizados por un alto nivel de detalles.

Algunas desventajas del MEF son:

- Necesidad de personal adecuadamente entrenado para aplicarlo de manera correcta.
- Costo de hardware y software.
- Errores computacionales en el modelamiento.
- Modelos requieren de validación experimental.

El término elemento finito fue introducido por primera vez por Clough en 1960. A principios de la década de 1960, los ingenieros utilizaron el método para soluciones aproximadas de problemas en análisis de esfuerzos, flujo de fluidos y transferencia de calor. El primer libro de MEF fue publicado por Zienkiewicz y Chung en 1967.

Desde finales de la década del 60 y principios de la década del 70 el MEF fue aplicado a una gran variedad de problemas de ingeniería, en esta misma década es donde se originan la mayoría de los softwares comerciales que utilizan el MEF para resolver problemas de ingeniería (Abaqus, Adina, Ansys, etc.)[16].

En la actualidad es considerado una de las mejores herramientas para resolver de manera eficiente una gran variedad de problemas [25].

La solución de elementos finitos de un problema sigue una metodología estándar. O.C. Zienkiewicz [30](2005) afirma “Los pasos a seguir en cualquier proceso de solución siempre son los siguientes”:⁵

1. Se define el problema a resolver en términos de ecuaciones diferenciales. Se construye la forma integral para el problema como trabajo virtual, variacional o formulación débil.
2. Se selecciona el tipo y el orden de los elementos finitos que se utilizarán en el análisis.
3. Se define la malla para el problema. Esto implica la descripción del nodo y la disposición del elemento, así como la especificación de condiciones de contorno y parámetros para el formulación utilizada. El proceso para la generación de mallas se describirá con más detalle en Capítulo 2.4.2.
4. Se calcula y ensamblan las matrices de elementos. El trabajo virtual, variacional o la forma débil proporciona la base para calcular las relaciones específicas de cada elemento.
5. Se resuelve el conjunto resultante de ecuaciones algebraicas lineales para los parámetros desconocidos.
6. Se muestran los resultados para las variables nodales y de elementos. Las gráficas también son útiles para este paso.

El método de elementos finitos es reconocido por ser eficaz a la hora de determinar soluciones a problemas complejos, donde mediante CAD (computer-aided design) es posible obtener soluciones de manera rápida y económicamente atractivas.

El conjunto de ecuaciones algebraicas simultaneas siempre tiene la siguiente forma:

$$[K] * \{u\} = \{f\} \quad (6)$$

Donde: $[K]$ es la matriz de propiedades ; $\{u\}$ es el vector de comportamiento y $\{f\}$ es el vector de acción. Estos componentes representan distinta propiedades físicas las cuales son dependientes del problema.

⁵Para mayor información con respecto al método utilizado consultar referencia O.C. Zienkiewicz [30]

2.4.1. Software ANSYS

ANSYS es un software de elementos finitos, donde mediante este método, puede resolver problemas de variados ámbitos ingenieriles, como lo son la mecánica estática, mecánica dinámica, mecánica de fluidos, transferencia de calor, electricidad, entre otros. Para este trabajo se utiliza la versión 19.1 y el módulo de análisis Static Structural.

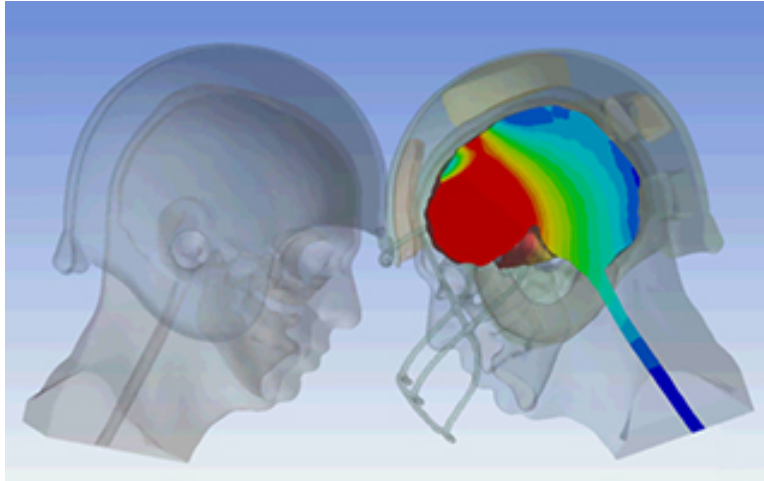


Figura 9: Simulación del impacto de cascos de fútbol americano en el software ANSYS.

Fuente: <https://www.ansys.com>

El proceso de análisis que realiza este software se puede dividir en 3 grandes pasos:

1. Construir un modelo de elementos finitos (pre proceso).
2. Realizar análisis numérico (proceso).
3. Ver los resultados (post proceso).

En el pre proceso se ingresan los datos de entrada del problema. Como principales tareas en este paso se define el dominio computacional, se realiza la generación de la malla⁶, se seleccionan los fenómenos a modelar, se definen las propiedades de los materiales, se definen las condiciones de borde y los criterios de convergencia. El paso 2 es realizado 100 % por la computadora, según los parámetros definidos en el pre proceso. El post proceso corresponde a la visualización de los resultados para el análisis de la solución, en este caso si se encuentran inconsistencias en el modelo, se vuelve al pre proceso para hacer modificaciones que mejoren la calidad de la modelación.

⁶A la hora de construir un modelo de elementos infinitos es de vital importancia realizar un mallado adecuado al problema.

2.4.2. Mallado

El mallado alude a la forma en la que un dominio a estudiar es dividido en sub-dominios o elementos finitos. Por definición, una malla es una red formada por celdas y puntos. Puede tener casi cualquier forma en cualquier tamaño y se usa para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Cada celda de la malla representa una solución individual de la ecuación que, cuando se combina para toda la red, da como resultado una solución para toda la malla.

Resolver el objeto completo sin dividirlo en partes más pequeñas puede ser imposible debido a la complejidad que se encuentra dentro del objeto. Los agujeros, esquinas y ángulos pueden hacer que sea muy difícil obtener una solución. Las celdas pequeñas, por otro lado, son comparativamente fáciles de resolver y, por lo tanto, la estrategia preferida para dar solución a un problema.

La generación de mallas para la discretización de un continuo mediante elementos finitos es una etapa importante, previa al análisis, ya que de ella dependerán dos factores relevantes para cualquier estudio numérico: precisión y costo computacional. (Chandrupatla & Belegundu, 2002) [9].

El propósito principal de una malla de elementos finitos es aproximar adecuadamente la geometría del cuerpo que se está modelando, teniendo en cuenta todas las características de la geometría de la pieza, que son significativas para la solución.

Se dice que una malla adecuada es aquella que proporciona resultados suficientemente precisos con un coste razonable, asumiendo que todas las demás entradas al modelo son precisas.

Una de las formas de evaluar la calidad de su malla (y un modelo en general) es comparar los resultados con los datos de prueba o con los valores teóricos. Desafortunadamente, los datos de las pruebas y los resultados teóricos a menudo no están disponibles. Por lo tanto, se necesitan otros medios para evaluar la calidad de la malla, estos incluyen el refinamiento de la malla y las interpretaciones de las discontinuidades de los resultados.

La calidad de una malla puede tener ciertas tendencias y conceptos generales, los cuales funcionan de forma similar para una gran cantidad de casos, no obstante, no existe una receta para desarrollar un modelo válido, ya que la “validez” del modelo es particular del fenómeno en sí a analizar.

A continuación se definen algunos conceptos fundamentales para determinar la calidad de un mallado:

2.4.2.1. Densidad de malla Cuando se habla de densidad de malla se hace referencia al número de elementos por unidad de área en una malla. Es posible crear mallas de diversas áreas con densidades distintas. En general el uso de una malla de mayor densidad en características importantes suele proporcionar resultados más precisos en dichas áreas, no obstante, requieren un mayor tiempo de análisis. Por ende la densidad de malla en un modelo de elementos finitos es un tema importante debido a su relación con la precisión y el costo. La densidad de malla requerida puede ser una función de muchos factores. Entre ellos se encuentran los gradientes de tensión, el tipo de cargas, las condiciones de contorno, los tipos de elementos utilizados, las formas de los elementos y el grado de precisión deseado. En la figura 10 se aprecian diferencias entre una malla gruesa (de menor densidad) y una fina (de mayor densidad).

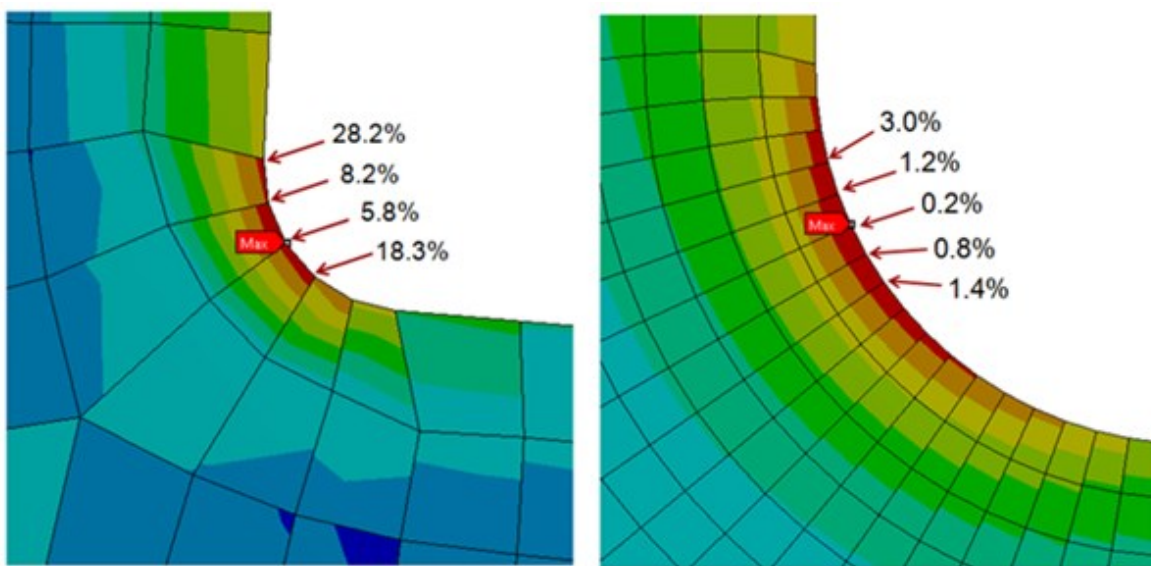


Figura 10: Diferencia relativa en los esfuerzos en los nodos compartidos para una malla gruesa(izquierda) y una malla fina (derecha).

Fuente: <https://caeai.com/> [8]

En general, se recomienda, aumentar el numero de elementos en o cerca de las posibles cargas puntuales, puntos de discontinuidad geométrica. En los vínculos y en aquellas regiones que se requiera información acerca de tensiones o desplazamientos.

2.4.2.2. Forma de los elementos de malla (distorsión) La forma de los elementos de malla (o forma de celdas) depende de la geometría del modelo a analizar, comúnmente, se importa la geometría CAD al software de elementos finitos, para iniciar con el proceso de mallado de la geometría, donde se tienen diferentes opciones, tanto para modelos 2D como 3D.

En la figura 11 se muestran los tipos de elementos más comunes que se emplean en softwares comerciales de elementos finitos.

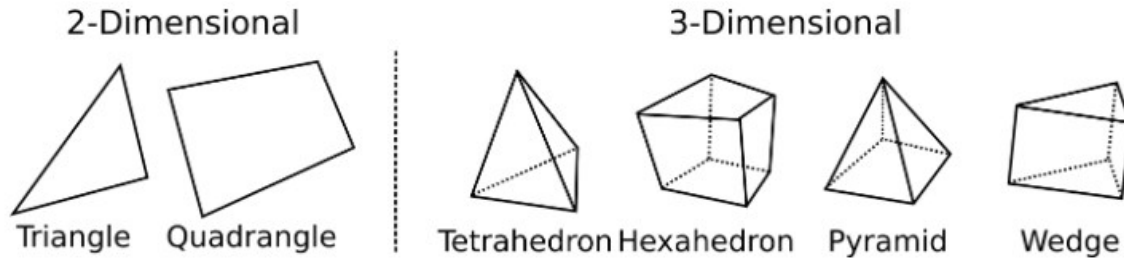


Figura 11: Tipos de elementos comúnmente utilizados por softwares de elementos finitos.

Fuente: <https://simscale.com>

Se define la distorsión de un elemento como el grado de desviación de dicho elemento respecto del elemento regular de referencia. Dependiendo del tipo de celda utilizado, el elemento regular de referencia es distinto, como, por ejemplo: El triángulo equilátero es elemento de referencia para mallas triangulares, el cuadrado en mallas de cuadriláteros, el tetraedro regular en mallas de tetraedros, el cubo en mallas de hexaedros, etc.

Para la mayoría de los problemas, la presencia de elementos distorsionados disminuye la precisión de la solución. No obstante, para ciertos problemas en particular, elementos distorsionados producen un rendimiento superior (como por ejemplo, en problemas marcadamente anisótropos). [14]

Dentro del marco de la forma de los elementos de malla, un concepto importante a definir es la relación de aspecto: esta se define como la relación entre la mayor y menor dimensión en un elemento. En general la relación de aspecto "a" se define como:

$$a = \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

Donde r_2 es el radio del círculo más largo que contiene al elemento y r_1 es el radio del círculo más pequeño contenido en el elemento. Para el caso particular de elementos rectangulares es la razón entre el lado más largo y el lado más corto como, como se muestra en la figura 12.

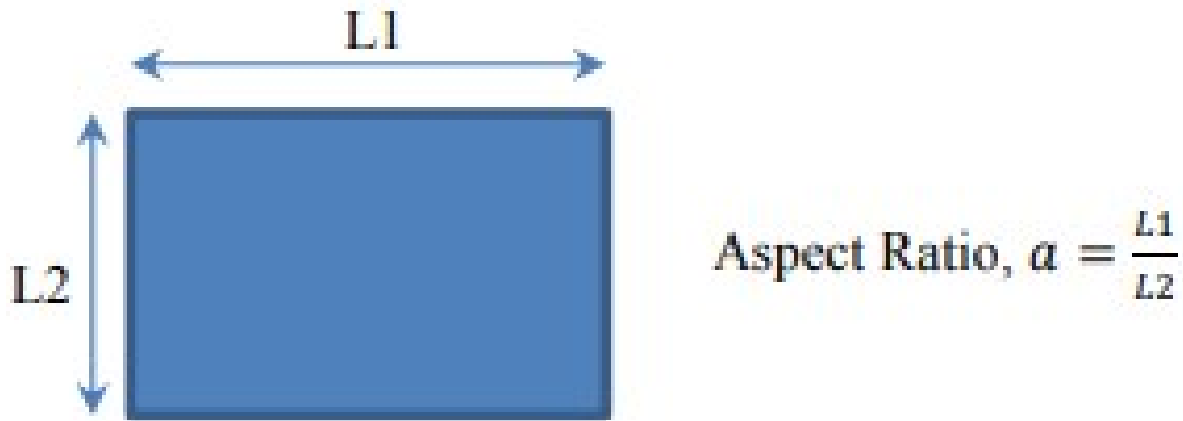


Figura 12: Definición de la relación de aspecto para un cuadrilátero.

Fuente: <https://structurepoint.org> [37]

Como se puede apreciar en la figura 11 los elementos normalmente derivan de formas de triángulos y cuadriláteros, en general se busca que la malla sea uniforme y simple, en donde los elementos sean lo mas equiláteros y regulares posibles. Normalmente la relación de aspecto sale especificada en la mayoría de los softwares de elementos finitos pudiéndose establecer valores límites para la misma, el valor recomendado para la relación de aspecto y su influencia en los resultados depende del problema a analizar.

2.4.2.3. Orden de los elementos Después de la discretización en el MEF, a todos los elementos se les asigna una función (un polinomio) que se usaría para representar el comportamiento del elemento. Las ecuaciones polinómicas son utilizadas en este caso, ya que se pueden diferenciar e integrar fácilmente. El orden de un elemento es el mismo que el orden de la ecuación polinomial utilizada para representar el elemento. Un elemento lineal o un elemento de primer orden tendrá nodos solo en las esquinas. Por otra parte, un elemento de segundo orden o elemento cuadrático tendrá nodos laterales medios además de nodos en la esquina. Ver figura 70 en sección anexos.

Un elemento lineal necesita de una ecuación lineal para representar el comportamiento del elemento. Mientras que uno cuadrático necesita de una ecuación cuadrática para describir su comportamiento ya que tiene tres nodos. Vale decir, que para el caso de una función de primer orden se tiene un numero menor de nodos para el mismo número de elementos que una función de segundo orden.

El uso de uno por sobre otro dependiendo del problema, afecta a la solución en términos de precisión, tasa de convergencia y estabilidad. Al igual que para los conceptos anteriores, no existe un orden de elementos que sea mejor que el otro para todos los casos, el uso de elementos de primer o segundo orden depende únicamente del problema a analizar.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

3.1. Herramienta de torque

Para lograr instalar o extraer una tuerca es necesario el uso de una herramienta de torque. Para este trabajo de título se utiliza la llave de torque controlado electrónica E-RAD 4000, debido a que al ser electrónica, es más universal que las versiones neumáticas y más veloz que las hidráulicas, además esta cumple con el rango de torque necesario para instalar o extraer las tuercas de la rueda estudiada en este trabajo de título. El plano y las características del modelo se presentan en las figuras 13 y 14 respectivamente.

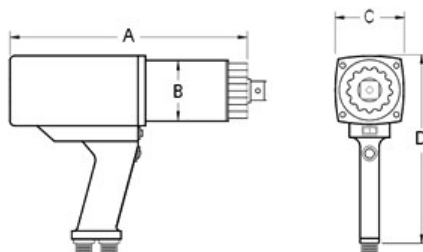


Figura 13: Plano de llave de torque controlado E-RAD 4000.

Fuente: <http://www.radsuramerica.com/>

Características/Modelo	S. Imperial E-RAD 3000	S. Métrico E-RAD 4000
Rango de torque	500-3000 lb.ft	675-4050 N.m
RPM	8,1*	8,1
Peso	23,5 lbs.	10,6 kg.
Exactitud	+/- 2,8%	+/- 2,8%
Repetitividad	+/- 2%	+/- 2%
Nivel de Ruído	75 db	75 db
Cuadrante	1"	1"
A	16,75"	393 mm
B	3,4"	86 mm
C	3,5"	88 mm
D	8,75"	254 mm

Figura 14: Características del modelo E-RAD 4000.

Fuente: <http://www.radsuramerica.com/>

Esta información es la base de los diseños de extensión y brazo de reacción, puesto que dichos elementos se conectan a la llave de torque controlado desde el cuadrante y el eje estriado respectivamente. (ver figura 13)

3.2. Sistema de acople

Para solucionar el problema de acople, se plantea la fabricación de un producto nuevo. En primer lugar se confecciona un prototipo que realice de manera satisfactoria una prueba de concepto, con el fin de que dicho prototipo cumpla con los requerimientos funcionales necesarios para solucionar el problema. Luego se re diseña este prototipo para que cumpla con los requerimientos de manufactura industrial y a través de un análisis de esfuerzos se define la forma, dimensiones y materiales necesarios para que este nuevo producto cumpla con su función.

3.2.1. Diseño de prototipo

El prototipo es diseñado siguiendo el PDP propuesto por Piñones [32], la materialización de los elementos que lo componen es a través de un proceso FDM utilizando las herramientas disponibles en el laboratorio de prototipado del departamento de diseño de productos de la Universidad Técnica Federico Santa María. A continuación se describe de manera más detallada el proceso de diseño del prototipo.

3.2.1.1. Requisitos de diseño Se requiere de una solución al problema de acople imperfecto entre dado y tuerca para que esta sea implementada en una herramienta automatizada de extracción/instalación de tuercas en neumáticos OTR. Dicha herramienta debe tener un sistema que permita el movimiento de la herramienta de electrotorque ERAD⁷, por lo tanto, para la prueba de concepto es necesario efectuar un arreglo que simule le movimiento del sistema y a su vez el sistema de acople debe estar unido a este, en este caso para simular el sistema de movimiento se utilizan rieles móviles conectados a motores paso a paso controlados por un arduino, tanto para el avance como de la herramienta, como para el movimiento rotacional necesario para entregar el torque. También se requiere de un dado de impacto adecuado para transmitir el torque a las distintas tuercas y por ende información sobre las dimensiones de las tuercas y el número de estas para los distintos neumáticos trabajados además es necesario un sistema que asegure el acople perfecto entre el dado de impacto y la tuerca.

Para reconocer los recursos que se disponen para realizar el proceso de diseño se realiza un análisis simplificado de la clasificación de recursos de TRIZ como se muestra en la tabla 2.

⁷Parte de la caja negra.

Tabla 2: Clasificación de recursos de TRIZ para la creación del prototipo de sistema de acople.

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación de recursos TRIZ	Recursos necesarios
Material	Impresora 3D, filamentos, software de modelación CAD, software de corte impresora 3D, arduino, motor , rieles.
Energía	Electricidad.
Información	Plano de rueda de camión KOMATSU 930e[24], Norma ISO 286, Normas ASME B107.2, B107.33M y B107.4M Manual de dados de impacto y accesorios STANLEY.
Tiempo	Periodo necesario para extraer/instalar tuercas de forma manual, duración del proceso de diseño.
Espacio	Laboratorio de prototipado IDP-UTFSM.

A continuación se realiza un benchmarking para patentes nacionales e internacionales que dan respuesta a la necesidad de extracción/instalación de tuercas:

- **CL 01222-2006:** Dispositivo manipulador de tuercas de neumáticos para grandes camiones que comprende una base motriz donde se apoyan un tambor rotatorio, que posee herramientas de torque conectadas a barras transmisoras de rotación y torque, en cuyos extremos se hayan dados con movimiento retráctil capaces de encajar las tuercas de los neumáticos.
- **CL 03869-2008:** Sistema de herramienta de torque automático para remoción de tuercas, adaptable a diversos sistemas de posicionamiento, capaz de expulsar automática y rápidamente a la tuerca extraída de modo que quedar inmediatamente disponible, que comprende un barrote transmisor, un dado de encaje formado por un cuerpo alargado, un medio de expulsión automático.
- **CL 03869-2008:** Sistema de herramienta de torque automático para remoción de tuercas, adaptable a diversos sistemas de posicionamiento, capaz de expulsar automática y rápidamente a la tuerca extraída de modo que quedar inmediatamente disponible, que comprende un barrote transmisor, un dado de encaje formado por un cuerpo alargado, un medio de expulsión automático.
- **CL 02812-2014:** Extractor hidráulico de tuercas para llantas utilizadas en equipos móviles de gran envergadura, comprende un dispositivo extractor montado sobre un mecanismo rotador y sobre un brazo articulado, comprende un brazo articulado y mecanismo rotador.
- **JP 2003181775:** “*attachment for fastening machine of clamp and fastening machine of clamp* ” Herramienta para extracción de tuercas que utiliza un mecanismo de pinza y resorte, como se muestra en la figura 15.

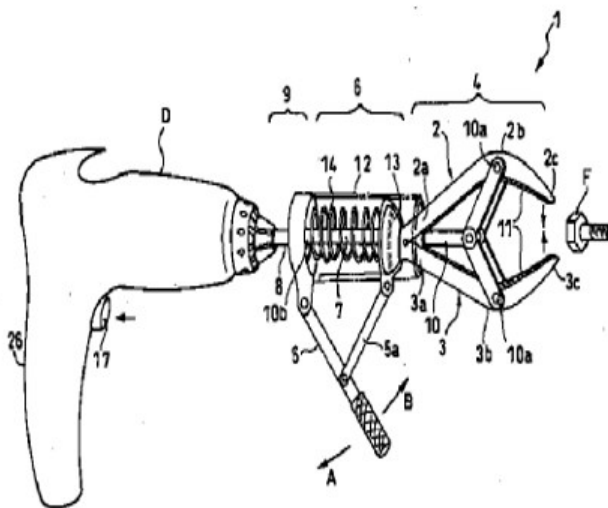


Figura 15: Plano de JP 2003181775.
Fuente: <https://patents.google.com>

- **WO/2003/031122:** “*fastener starter tool*” Herramienta para extracción de tuercas que utiliza un sistema de acople basado en el deslizamiento de una carcasa exterior sobre una carcasa interior (ver figura 16).

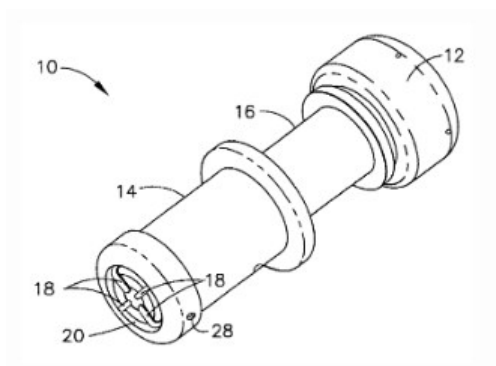


Figura 16: Plano de WO/2003/031122.
Fuente: <https://patentscope.wipo.int>

En general, a partir de los análisis de contexto, resalta la gran importancia converger a una solución que pueda ser utilizada para los distintos tipos de neumáticos tratados y que el sistema automatizado realice la tarea en un tiempo menor, al que se demora en realizar de forma manual.

En base a los análisis desarrollados hasta este punto se presentan los requerimientos principales para el desarrollo del sistema de acople.

Tabla 3: Requerimientos principales para el desarrollo del sistema de acople.
Fuente: Elaboración propia.

Requerimientos principales	Descripción
Extracción/instalación de tuercas	La herramienta debe ser capaz de extraer/instalar tuercas mediante un movimiento rotacional.
Conexión a herramienta	Dado que el sistema de acople será montado sobre un sistema móvil que manipula una herramienta que permite el movimiento rotacional, se debe considerar un sistema que los vincule.
Robustez	Como la herramienta debe ejercer torque sobre las tuercas para extraerlas o instalarlas, debe ser capaz de soportar dicha fuerza de torsión.
Acople perfecto	El sistema debe asegurar un acople perfecto entre dado y tuerca de manera tal que la herramienta cumpla con su función.

3.2.1.2. Diseño conceptual En base a los requerimientos recabados durante el punto anterior, a continuación se presentan los módulos funcionales para el sistema de acople.

Tabla 4: Definición de módulos funcionales para sistema de acople.
Fuente: Elaboración propia

Módulo	Descripción
Cabezal de torque	Debe ser capaz de ajustarse al tamaño de las fijaciones a instalar/extraer.
Transmisor de torque	Debe ser capaz de acoplarse a una herramienta que realice un movimiento rotacional y transferir su movimiento al cabezal de torque.
Acople perfecto	De ser capaz de asegurar un acople perfecto entre el cabezal de torque y tuerca independientemente de las dimensiones de estos.

Para simular el movimiento traslacional de la herramienta automatizada. Se plantea utilizar un arreglo de rieles móviles y motores controlados por un arduino.

El cabezal de torque, se diseña en base a el tamaño de la tuerca a instalar/extraer y a normas internacionales para el diseño de dados de impacto. Este cabezal se encuentra unido mediante un resorte a una base que se acopla al motor que realiza el movimiento rotacional, de tal forma

que el dado se deslice (limitado por una tapa) por la base en el eje axial, pero ambas partes tienen un movimiento rotacional dependiente de la otra. Además el dado de impacto tendrá un chaflán, que funcionará como guía para asegurar un acople perfecto.

Para presentar la perspectiva funcional del sistema se realiza el siguiente diagrama idef0 mostrado en la figura 17. Y en la figura 18 se presenta el diseño conceptual del sistema de acople.

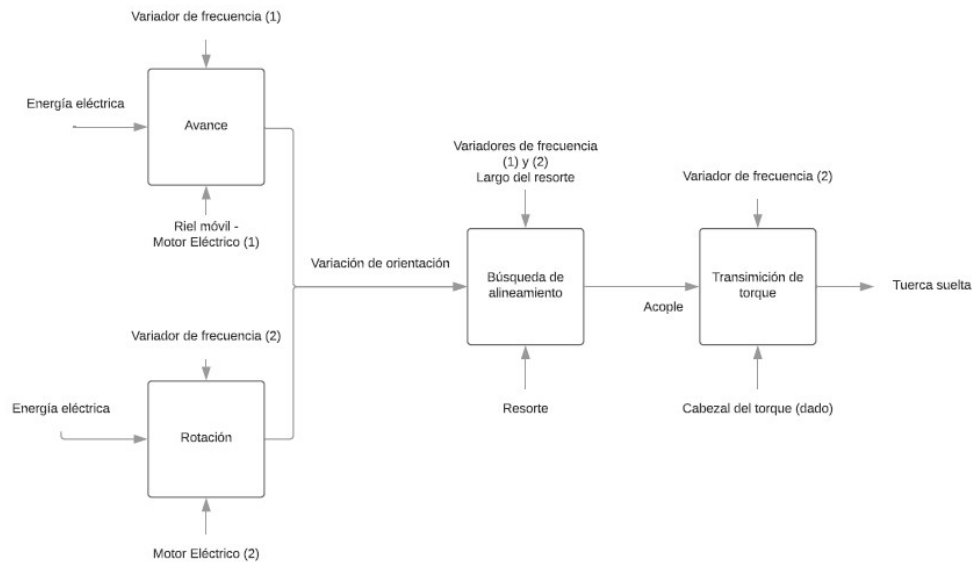


Figura 17: Diagrama IDEF0 del prototipo de sistema de acople.

Fuente: Elaboración propia.

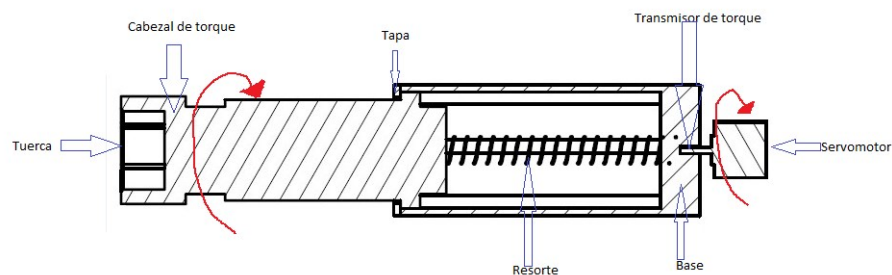


Figura 18: Diseño conceptual del sistema de acople.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.3. Materialización Las limitantes en cuanto a las dimensiones del diseño para la prueba de concepto son definidas por los recursos disponibles como se menciona en punto 3.2.1.

El cabezal de torque es diseñado en base a la norma ASME B107.33M [2] para las dimensiones de una tuerca comercial marca IMPORTER (ver figura 67 en la sección anexos). Además al dado de impacto se le efectúa un sacado de material en 45 grados de 3[mm] de largo para que este actúe como guía para corregir los acoples imperfectos. Tanto a el largo de la base, como el de el cabezal de torque, dependen del resorte a utilizar, en este caso para el diseño a utilizar en la prueba de concepto, se utiliza un resorte de 4 [cm] de largo en reposo y 1 [cm] de largo comprimido.

El ajuste y tolerancia existente entre la base y cabezal de torque viene dado por la norma ISO 286 [22], siendo un H8/f7 el recomendado para este tipo de aplicación. del manual del camión KOMATSU 930e [24] se desprende que el espacio máximo entre tuerca y tuerca es de 89 [mm] (ver figura 66 en la sección anexos). El volumen de las piezas a materializar es de un máximo de 120[mm]*120[mm]*115[mm] (largo*ancho*alto) [39].

A partir del diseño conceptual y las limitantes de diseño mencionadas previamente, se define la forma al crear un modelo tridimensional del sistema de acople por medio del Software Autodesk Inventor Professional 2019, con el objetivo de visualizar de una forma más cercana a la realidad, la forma en que los distintos elementos se vinculan, su disposición espacial y sus dimensiones generales.

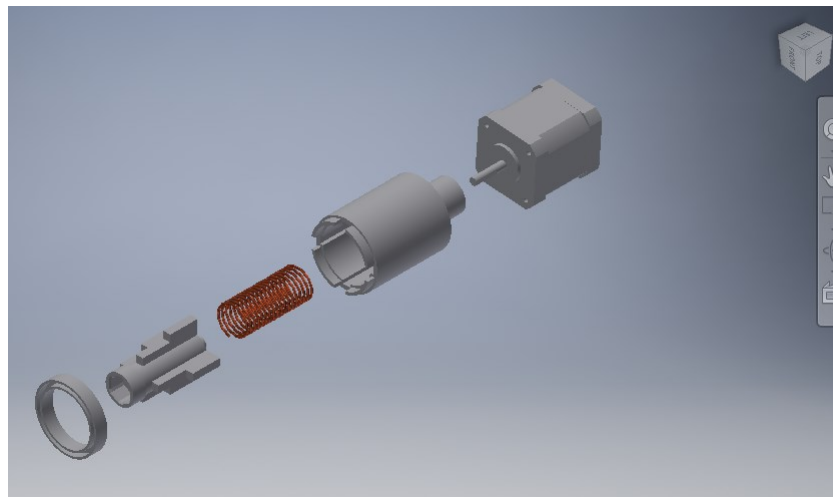


Figura 19: Modelo 3D explosionado del sistema de acople.
Se observa de izquierda a derecha, tapa, cabezal de torque, resorte, base y servomotor.
Fuente: Elaboración propia.

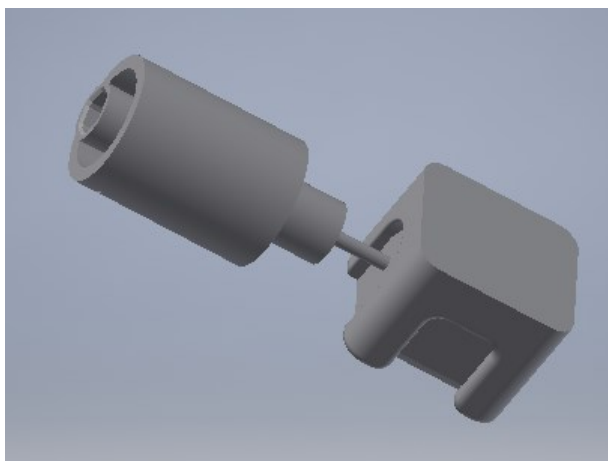


Figura 20: Modelo 3D del sistema de acople armado y conectado al motor paso a paso.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo anterior se desarrolla una lista de los componentes más importantes para el sistema de acople.

Tabla 5: Lista de componentes del prototipo.
Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad
Base	1
Cabezal de torque	1
Resorte	1
Tapa	1

Estos 4 componentes resultan ser estrictamente necesarios para poder formar el sistema de acople. La base al estar diseñada para acoplarse con la herramienta de movimiento rotacional cumple con la función de transmitir el torque que entrega misma al cabezal de torque al girar los 3 elementos en conjunto y ayuda a la búsqueda de un alineamiento perfecto al permitir el deslizamiento en el eje axial entre si misma y el cabezal de torque.

El cabezal de torque es el encargado de entregar el torque necesario a la tuerca para instalarla o extraerla, además de ayudar en la búsqueda del alineamiento gracias a el sacado en su dado, que sirve como guía para corregir el acople imperfecto.

El resorte ayuda en la búsqueda del alineamiento al comprimirse permitiendo que el dado del cabezal de torque se acomode cuando la herramienta se acerca a la tuerca y permite que el sistema de acople vuelva a su posición original al estirarse cuando la herramienta se aleja de la tuerca o cuando la extrae. La tapa evita que la base y cabezal de torque se separen por su movimiento en el eje axial provocado por el estiramiento del resorte.

3.2.1.4. Diseño de detalle En esta etapa se presenta el prototipo del sistema de acople, que es manufacturado en el laboratorio de prototipado del departamento de Ingeniería de diseño de productos de la Universidad Técnica Federico Santa María mediante un proceso FDM utilizando máquinas Ultimaker² GO y filamentos de PLA, a partir de los modelos CAD mostrados en el punto 3.2.1.3 diseñado en función de los recursos disponibles y todos los análisis previos referentes a los requisitos de diseño.



Figura 21: Cada uno de los componentes del prototipo para la prueba de concepto por separado.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 22: Prototipo de sistema de acople.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Prueba de concepto

Para realizar la prueba de concepto, es necesario tener un perno fijo, al cual se le pueda extraer o instalar tuercas, emulando a una rueda fija de un camión OTR listo para su mantención, también se debe de simular el movimiento de la herramienta completa en busca del acople entre el dado de impacto y la tuerca, además de utilizar una herramienta que permita un movimiento rotacional en el prototipo para de esta forma poder extraer o instalar tuercas.

Para simular el movimiento de la herramienta se utiliza un paquete de actuadores lineales C-Beam de la marca Openbuilds, este a través de un motor paso a paso permite el movimiento del prototipo en el eje axial. El movimiento rotacional y el torque necesario para extraer o instalar las tuercas lo entrega un motor híbrido paso a paso el cual se encuentra acoplado al prototipo y a su vez atornillado al paquete de actuadores (sobre una cama de caucho para evitar los efectos de la vibración del motor), ambos motores paso a paso son controlados por un controlador arduino, en un extremo del actuador se encuentra una tabla que tiene fijo un perno y una tuerca que puede ser extraída e instalada (esta tuerca se encuentra ligeramente desalineada con respecto al cabezal de torque), como se muestra en la figura 23.⁸

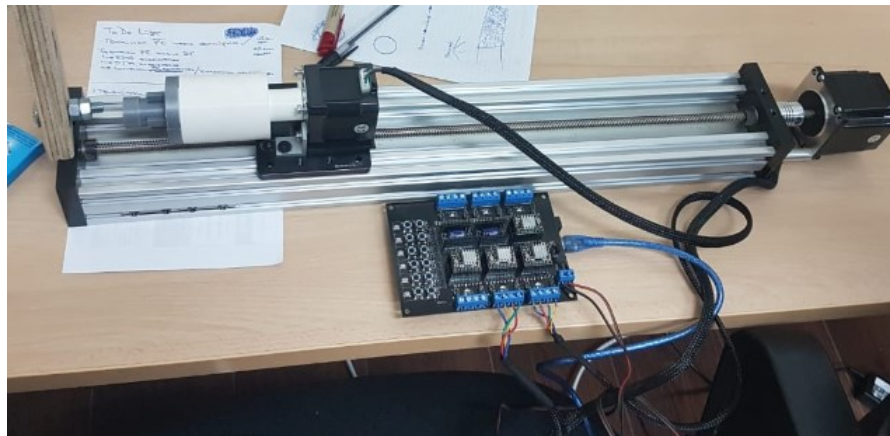


Figura 23: Arreglo implementado para efectuar la prueba de concepto.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez armado y configurado el arreglo, se procede a realizar una serie de pruebas simulando tanto la extracción como la instalación de la tuerca comercial con el prototipo de sistema de acople.

⁸Ver la sección Anexos para más detalles de los equipos utilizados en el arreglo

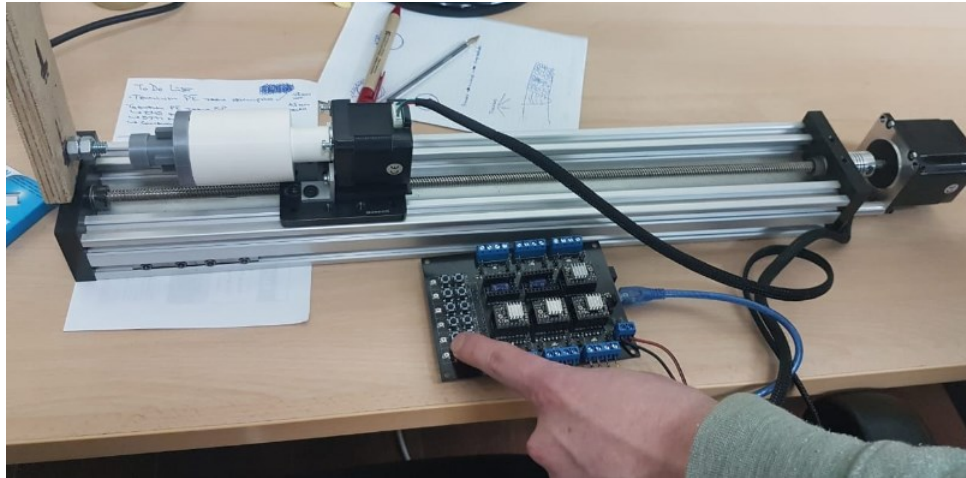


Figura 24: Prueba de concepto de prototipo.
Fuente: Elaboración propia.

Las principales conclusiones de esta prueba de concepto son:

- Para el proceso de instalación de tuercas resulta necesario implementar un sistema que asegure la correcta ubicación de la tuerca en el dado de impacto, de manera tal que la tuerca no se separe o caiga del dado de impacto producto del movimiento del sistema o por las vibraciones del mismo.
- Se nota una correlación entre el chaflán del dado de impacto y la capacidad de la herramienta para “evitar” acoples imperfectos a causa de vibraciones o fallas de alineamiento.

Estas conclusiones son aplicadas a partir de la siguiente iteración en el diseño, el diseño industrial (punto 3.2.3).

3.2.3. Diseño industrial

Para esta etapa, el diseño se realiza en base al prototipo desarrollado en el punto 3.2.1 y al plano de la rueda del camión Komatsu 930E que se muestra en la figura 66 de la sección Anexos, dicha rueda se selecciona por poseer una separación muy pequeña entre tuercas, lo que tiene una alta relevancia para el diseño de la parte exterior del brazo de extensión. Si bien se mantienen los 4 componentes principales del sistema de acople, cada uno de estos es modificado, con el fin de solucionar problemas detectados en la prueba de diseño y para poder facilitar el proceso de producción industrial, cuya cotización y condiciones de mecanizado fueron consultados con una maestranza ubicada en la localidad de La Calera.

Esta rueda utiliza tuercas hexagonales cuya distancia entre caras opuestas es de 55 [mm], por ende, el dado se diseña en base a las dimensiones recomendadas por la norma ASME B107.33M [2]. En el mismo se incluye un compartimiento cuadrado en el cual se inserta un imán de 20[mm]x 20[mm] x 10[mm] para de esta forma solucionar la problemática de ubicación de la tuerca mencionada en el punto anterior.

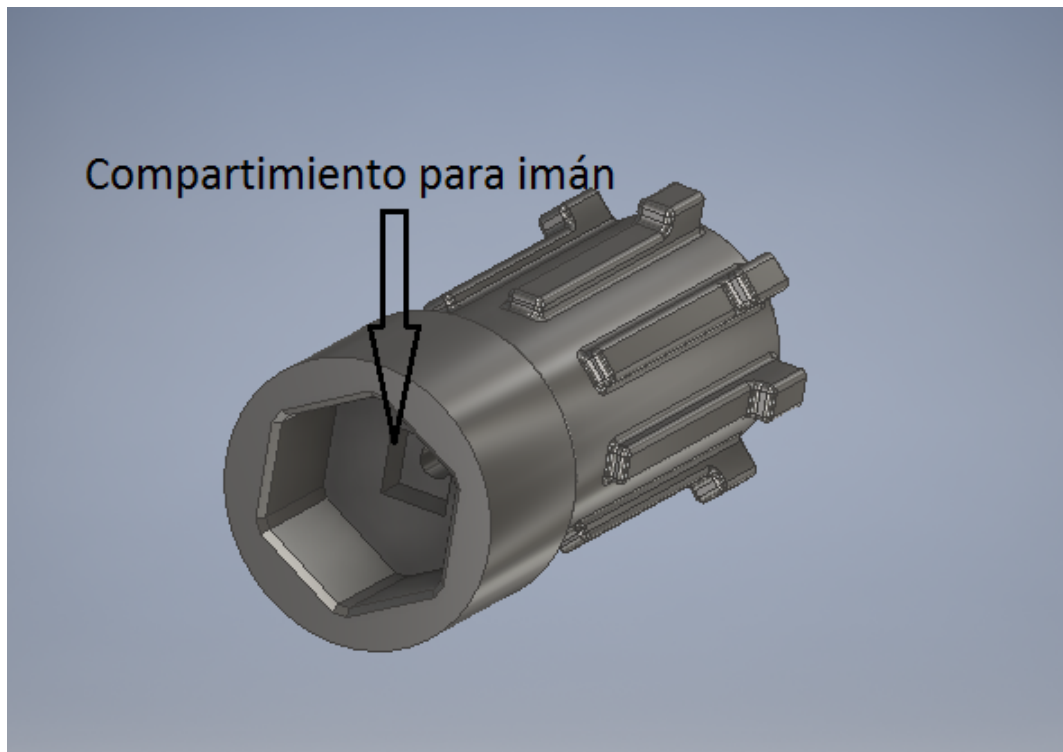


Figura 25: Dado de impacto, diseño industrial.
Fuente: Elaboración propia.

El dado de impacto no necesariamente será del mismo material que las tuercas a instalar/extraer, por esta razón, es recomendable aplicar un tratamiento de cementado en la pieza del dado de impacto del sistema de acople, con el fin de evitar el desgaste del mismo al estar en contacto con la tuerca a extraer/instalar.

El proceso de producción de los distintos componentes, es a través de un proceso de mecanizado por arranque de viruta, por esta razón se modifica la base del sistema de acople, en donde se incluye una pequeña sanja que permite el desprendimiento de la viruta en el proceso de producción de este componente. Además, se modifica la conexión al sistema de movimiento rotacional de esta, para que pueda ser acoplada a la extensión, tal como se muestra en la figura 26 .(ver punto 3.3).

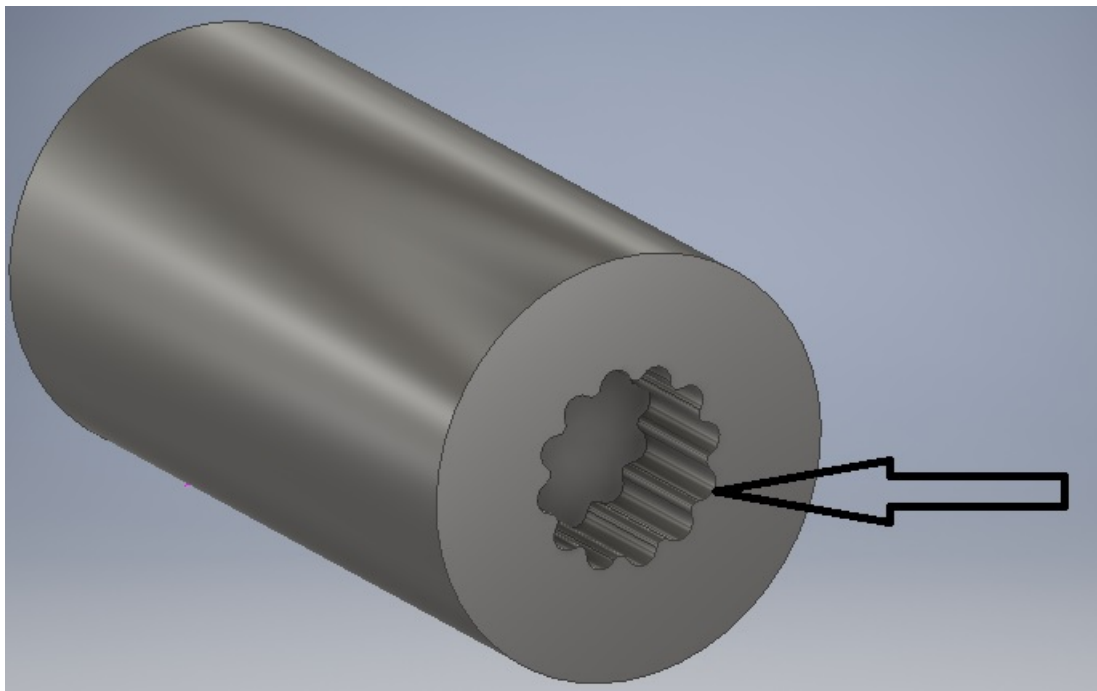


Figura 26: Base de dado de impacto, conexión a la extensión.

Fuente: Elaboración propia.

Para la sección destacada en la figura 26 es necesario un ajuste de fuerza H8/s8 [22], para el ajuste de piezas entre esta y la extensión, pueda soportar la fuerza de presión mecánica a la que será sometida.

En cuanto a la tapa, a diferencia del prototipo, en el que esta se encuentra sujeta a la base solo “a presión”, para este diseño se utilizan tornillos como forma de sujeción por ende esta cuenta con 4 orificios roscados para tornillos M4x0.7 - 6H. En la figura 27 se presenta el diseño industrial del sistema de acople.

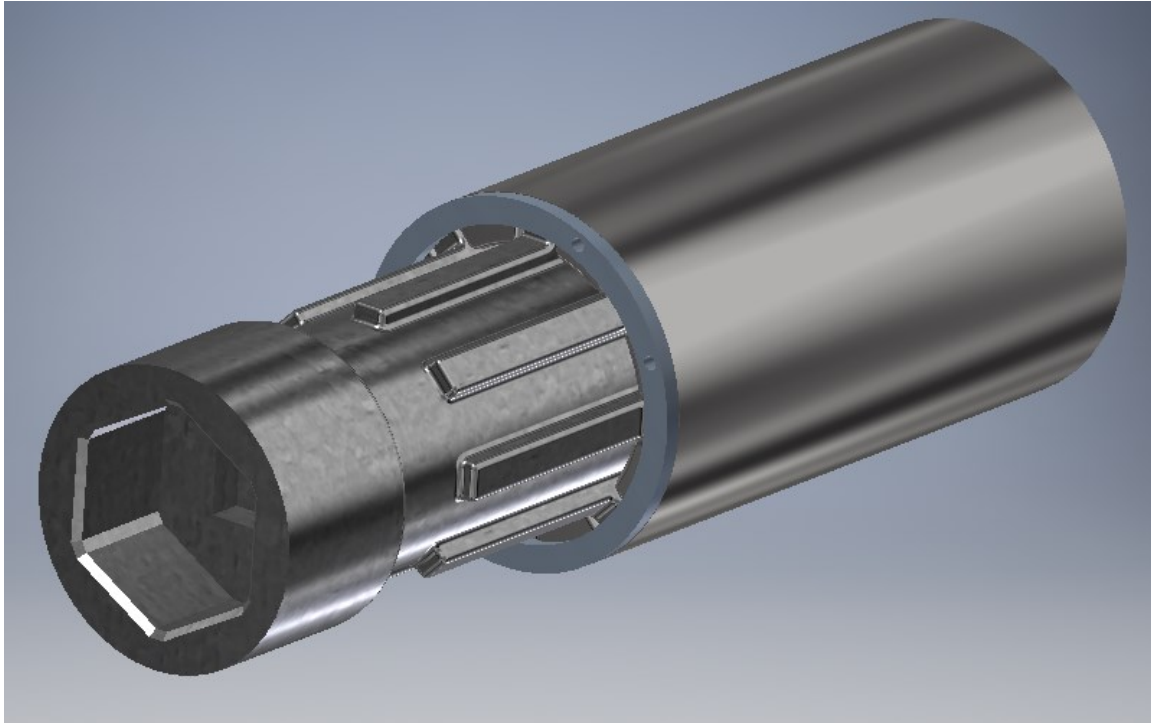


Figura 27: Sistema de acople, diseño industrial.
Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 28, 29 y 30 se presentan los planos de las piezas a diseñar para el sistema de acople, los cuales son la base, el dado de impacto y la tapa del sistema de acople respectivamente. Nótese que no se presentan las especificaciones del resorte a utilizar, ya que este es dimensionado en el punto 4.1.3 debido a que resulta necesario obtener previamente tanto el peso del sistema de acople como de la extensión para realizar un dimensionamiento correcto del resorte.

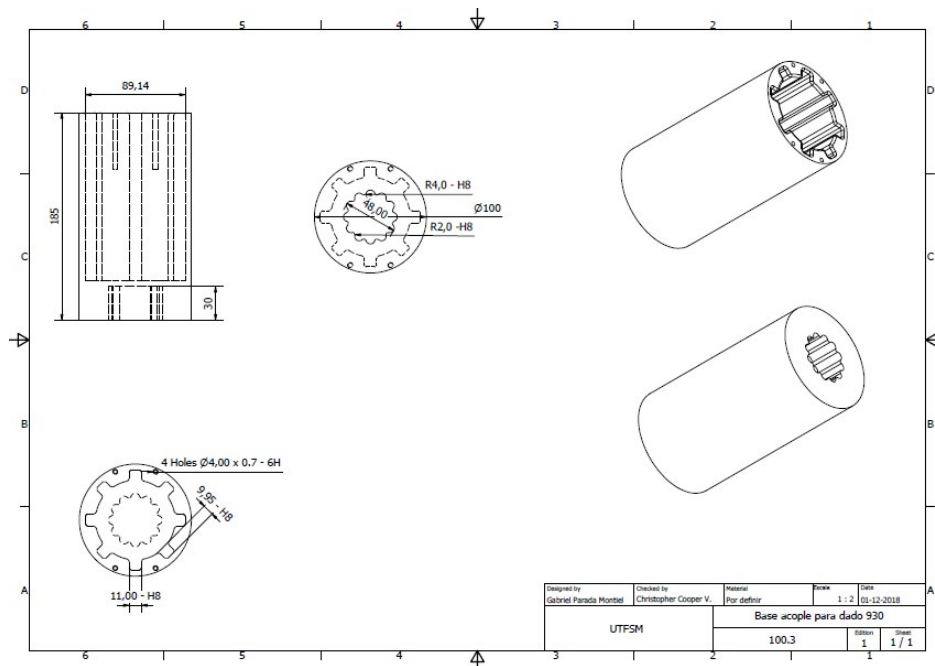


Figura 28: Plano de la base del sistema de acople, diseño industrial.
Fuente: Elaboración propia.

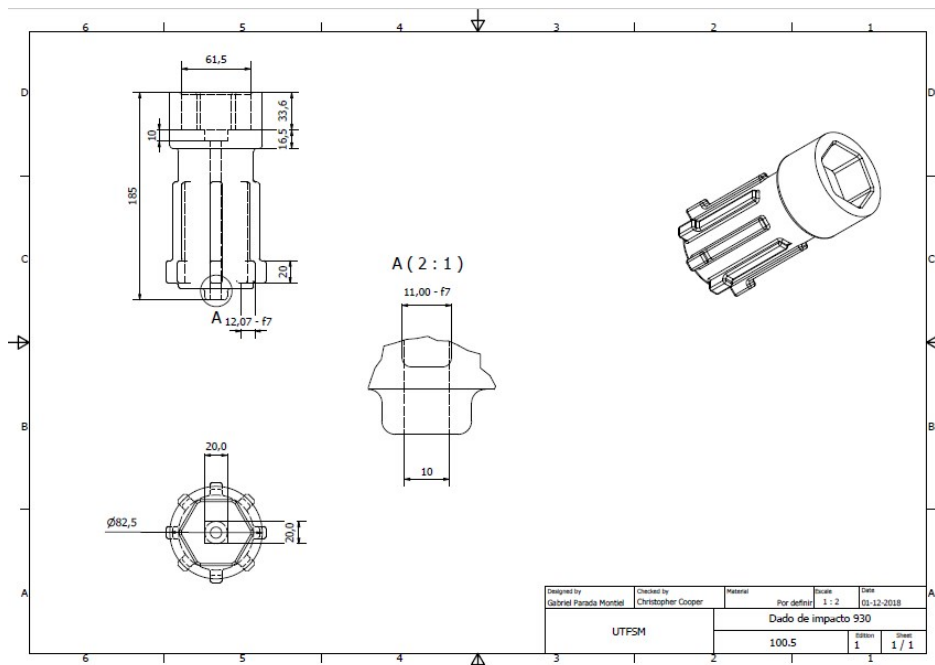


Figura 29: Plano del dado de impacto del sistema de acople, diseño industrial.
Fuente: Elaboración propia.

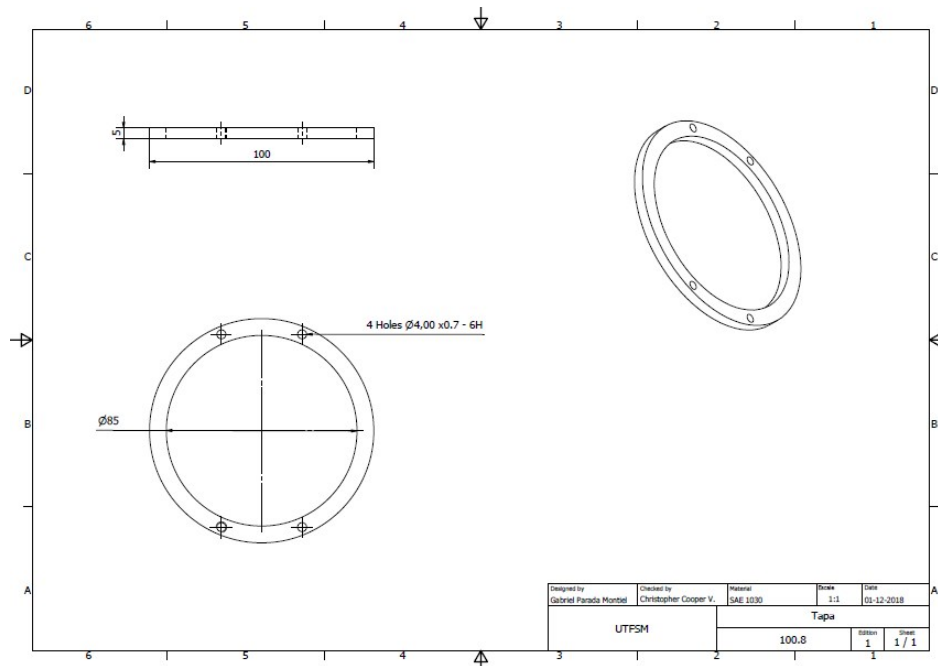


Figura 30: Plano de la tapa del sistema de acople, diseño industrial.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Extensión

El objetivo principal de la extensión es, permitir que la herramienta pueda acceder a todas las posiciones posibles de la rueda que tengan una tuerca como sistema de sujeción entre 2 piezas, de manera tal, que esta pueda ser desmontada completamente por la herramienta automatizada, sin la necesidad de intervención de un operario en la zona de trabajo de la herramienta ("zona de fuego"), para de esta forma poder proceder con el proceso de mantenimiento de dicha rueda de manera confiable y segura.

De lo que se desprende del mercado actual, dependiendo de la rueda a mantener y de las posiciones que se deben de alcanzar, se utilizan 1 o 2 extensiones de variadas longitudes. Como dato adicional se estima que para la herramienta de torque E-rad 4000 se tiene un peso aproximado de 24.7 [kg] por cada metro de extensión [33].

A modo de solución se plantea la construcción de una sola extensión, que consta de 2 partes, como se explica en los puntos 3.3.1 y 3.3.2, cuya longitud es igual a la máxima requerida actualmente de entre todas las ruedas investigadas en este trabajo de título, para de esta forma ahorrar en el número de conexiones utilizadas, además de permitir que la misma extensión pueda ser utilizada en todas las posiciones de todas las ruedas estudiadas en este trabajo.

3.3.1. Parte interior

Esta parte tiene como función principal conectar la herramienta de torque con el sistema de acople, permitiendo el giro de ambos, para que de esta forma la tuerca sea instalada o extraída. En la siguiente tabla se presentan los requerimientos principales con los que debe cumplir la parte interior de la extensión.⁹

Tabla 6: Requerimientos principales para la parte interior de la extensión.

Fuente: Elaboración propia.

Requerimientos principales	Descripción
Alcance	La extensión debe tener la longitud suficiente como para permitir que la herramienta pueda acceder a todas las posiciones de las distintas ruedas analizadas en este trabajo.
Conexión a sistema de acople	Dado que la función principal de la extensión es vincular al sistema de acople con el sistema de movimiento rotacional, esta debe estar unida al sistema de acople.
Conexión a sistema de movimiento rotacional	Dado que la función principal de la extensión es vincular al sistema de acople con el sistema de movimiento rotacional, esta debe estar unida al sistema de movimiento rotacional.
Robustez	Como la herramienta ejerce torque sobre tuercas para instalarlas o extraerlas, la extensión debe ser capaz de soportar dicha fuerza de torsión.

Dado el requerimiento de alcance mencionado en la tabla anterior se define la longitud de esta parte como:

$$L_{interno} = L_{exttotal} - L_{acopleestirado} \quad (8)$$

Donde:

- $L_{interno}$ es el la longitud total de la parte interna de la extensión.
- $L_{exttotal}$ es la longitud máxima que requiere la extensión para poder alcanzar la tuerca más lejana de las ruedas estudiadas en este trabajo de título.
- $L_{acopleestirado}$ la longitud del sistema de acople cuando el resorte se encuentra en reposo.

Al reemplazar se obtiene: $L_{interno} = 1372[mm] - 305[mm] = 1067[mm]$

⁹El requerimiento de robustez depende del material de construcción del elemento y es analizado en el Capítulo 4.

La forma de esta pieza consiste básicamente en un cilindro con conexión tanto a la herramienta de torque como al sistema de acople.

La conexión con el sistema de movimiento rotacional es en la herramienta de torque, esta se realiza entre el dado de mando de la misma y un extremo de la extensión. La conexión con el sistema de acople es entre la base del sistema de acople y el otro extremo de la extensión, donde se utiliza una conexión del tipo eje estriado diseñada para un ajuste de fuerza H8/s8, como se muestra en las figuras 26 y 32.

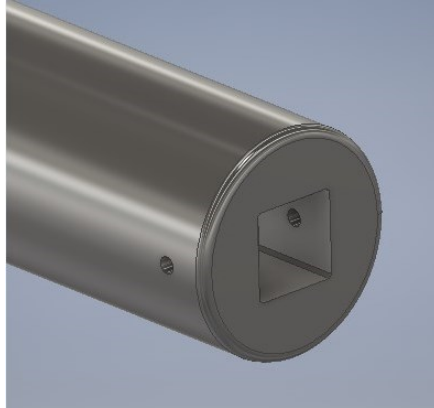


Figura 31: Parte interna de la extensión, conexión a sistema de movimiento rotacional.
Fuente: Elaboración propia.

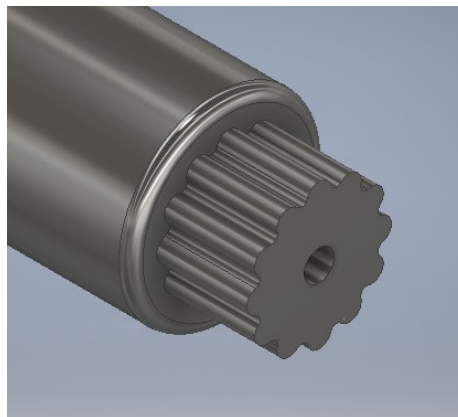


Figura 32: Parte interna de la extensión, conexión a sistema de acople.
Fuente: Elaboración propia.

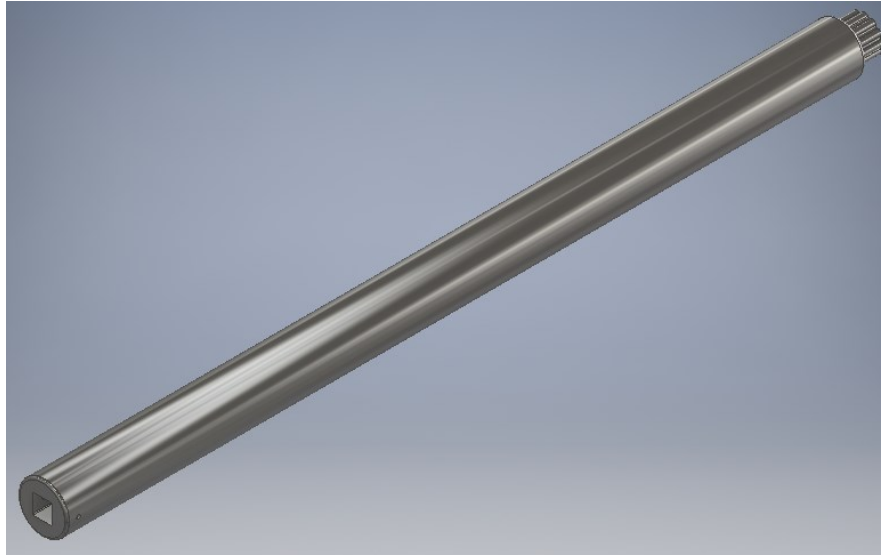


Figura 33: Parte interna de la extensión, diseño CAD.
Fuente: Elaboración propia.

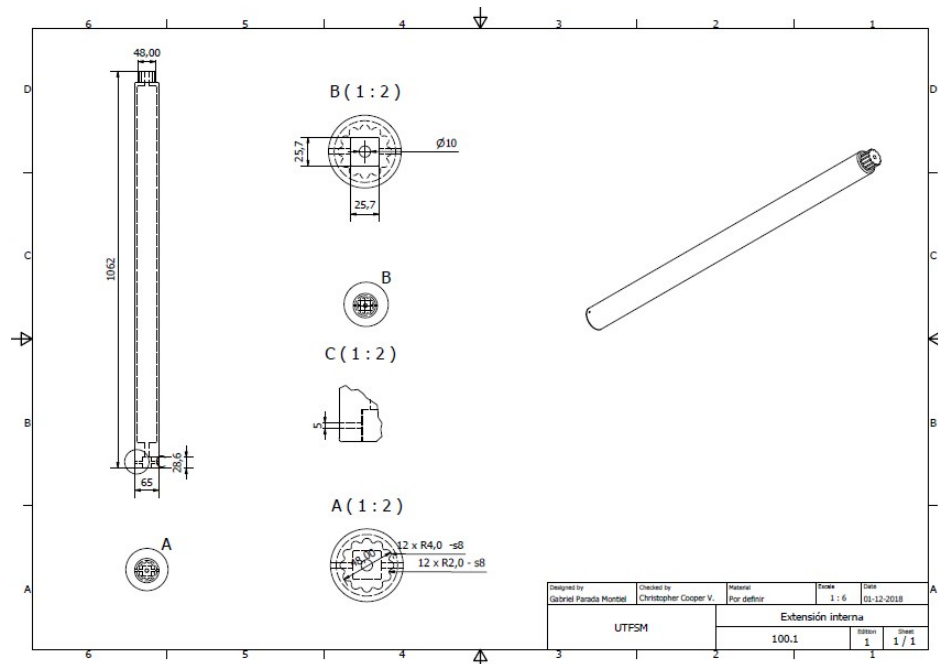


Figura 34: Plano de parte interna de la extensión.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Brazo de reacción

La función principal del brazo de reacción, tal como se puede discernir de su nombre, es entregar un punto de reacción para el torque entregado al instalar o extraer tuercas. Situándose en la posición de una tuerca adyacente a la tuerca instalada o extraída.

De manera adicional, se contempla el diseño de un sistema que permita variar la posición del cilindro que se situará en una tuerca adyacente para hacer el punto de reacción. De manera tal, que con un solo cilindro y una sola extensión, sea posible hacer el punto de reacción para tuercas de igual tamaño. A pesar de que la posición o distancia entre tuerca a tratar y adyacente varía.

El diseño de este brazo se hace en base al plano de la rueda del camión Komatsu 930E. Puesto que, esta rueda posee una característica especial, dado que la separación entre las tuercas adyacentes es muy pequeña, por lo que se hace imposible, colocar un cilindro dimensionado para resistir dicha fuerza de reacción, según la norma correspondiente [2], al lado del brazo de reacción (ver figura 68 del apartado anexos).

Razón por la cual, se debe posicionar el brazo de reacción a 2 tuercas de distancia de la tuerca a instalar o extraer. De esta forma se obtiene la mayor distancia posible entre dichos elementos, de todas las ruedas analizadas en este trabajo. Lo que tiene como consecuencia el mayor momento flector aplicado a la extensión de todas las ruedas a tratar.

En la siguiente tabla se presentan los requerimientos principales con los que debe cumplir el brazo de reacción de la extensión.¹⁰

¹⁰El requerimiento de robustez depende del material de construcción del elemento y es analizado en el Capítulo 4.

Tabla 7: Requerimientos principales para el brazo de reacción de la extensión.

Fuente: Elaboración propia.

Requerimientos principales	Descripción
Alcance	La extensión debe tener la longitud suficiente como para permitir que la herramienta pueda acceder a todas las posiciones de las distintas ruedas analizadas en este trabajo.
Conexión a tuerca adyacente	Dado que la función principal de la extensión es hacer un punto de reacción con una tuerca adyacente a la que se esta instalando o extrayendo, debe de existir una forma de acople a dicha tuerca adyacente.
Conexión a sistema de movimiento rotacional	El brazo de reacción debe estar conectado a la extensión, en este caso se utiliza una conexión con el sistema de movimiento rotacional.
Sistema para variar posición del punto de reacción	Para que el brazo de reacción sea capaz de en distintas ruedas se debe de incluir un sistema que permita variar la posición del punto de reacción y cambiar el cilindro de reacción según la tuerca a tratar.
Robustez	Como la herramienta ejerce torque sobre tuercas para instalarlas o extraerlas, la extensión debe ser capaz de soportar dicha fuerza de torsión.

En cuanto a la forma de esta pieza, se trata de un cilindro con conexión al sistema de movimiento rotacional el cual se encuentra unido a otro cilindro mediante un sistema de rejilla que permite variar la posición del cilindro que permite la conexión a una tuerca para hacer el punto de reacción, manteniendo fijo este ultimo gracias a la acción de una tuerca y un cuadrante con dos golillas como se ve en la siguiente figura:

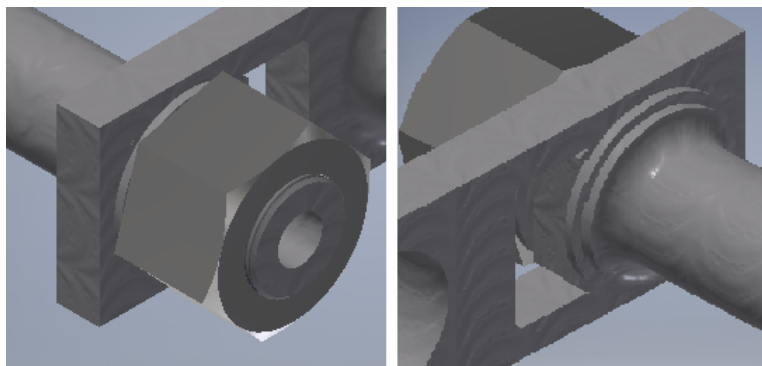


Figura 35: Sistema de rejilla, modelo CAD dos vistas.

Fuente: Elaboración propia.

Para la conexión con la herramienta de movimiento rotacional se utiliza un ajuste de fuerza H8/s8 del tipo eje estriado, tal como se puede observar en la figura 36, para esta parte del diseño, es fundamental el detalle de las dimensiones de la herramienta de torque a utilizar, ERAD 4000 [20].

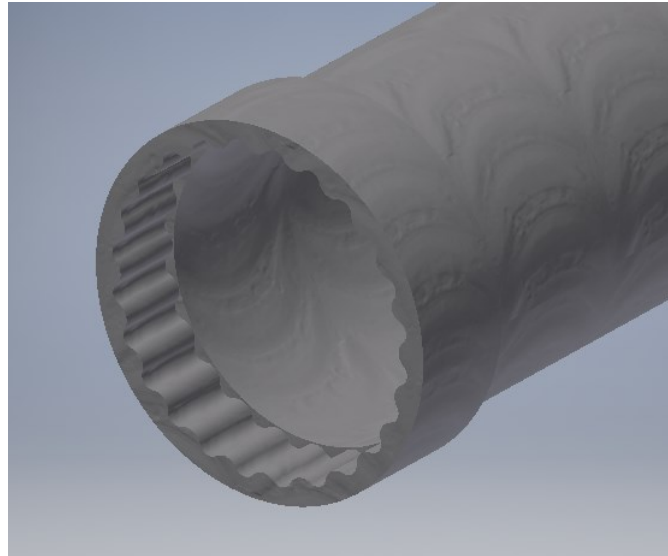


Figura 36: Detalle de la conexión del brazo de reacción con la herramienta de torque.

Fuente: Elaboración propia.

Para la conexión con la tuerca adyacente, se utiliza un cilindro cuyo diámetro interior es igual a la longitud mayor de la cabeza de la tuerca a instalar o extraer (distancia entre vértices opuestos), tal como se destaca en azul en la figura 37, este punto de reacción se encuentra conectado al sistema de rejillas gracias a la acción de un cuadro roscado que esta fijo por acción de una tuerca y 2 golillas. (más detalles en la sección anexos)

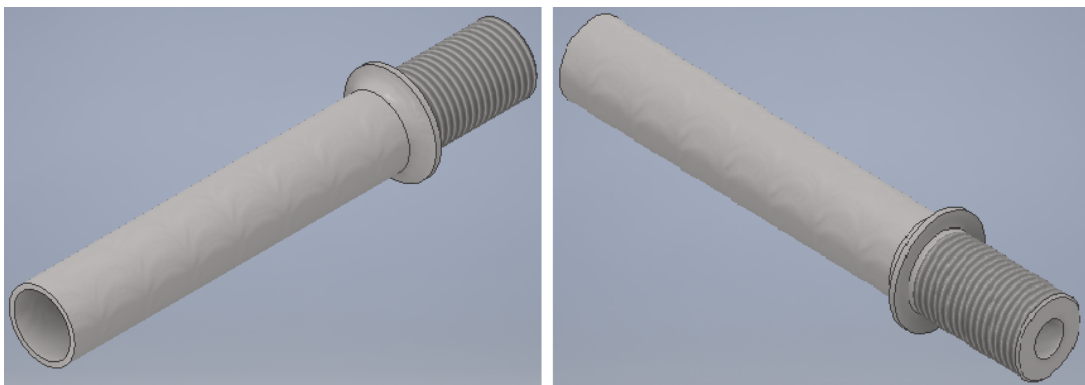


Figura 37: Detalle del cilindro que hace el punto de reacción 2 vistas.

Fuente: Elaboración propia.

La longitud total del brazo de reacción desde la conexión con la tuerca adyacente hasta la conexión con el sistema de movimiento rotacional es igual a la longitud máxima que requiere la extensión para poder alcanzar la tuerca más lejana de las ruedas analizadas en este trabajo de título más $30[mm]$ los que corresponden al espacio necesario para realizar su conexión con la herramienta E-RAD 4000, vale decir: $(1372 + 30)[mm] = 1402[mm]$.

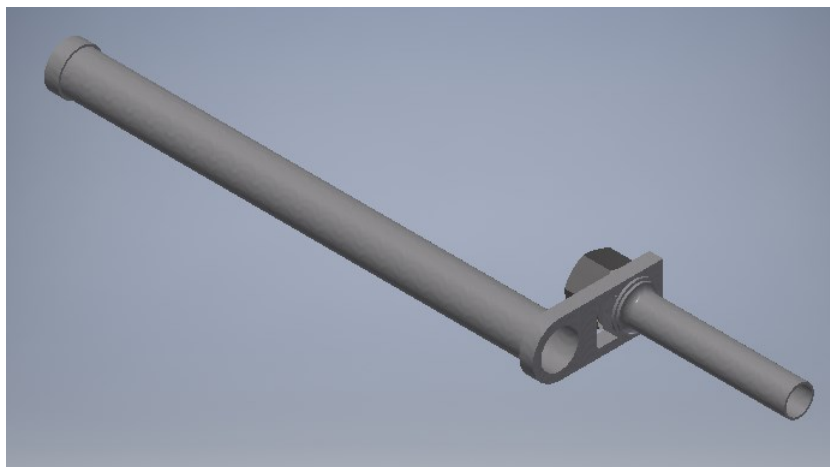


Figura 38: Brazo de reacción de la extensión, diseño CAD.
Fuente: Elaboración propia.

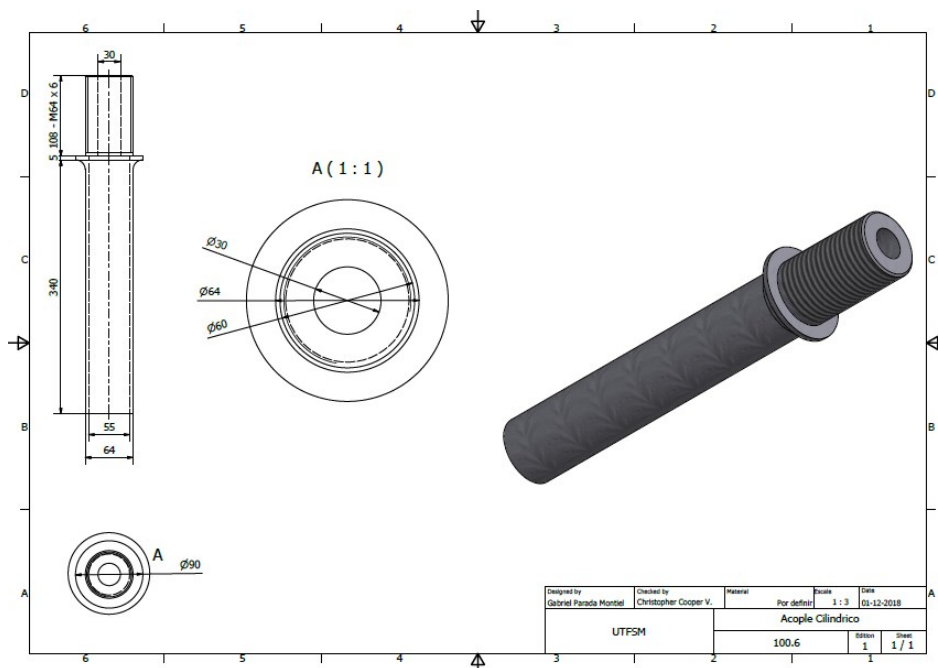


Figura 39: Plano del acople cilíndrico del brazo de reacción de la extensión.
Fuente: Elaboración propia.

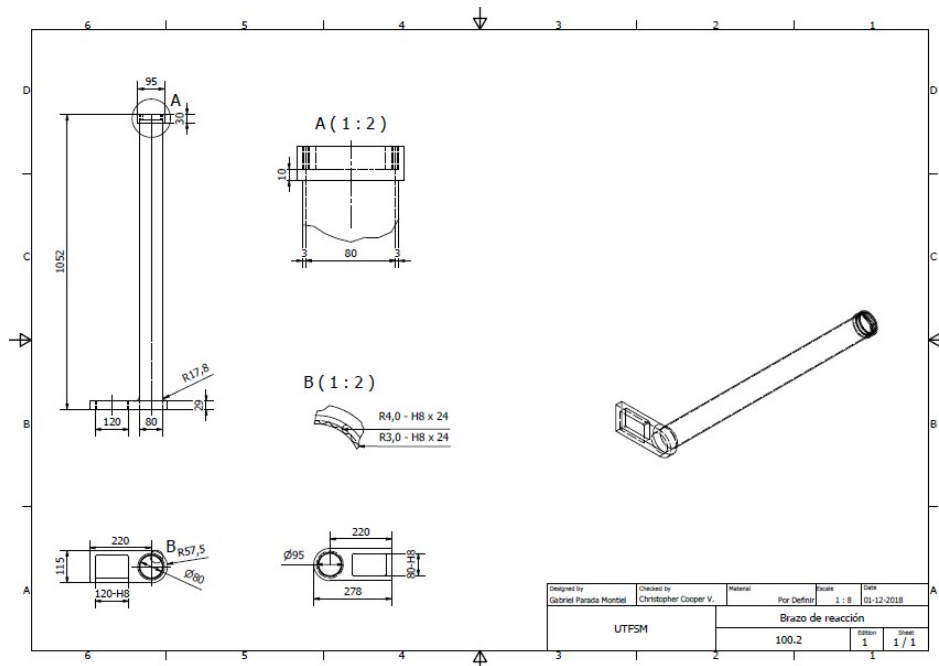


Figura 40: Plano del brazo de reacción.
Fuente: Elaboración propia.

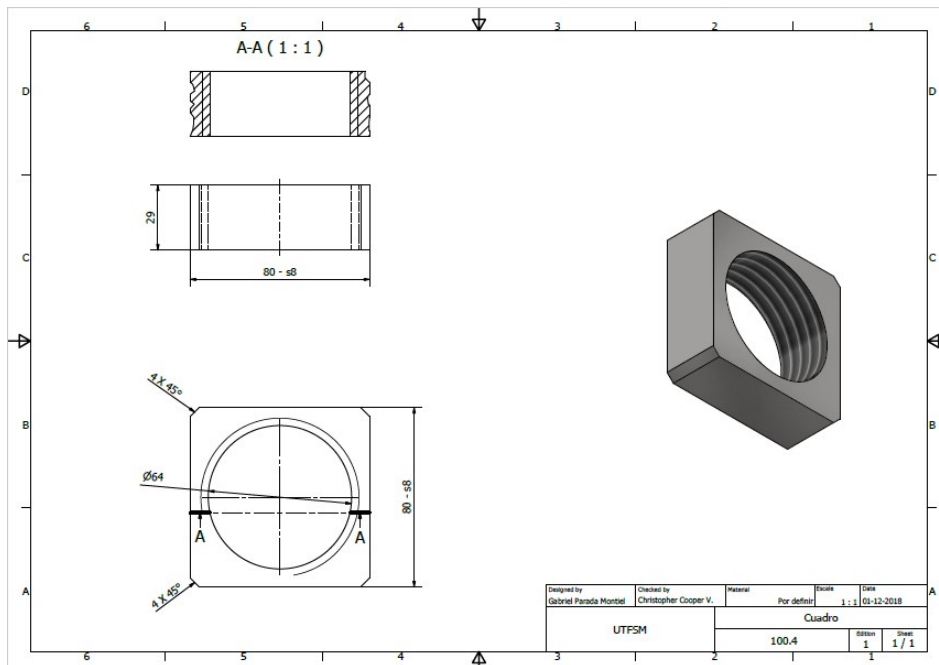


Figura 41: Plano del cuadro del brazo de reacción de la extensión.
Fuente: Elaboración propia.

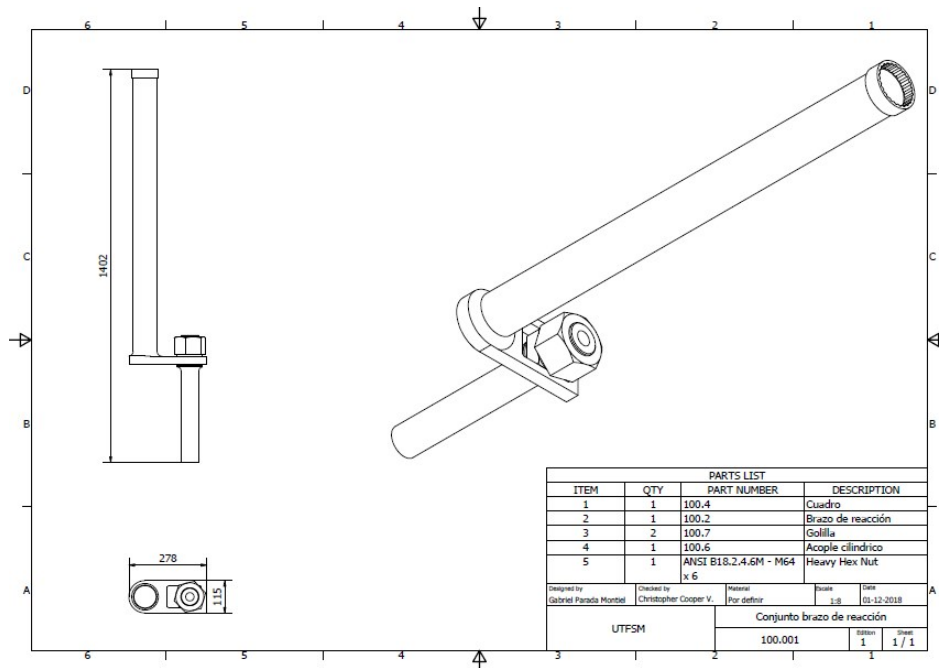


Figura 42: Plano del conjunto de brazo de reacción de la extensión.
 Fuente: Elaboración propia.

3.4. Conjunto de sistema de acople y extensión

El sistema de acople en conjunto con la extensión cumplen con todos los requerimientos necesarios para dar solución a los problemas planteados en el punto 1.2, pero para ello deben funcionar como conjunto, en la figura 43 se presenta una vista en corte del conjunto, la que facilita la descripción de todos los elementos presentes en esta parte de la herramienta y su interrelación.

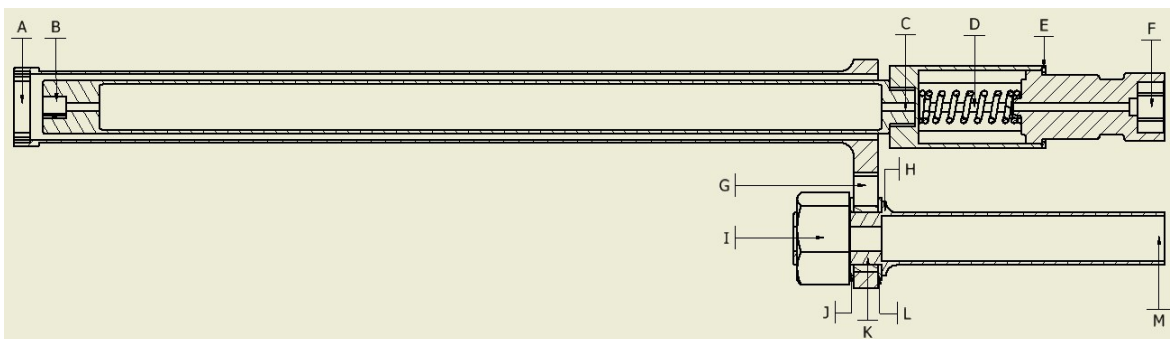


Figura 43: Vista en corte de conjunto de sistema de acople y extensión.
 Fuente: Elaboración propia.

A continuación se describen los elementos destacados en la figura 43.

- A: Este elemento destaca la conexión entre el brazo de reacción y la herramienta de movimiento rotacional, esta se hace con un ajuste de fuerza H8/s8.
- B: Hace referencia a la conexión entre la parte interna de la extensión y la herramienta de movimiento rotacional (ERAD 4000), precisamente entre el dado de mando de esta última y un extremo de la extensión que tiene la forma de un cuadro hembra adaptado en base a la norma ASME B107.4M, permitiendo de esta forma que el dado de impacto ubicado en el sistema de acople pueda entregar el torque necesario para instalar o extraer las tuercas de las ruedas.
- C: En esta zona se destaca la conexión entre el sistema de acople y la parte interna de la extensión, esta se realiza con un ajuste de fuerza H8/s8. De esta forma es posible que la herramienta automatizada se acople correctamente a cualquier tuerca a tratar mientras el dado sea el adecuado para la tuerca y estos 2 elementos puedan estar relativamente concéntricos.
- D: Aquí se muestra el resorte, el cual es parte de la conexión entre el cabezal de torque y la base del sistema de acople, ayuda a la búsqueda del acople perfecto comprimiéndose cuando el cabezal de torque no se encuentra perfectamente alineado con la tuerca, evitando que este se atasque, y también posiciona al cabezal de torque en su posición ideal una vez se alcanza el alineamiento perfecto entre este y la tuerca que se va a instalar o extraer.
- E: Corresponde a la tapa del sistema de acople, esta cumple con la función de evitar que el cabezal de torque salga expulsado de la herramienta una vez se logra el acople perfecto por efecto del resorte.
- F: Hace referencia al cabezal de torque del sistema de acople, el cual permite la instalación o extracción de las tuercas a través de un movimiento rotacional.
- G: Indica la zona que representa al riel, por el cual se puede mover el cuadro roscado, permitiendo de esta forma variar la posición del punto de reacción, dependiendo de la posición de las tuercas de las ruedas a tratar.
- H: Destaca la zona que representa al anillo en zona exterior del cilindro utilizado como punto de reacción, el objetivo de este anillo es mantener fijo al cuadro roscado en la posición que se requiera, en caso de eventuales cargas en el eje axial.
- I: Corresponde a una tuerca (M64 x 6 para este caso en particular) la que mantiene fijo al cuadro roscado en la posición que se requiera. Se mantiene conectada con el cilindro que hace de punto de reacción, ya que es la versión hembra del mismo hilo roscado de este cilindro.
- J: Representa a una golilla se encuentra entre medio de la tuerca y el cuadro roscado para prevenir efectos adversos asociados a la carga de apriete existente entre estos elementos.

- K: Hace referencia al cuadro roscado, el cual permite variar la posición del cilindro que hace de punto de reacción, manteniendo a este punto fijo en la posición deseada gracias al efecto de la rosca del mismo cilindro y las roscas hembras de la tuerca y el mismo cuadro.
- L: Representa a una golilla se encuentra entre medio del anillo y el cuadro roscado para prevenir efectos adversos asociados a la carga de apriete existente entre estos elementos.
- M: Esta parte va conectada a una tuerca adyacente a la que se está instalando o extra-
yendo, este es el punto de reacción para el torque entregado en la tuerca a instalar o extraer.

En la figura 44 se presenta el diseño CAD del ensamble del sistema de acople y extensión de la herramienta.

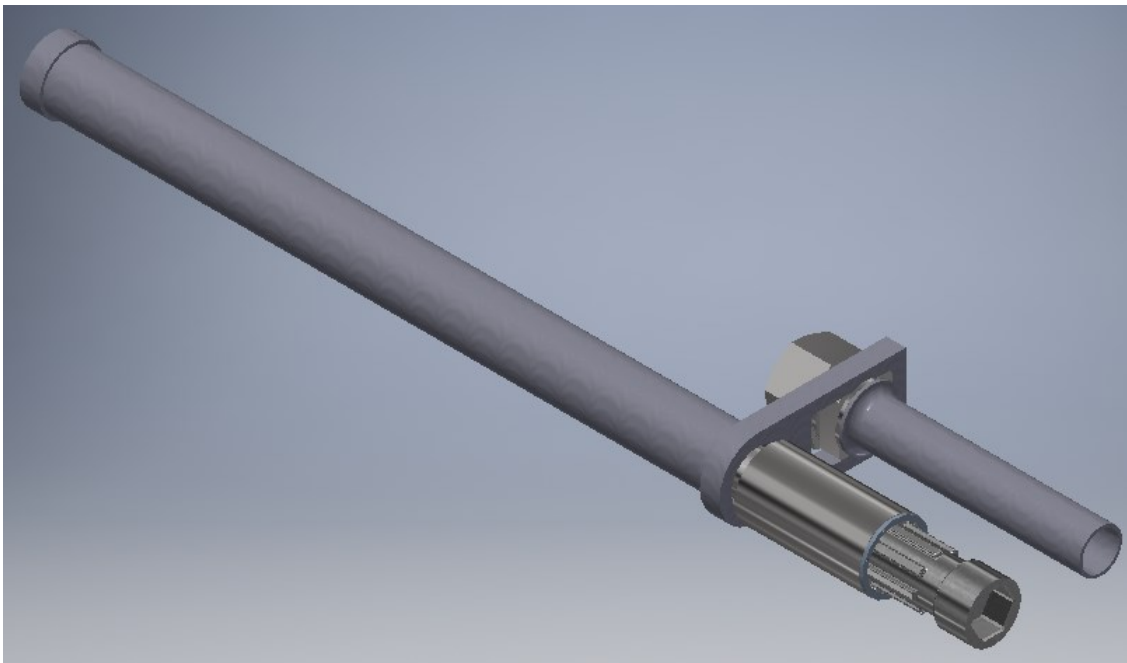


Figura 44: Conjunto de sistema de acople, extensión y brazo de reacción, diseño CAD.
Fuente: Elaboración propia.

Los diseños de extensión y brazo de reacción son de una longitud total de 1.4 [m] aproximadamente, lo que equivale a un peso aproximado de 35 [kg] usando solo las extensiones comerciales de RAD para el modelo E-RAD 4000. A eso se le puede sumar 3 [kg] extra como peso de un brazo de reacción estándar. Se hace referencia al peso debido a que el sistema de movimiento de la herramienta automatizada, parte de la llamada “caja negra”, siempre tiene un límite de peso para cargar, al igual que los operarios (ley 20.949).

Por ende se asumirá que a mientras menor sea el peso de los elementos, mejor será el diseño. En este punto resulta de crucial importancia el tipo de material a utilizar para cada uno de los componentes propuestos en este capítulo, los cuales se definen en el capítulo 4.

En la figura 45 se presenta el plano del conjunto de sistema de acople, extensión y brazo de reacción.

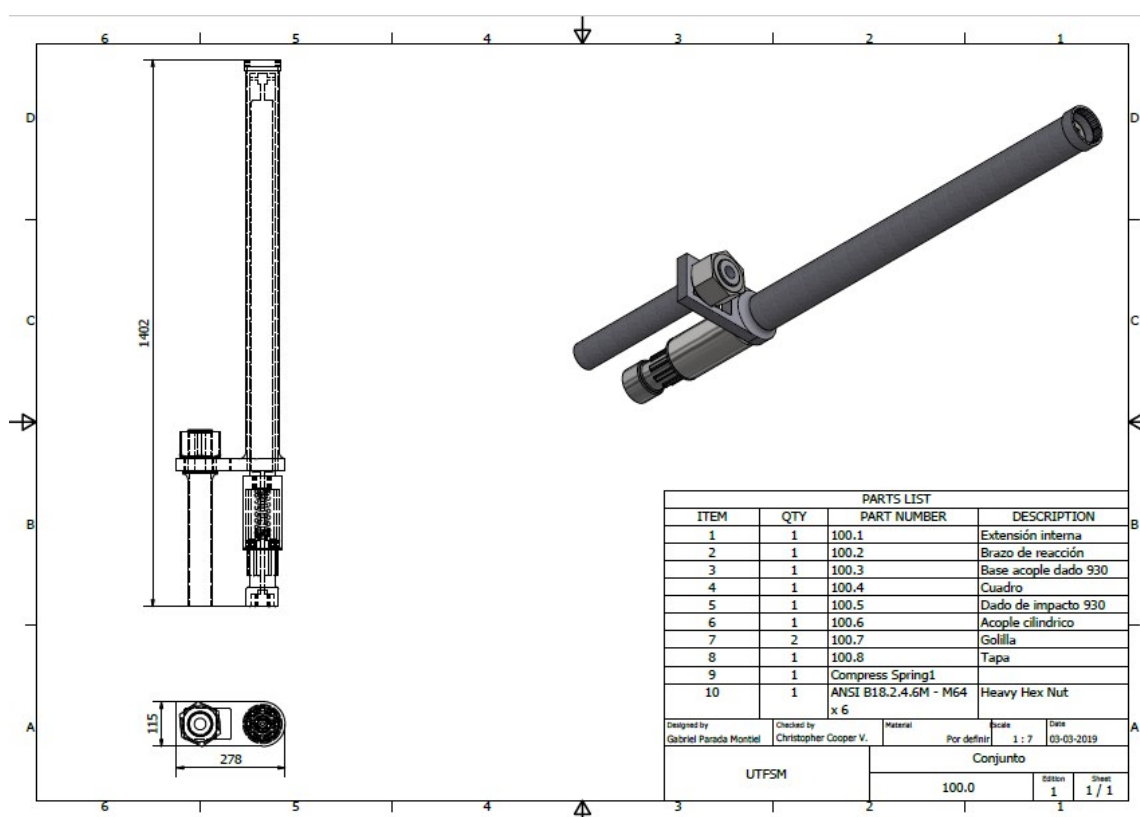


Figura 45: Plano de conjunto de sistema de acople, extensión y brazo de reacción, diseño CAD.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

4.1. Análisis de esfuerzos mediante software de elementos finitos

Para entregar una alternativa de solución válida se debe cumplir con todos los requerimientos principales de diseño. Pero, hasta el momento, se ha logrado el cumplimiento de todos los requisitos principales de diseño, a excepción del de robustez tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 8: Estado de requerimientos principales.
Fuente: Elaboración Propia.

Requerimiento principal	Estado
Extracción / Instalación de tuercas	Cumplido
Conexión Sistema de acople con la herramienta de torque	Cumplido
Acople Perfecto	Cumplido
Conexión de Brazo de reacción con herramienta de torque	Cumplido
Alcance	Cumplido
Conexión de Brazo de reacción con tuerca adyacente	Cumplido
Sistema para variar punto de reacción	Cumplido
Robustez	Por definir

Con el objetivo de definir los materiales adecuados que cumplan con el requisito de robustez para cada elemento, tanto del sistema de acople como de la extensión, y de esta forma además definir gran parte del peso del conjunto, se realiza el análisis de esfuerzos utilizando el módulo estructural del software ANSYS 19.1, aplicando las condiciones de diseño menos favorables posibles¹¹. En este caso son:

- Distribución de tuercas de la rueda del camión Komatsu 930E.
- El largo máximo de extensión necesaria $1372[mm]$.
- El torque máximo necesario para instalar las tuercas $3451[Nm]$.

¹¹En base al estudio de las ruedas de las cuales se obtuvo información en el desarrollo de este trabajo.

Además se asume 0.2 como el valor para el coeficiente de fricción entre aceros.

En cuanto a la solución numérica, a continuación se presentan las ecuaciones que gobiernan este tipo de problemas:

Ecuación de movimiento (una expresión de la segunda ley de newton):

$$\nabla \cdot \sigma + F = \rho \ddot{u} \quad (9)$$

Ecuaciones de deformación-desplazamiento:

$$\epsilon = \frac{1}{2}[\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (10)$$

ley de hooke:

$$\sigma = C : \epsilon \quad (11)$$

A continuación se presentan las ecuaciones de equilibrio:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (14)$$

El programa trabaja las relaciones esfuerzo-deformación en forma de 6 ecuaciones explícitas:

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} (1 - (\nu_{yz})^2 \frac{E_y}{E_z}) (\epsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_x}{h} (\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_y}{E_z}) (\epsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_x}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\epsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (15)$$

$$\sigma_y = \frac{E_x}{h} (\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_y}{E_z}) (\epsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} (1 - (\nu_{xz})^2 \frac{E_x}{E_z}) (\epsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_y}{h} (\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_x}{E_y}) (\epsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (16)$$

$$\sigma_z = \frac{E_x}{h}(\nu_{xz} + \nu_{yz}\nu_{xy})(\epsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h}(\nu_{yz} + \nu_{xz}\nu_{xy}\frac{E_x}{E_y})(\epsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h}(1 - (\nu_{xy})^2\frac{E_x}{E_y})(\epsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (17)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy}\epsilon_{xy} \quad (18)$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz}\epsilon_{yz} \quad (19)$$

$$\sigma_{xz} = G_{xz}\epsilon_{xz} \quad (20)$$

donde: $h = 1 - (\nu_{xy})^2\frac{E_x}{E_y} - (\nu_{yz})^2\frac{E_y}{E_z} - (\nu_{xz})^2\frac{E_x}{E_z} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{xz}\frac{E_x}{E_z}$

Finalmente se incluye la simplificaciones para F constante:

$$\nabla^4 u = 0 ; \nabla^4 \tau_{ij} = 0 ; \nabla^4 \epsilon_{ij} = 0 \quad (21)$$

4.1.1. Sistema de acople

La malla a utilizar para estas partes es diseñada en base a todas las recomendaciones mencionadas en el punto 2.4.2, destacándose el uso de elementos del tipo cuadrático debido a las características físicas del problema [5], en cuanto a la forma de los elementos, para este caso se prefieren los del tipo tetraédricos por su bajo consumo de recursos computacionales (en comparación al modelo hexaédrico)[41] y buena adaptación a las geometrías de las piezas.

En las figuras 46 47 48 49 se muestra las malla de 3903605 nodos y resultados de esfuerzo equivalente de Von Mises destacando algunos detalles importantes tales como, las zonas de concentraciones de esfuerzo y la deformación a la que se someten las piezas. En la figura 50 se presenta la gráfica de convergencia para la solución.

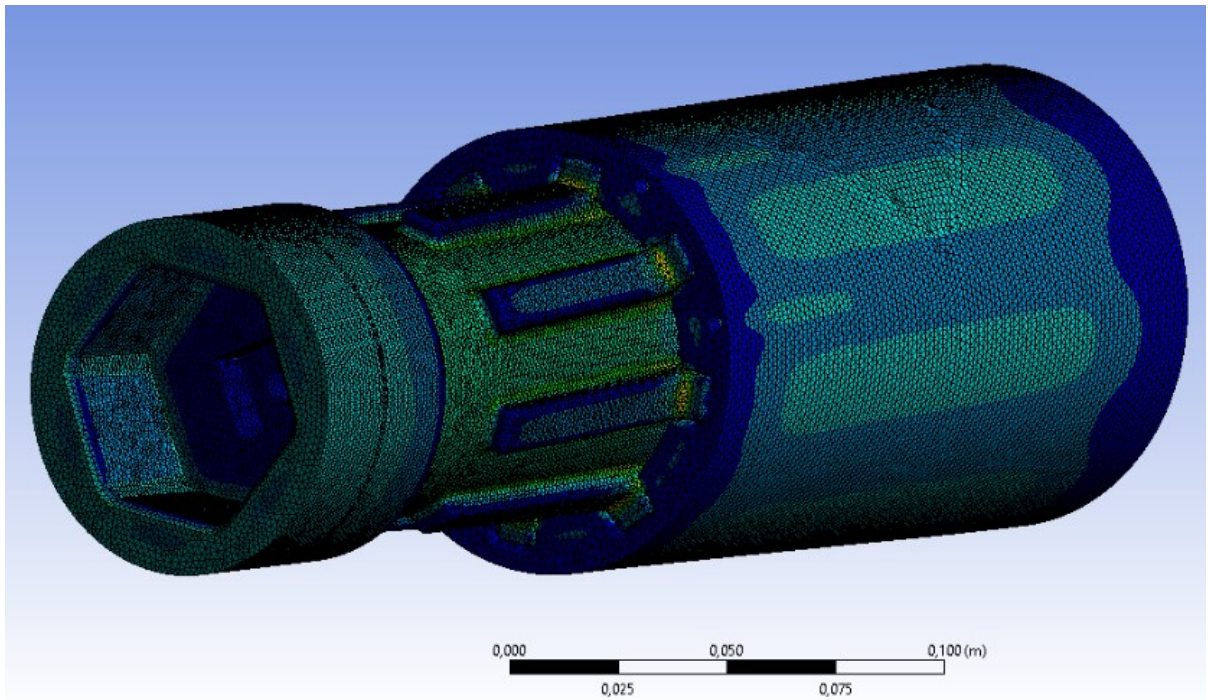


Figura 46: Vista desde el dado de las soluciones del sistema de acople.

Fuente: Elaboración propia.

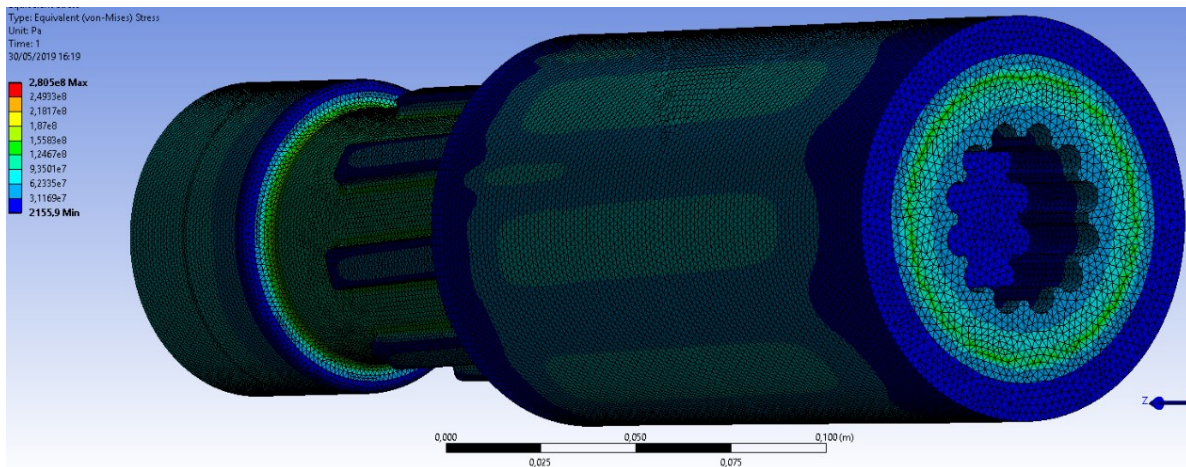


Figura 47: Vista desde la base de las soluciones del sistema de acople.
Fuente: Elaboración propia.

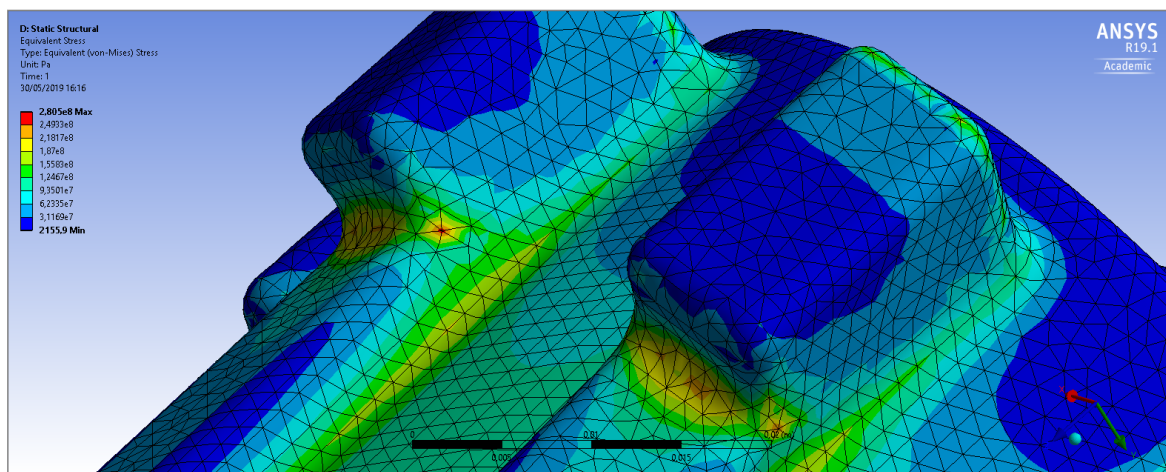


Figura 48: Detalle de las concentraciones de esfuerzo para la solución del sistema de acople.
Fuente: Elaboración propia.

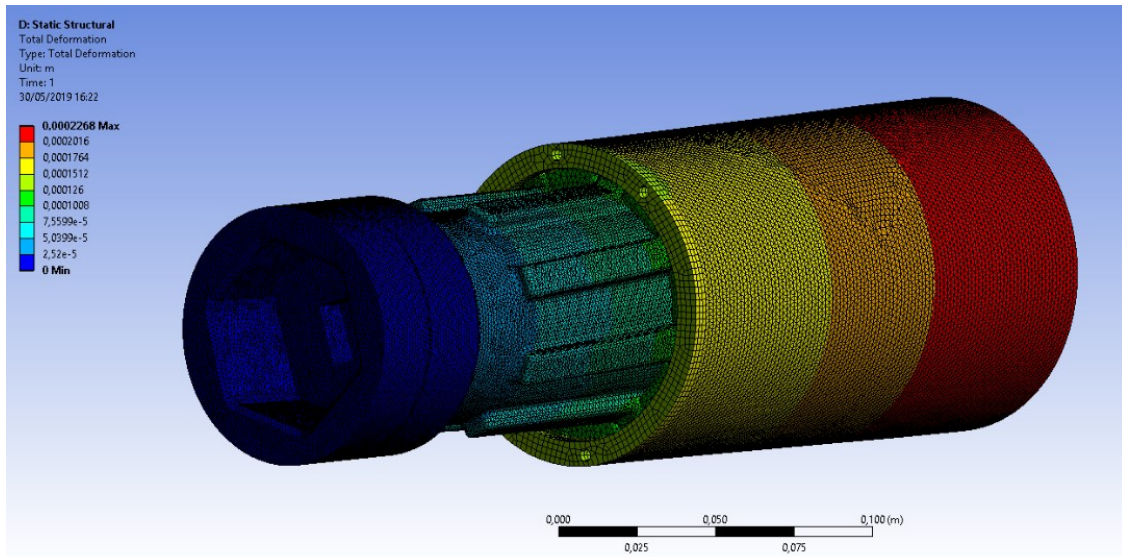


Figura 49: Detalle de las deformaciones en el sistema de acople vistas desde el dado.
 Fuente: Elaboración propia.

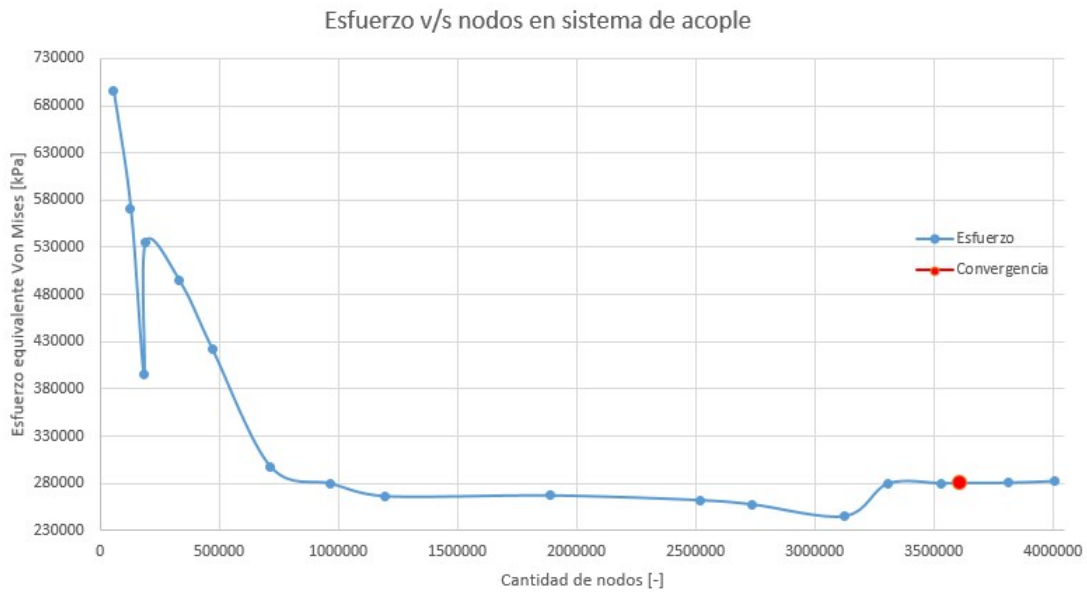


Figura 50: Gráfica de convergencia de resultados para sistema de acople.
 Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Extensión

4.1.2.1. Parte interior Al igual que para el sistema de acople, la malla a utilizar para esta parte es diseñada en base a todas las recomendaciones mencionadas en el punto 2.4.2, destacándose el uso de elementos del tipo cuadrático debido a las características físicas del problema [5], en cuanto a la forma de los elementos, para este caso se prefieren los del tipo tetraédricos por su bajo consumo de recursos computacionales (en comparación al modelo hexaédrico)[41] y buena adaptación a las geometrías de las piezas.

En las figuras 51 52 53 54 se muestra la malla 1028782 nodos y resultados de esfuerzo equivalente de Von Mises destacando algunos detalles importantes como, las zonas de concentraciones de esfuerzo.

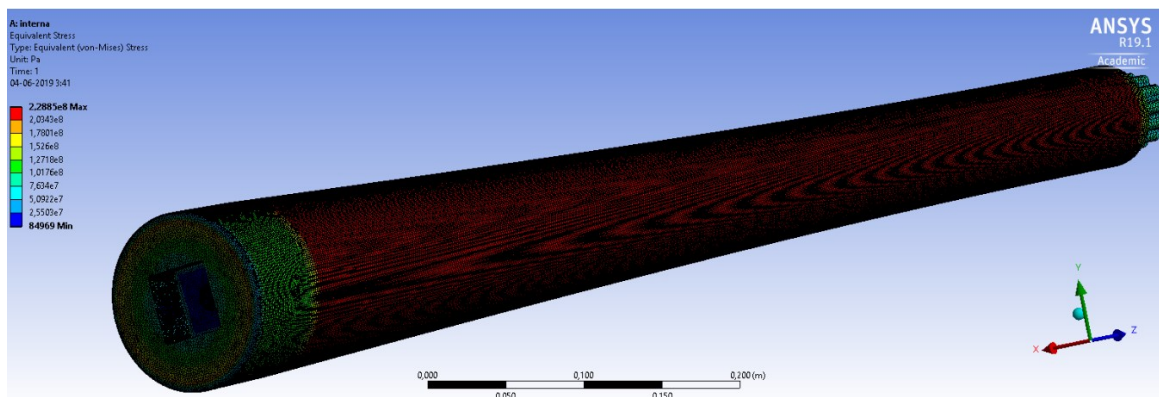


Figura 51: Vista de las soluciones desde la conexión con la herramienta ERAD 4000.

Fuente: Elaboración propia.

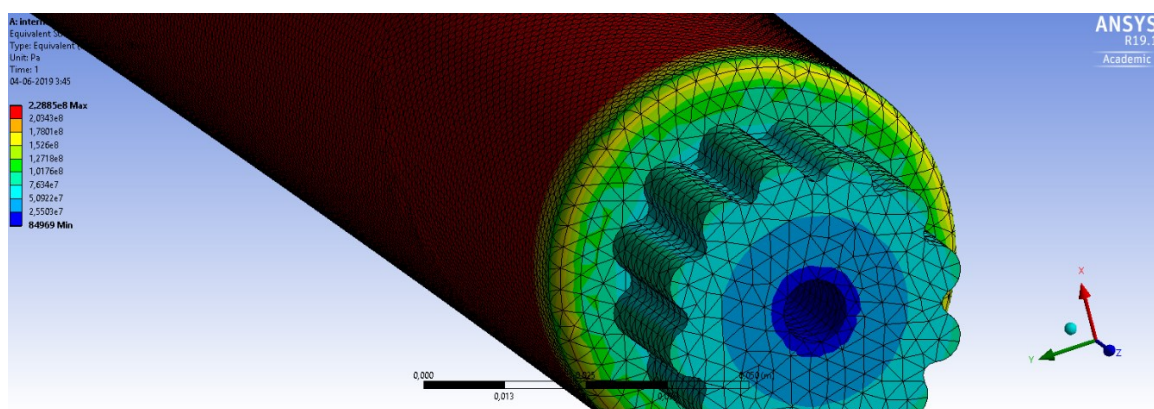


Figura 52: Vista de las soluciones desde la conexión con el sistema de acople.

Fuente: Elaboración propia.

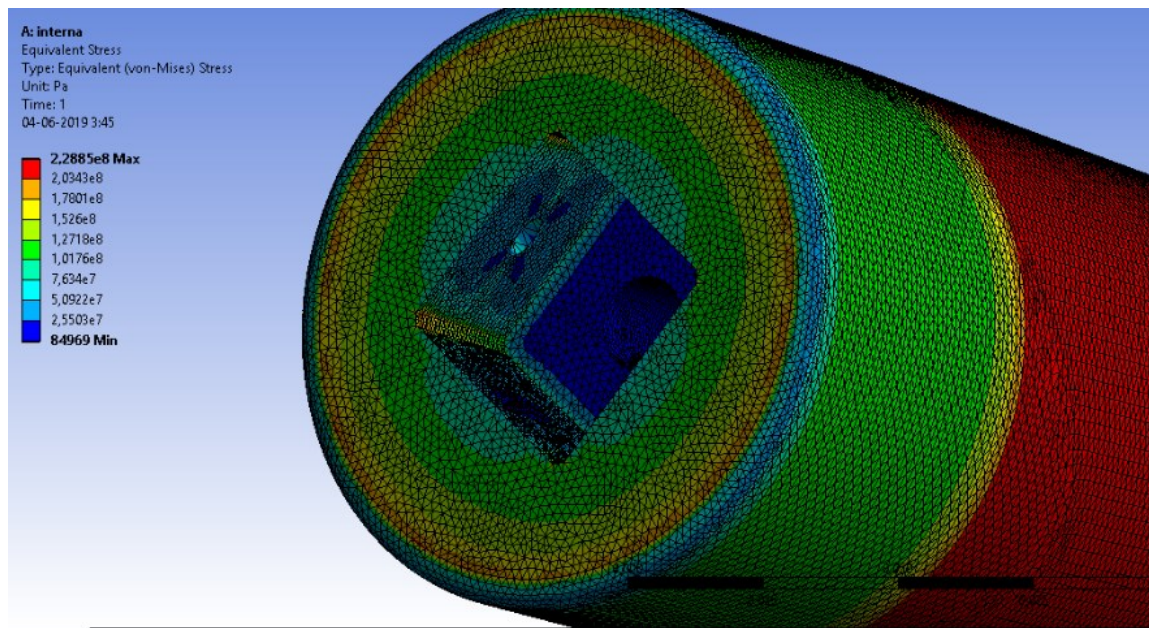


Figura 53: Detalle de concentraciones de esfuerzo en la conexión con la herramienta ERAD 4000.

Fuente: Elaboración propia.

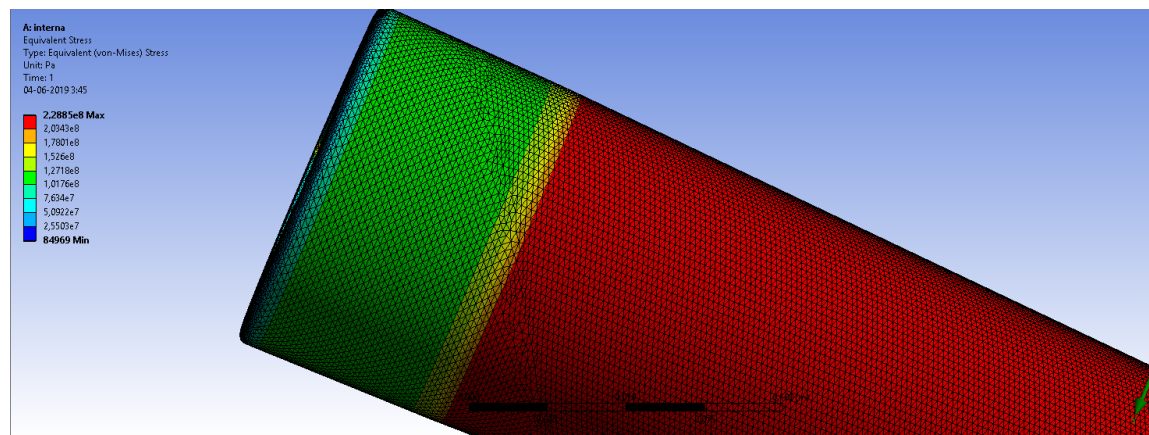


Figura 54: Detalle de las concentraciones de esfuerzo en la parte cilíndrica de la extensión.

Fuente: Elaboración propia.

Dado que gran parte de la geometría es una flecha (eje giratorio) y además como se muestra en las figuras 51 52 53 54 en esta zona es donde se encuentran las mayores solicitaciones, se aplica la teoría de la energía de distorsión solo a la parte cilíndrica de la parte interna, con el fin de obtener un valor de esfuerzo de Von Mises en dicha zona el cual es usado como referencia para encontrar el punto de convergencia de la solución.

$$\sigma' = (\sigma_x^2 + 3 * \tau_{zx}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Asumiendo un acero estructural, manteniendo las dimensiones del cilindro de la parte interior y aplicando una torsión de $3451[Nm]$ se obtiene un valor¹² de $\sigma' = 227466000[Pa]$

En la figura 55 se presenta la gráfica de convergencia para la solución, destacando en ella el valor teórico para el esfuerzo equivalente de Von Mises al que se encuentra sometido el cilindro.

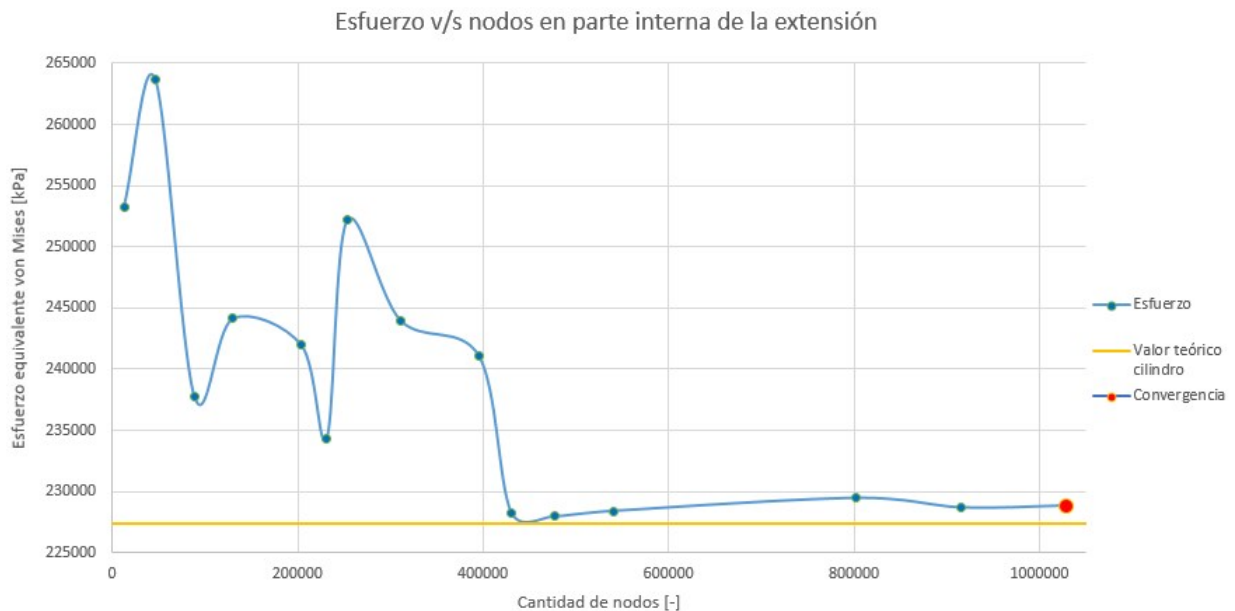


Figura 55: Gráfica de convergencia de resultados para parte interna de la extensión.

Fuente: Elaboración propia.

¹²Nótese que este resultado no considera un factor de seguridad, ya que es solo para fines de estimación de la convergencia.

4.1.2.2. Brazo de reacción Al igual que para todos los elementos analizados previamente, la malla a utilizar para esta parte es diseñada en base a todas las recomendaciones mencionadas en el punto 2.4.2, destacándose el uso de elementos del tipo cuadrático debido a las características físicas del problema [5], en cuanto a la forma de los elementos, en este problema, se optó por una malla basada en un método hexaédrico para las geometrías cercanas al cuadro roscado y basada en un método tetraédrico en las demás superficies, refinando las zonas que tienden a generar concentraciones de esfuerzos, como en el caso del eje redondo con filete en el hombro 58 .

En las figuras 56 58 57 60 61 62 se muestra la malla 654687 nodos y resultados de esfuerzo equivalente de Von Mises destacando algunos detalles importantes como, las zonas de concentraciones de esfuerzo.

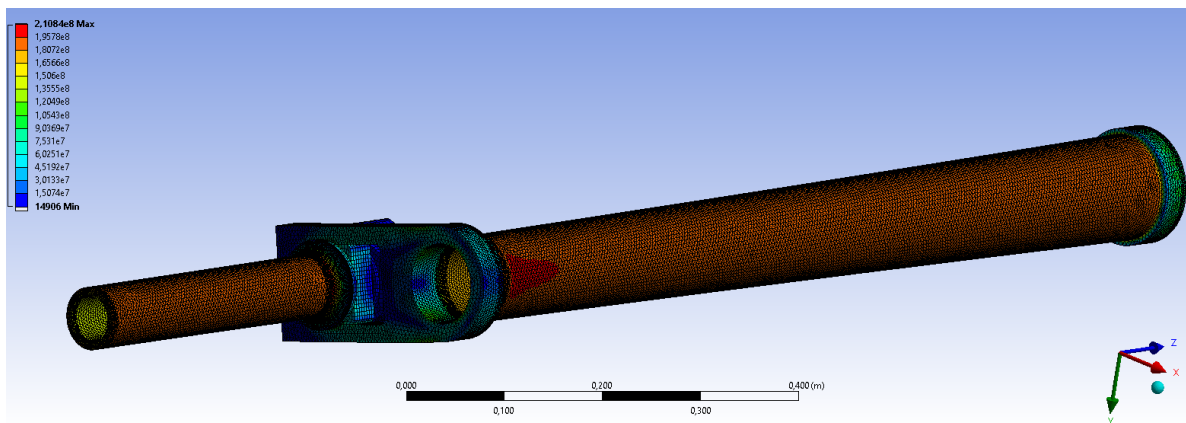


Figura 56: Vista desde el acople a la tuerca adyacente para los esfuerzos aplicados en el brazo de extensión.

Fuente: Elaboración propia.

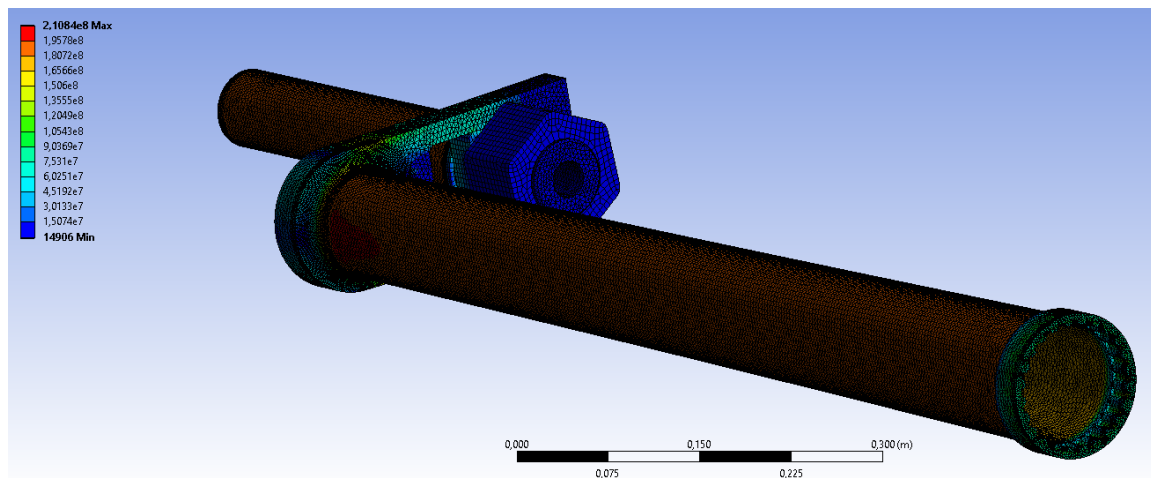


Figura 57: Vista desde el acople con la herramienta de torque para los esfuerzos aplicados en el brazo de extensión.

Fuente: Elaboración propia.

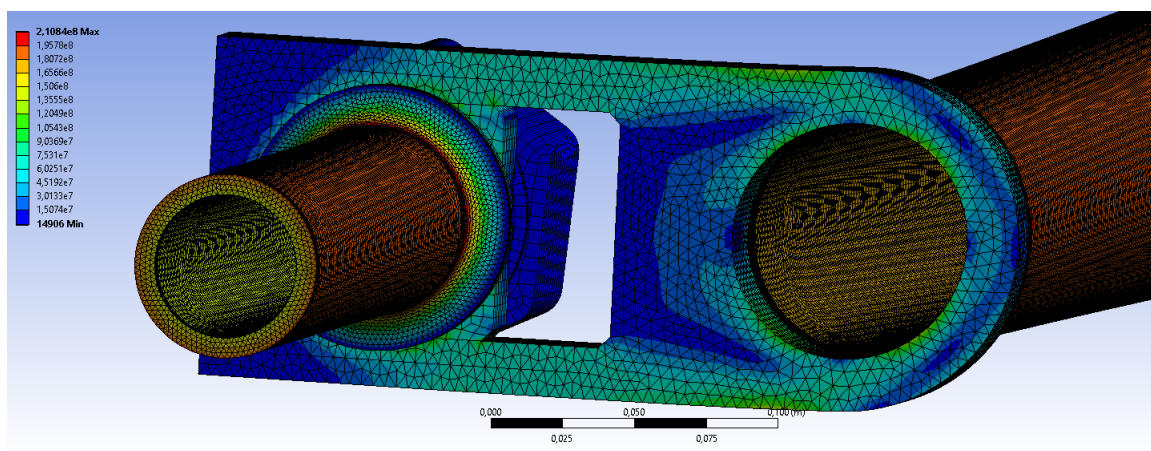


Figura 58: Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando la zona de acople a la tuerca adyacente.

Fuente: Elaboración propia.

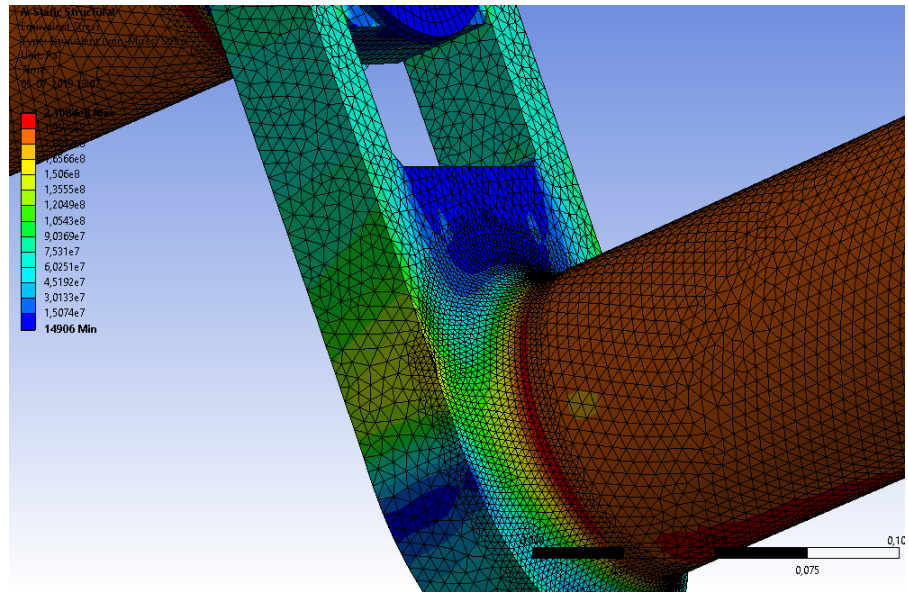


Figura 59: Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando la malla fina en el eje redondo con filete en el hombro vista 1.
Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

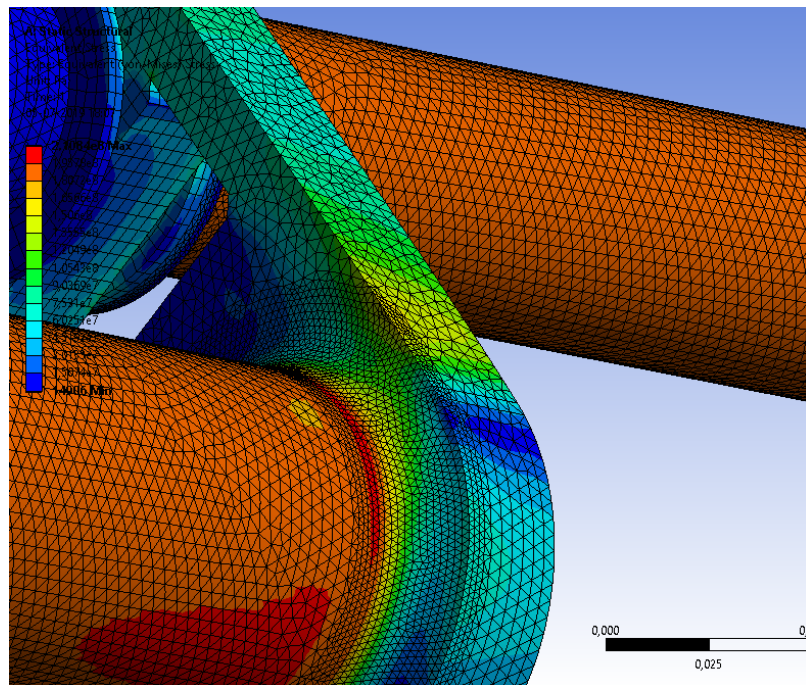


Figura 60: Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando la malla fina en el eje redondo con filete en el hombro vista 2.

Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

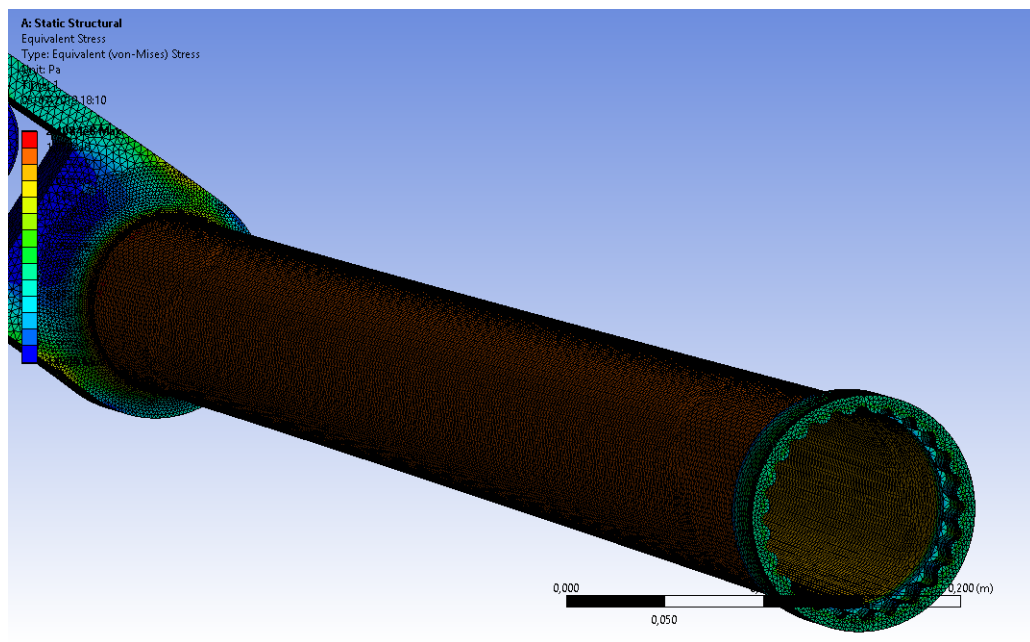


Figura 61: Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando la zona de acople con la herramienta de torque.

Fuente: Elaboración propia.

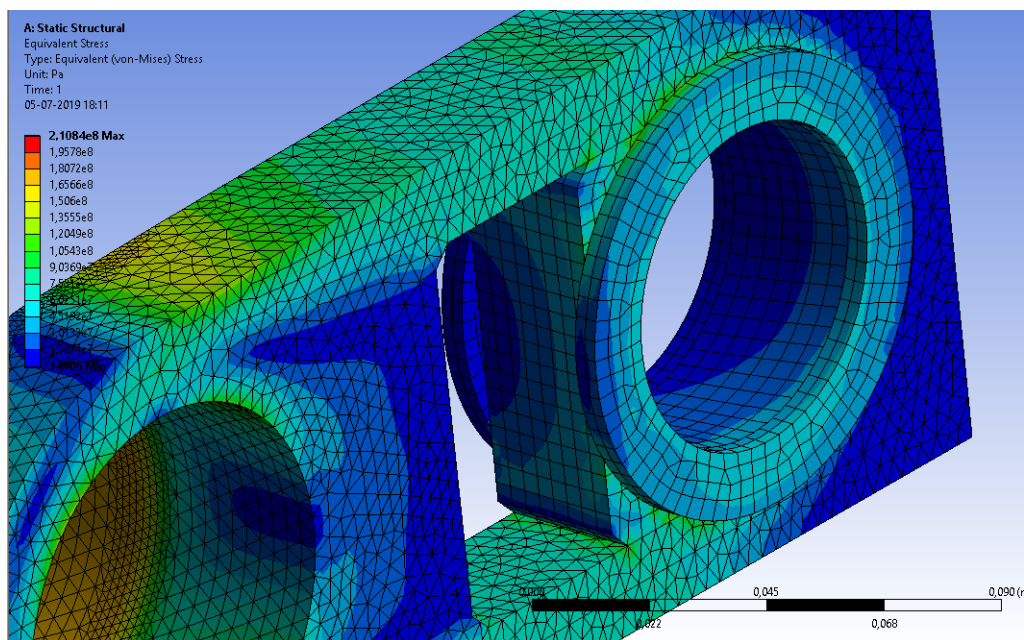


Figura 62: Detalle de las concentraciones de esfuerzo en el brazo de reacción, destacando el riel, cuadro y golillas.

Fuente: Elaboración propia.

Se destaca que la zona de mayor sollicitación del brazo de reacción, es la donde se encuentra el eje redondo con filete en el hombro.

En la figura 63 se presenta la gráfica de convergencia para la solución. .

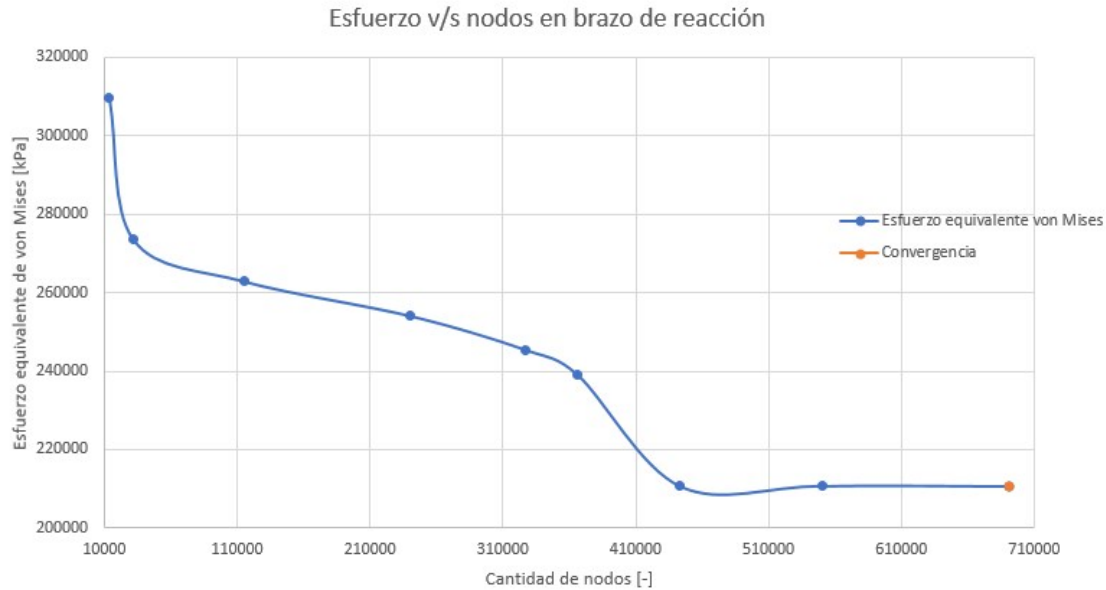


Figura 63: Gráfica de convergencia de resultados para el brazo de reacción.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Dimensionamiento de resorte

El diseño del resorte es necesario para poder obtener el peso total del conjunto de sistema de acople y el brazo de reacción. Las condiciones de diseño para este elemento son:

- El largo del resorte en su estado de reposo L (ver figura 64) debe ser menor o igual al recorrido máximo que puede realizar el dado de impacto con la base del sistema de acople $125[mm]$.
- El diámetro exterior del resorte $D1$ (ver figura 64) debe ser menor a $67 [mm]$ (espacio disponible en el interior de la base del sistema de acople).
- El resorte debe ser capaz de soportar los esfuerzos a los que se ve sometido.

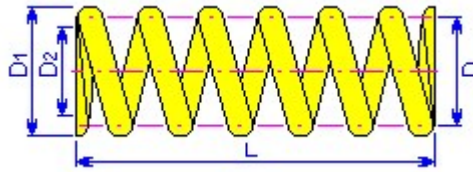


Figura 64: Esquema de resorte, destacando sus dimensiones importantes.
Fuente: Elaboración propia.

El dimensionamiento es realizado con el modulo de diseño del software Autodesk Inventor 2019, se selecciona como material un bronce al estaño, cuyas propiedades mecánicas relevantes para el diseño se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9: Propiedades mecánicas del bronce al estaño.
Fuente: Elaboración propia.

Propiedad	Valor
Tensión de rotura	128 [MPa]
Esfuerzo admisible de torsión	57.6 [MPa]
Módulo de cizalladura	41500 [MPa]
Densidad	8800 [kg/m ³]

De esta manera se obtiene un resorte de 0.43 [kg] diseñado para vida mayor a las 10000000 deflexiones, cuyas dimensiones son (vease figura 64)

- $L = 125$ [mm]
- $D_1 = 44$ [mm]
- $D_2 = 8$ [mm]

4.3. Análisis de resultados

Para el valor del peso del conjunto de sistema de acople y extensión, se asume que los materiales a utilizar en dichos elementos serán:

- Para el sistema de acople un acero AISI 4340.
- Para el resorte el bronce al estaño mencionado en el punto anterior.
- Para la parte interna de la extensión un acero AISI 1141 laminado en frío.
- Para el brazo de reacción un acero AISI 4330V

Los resultados se muestran en la tabla 10.

Tabla 10: Pesos de los distintos elementos.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Valor
Sistema de Acople (sin resorte)	10.570 [kg]
Resorte	0.43 [kg]
Parte interna de la extensión	9.213 [kg]
Brazo de reacción	16.449 [kg]

A partir de estos resultados se llega a un peso total del conjunto de 36.662 [kg].

En los puntos 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 y 4.3.4 se presentan los resultados para los posibles materiales a utilizar para cada uno de los elementos, en base a los valores de las propiedades mecánicas de los materiales propuestos en [7] [21] [27].

4.3.1. Sistema de acople

Para este elemento es necesario que su material de construcción tenga una resistencia a la fluencia mayor a 841,5[MPa] En la tabla 11 se presentan algunos materiales que cumplen con dicho requerimiento.

Tabla 11: Lista de posibles materiales a utilizar para el sistema de acople.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Descripción	Resistencia a la fluencia [MPa]	Densidad [kg/m]
ASTM B805	Inconel 725	855	8300
AISI 4340	Normalizado	860	7800
15-5PH	H1075	862	7830
AISI 4820	Templado en aceite y revenido a 150	868	7850
Berillium Copper	TF00	896	8250
AISI 4130	Templado y revenido a 540°C	910	7830
15-5PH	H1025	1000	7820
ASTM B637	Inconel 718	1034	8230
AISI 4330V	ASTM A225	1034	7850
AISI 4140	Templado y revenido a 425°C	1140	7800
AISI 4340	Templado y revenido a 425°C	1150	7830
15-5PH	H900	1172	7810
AISI 4130	Templado y revenido a 425°C	1190	7830
AISI 4340M	300M	1240	7850
AISI 1141	Templado y revenido a 315°C	1280	7830

4.3.2. Resorte

Para este resorte el abanico de materiales a utilizar es muy amplio, la diferencia en peso no será muy significativa para el diseño de la herramienta, pero si lo puede ser el precio y la mantenibilidad del mismo. En la tabla 12 se muestran algunos materiales típicos utilizados en resortes.

Tabla 12: Lista de posibles materiales a utilizar para el resorte.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Descripción
C91000	Bronce al estaño
AISI 1020	Acero al carbono
15-5 PH	Acero inoxidable

4.3.3. Parte interior

Para este elemento es necesario que su material de construcción tenga una resistencia a la fluencia mayor a $686[MPa]$ En la tabla 13 se presentan algunos materiales que cumplen con dicho requerimiento.

Tabla 13: Lista de posibles materiales a utilizar para la parte interior de la extensión.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Descripción	Resistencia a la fluencia [MPa]	Densidad [kg/m^3]
AISI 4140	Normalizado	689	7830
AISI 1141	Laminado en frío	700	7800
AISI 4620	Templado en aceite y revenido a 150 °C	724	7830
15-5 PH	H1150-M	724	7860
AISI 1060	Templado y revenido a 425°C	765	7850
AISI 1095	Templado y revenido a 425°C	772	7850
17-4 PH	H1150-M	792	7750
AISI 1050	Templado y revenido a 425°C	793	7850
AISI 1050	Templado y revenido a 425 °C	793	7850
ASTM B805	Inconel 725	855	8300
AISI 4340	Normalizado	860	7800
15-5PH	H1075	862	7830
AISI 4820	Templado en aceite y revenido a 150 °C	868	7850
Berillium Copper	TF00	896	8250
AISI 4130	Templado y revenido a 540°C	910	7830
15-5PH	H1025	1000	7820
ASTM B637	Inconel 718	1034	8230
AISI 4330V	ASTM A225	1034	7850
AISI 4140	Templado y revenido a 425°C	1140	7800
AISI 4340	Templado y revenido a 425°C	1150	7830
15-5PH	H900	1172	7810
AISI 4130	Templado y revenido a 425°C	1190	7830
AISI 4340M	300M	1240	7850

4.3.4. Brazo de reacción

Para este elemento es necesario que su material de construcción tenga una resistencia a la fluencia mayor a 640[MPa] En la tabla 14 se presentan algunos materiales que cumplen con dicho requerimiento.

Tabla 14: Lista de posibles materiales a utilizar para el brazo de reacción de la extensión.
Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Descripción	Resistencia a la fluencia [MPa]	Densidad [kg/m^3]
AISI 1030	Templado y revenido a 205°C	648	7850
AISI 4140	Normalizado	689	7830
AISI 1141	Laminado en frío	700	7800
AISI 4620	Templado en aceite y revenido a 150°C	724	7830
15-5 PH	H1150-M	724	7860
AISI 1060	Templado y revenido a 425°C	765	7850
AISI 1095	Templado y revenido a 425°C	772	7850
17-4 PH	H1150-M	792	7750
AISI 1050	Templado y revenido a 425°C	793	7850
AISI 1050	Templado y revenido a 425°C	793	7850
ASTM B805	Inconel 725	855	8300
AISI 4340	Normalizado	860	7800
15-5PH	H1075	862	7830
AISI 4820	Templado en aceite y revenido a 150°C	868	7850
Berillium Copper	TF00	896	8250
AISI 4130	Templado y revenido a 540°C	910	7830
15-5PH	H1025	1000	7820
ASTM B637	Inconel 718	1034	8230
AISI 4330V	ASTM A225	1034	7850
AISI 4140	Templado y revenido a 425°C	1140	7800
AISI 4340	Templado y revenido a 425°C	1150	7830
15-5PH	H900	1172	7810
AISI 4130	Templado y revenido a 425°C	1190	7830
AISI 4340M	300M	1240	7850

CONCLUSIONES

En este trabajo, se obtiene el diseño de un sistema de acople, que da solución al problema de calce existente entre la tuerca y la herramienta automatizada, tal como fue demostrado en la prueba de concepto. Así como también, el diseño de una extensión y brazo de reacción que permiten que la herramienta pueda alcanzar todas las posiciones de las tuercas que se encuentran en las distintas ruedas estudiadas en este trabajo de título.

Dichos elementos, fueron diseñados para soportar esfuerzos bajo las condiciones de diseño más desfavorables; por ende, son capaces de cumplir con sus funciones requeridas de manera confiable, para realizar la instalación o extracción de tuercas en todas las ruedas de camines OTR que fueron estudiadas en este trabajo. Siendo tan solo el dado de impacto y el cilindro que se acopla a la tuerca adyacente, los elementos que pueden variar, según las dimensiones de las tuercas a tratar.

Una condición de diseño importante es el peso total del conjunto de sistema de acople, extensión y brazo de reacción. El valor límite de esta condición lo otorga principalmente el sistema de posicionamiento¹³ a utilizar para la herramienta automatizada. Los diseños planteados en este trabajo de título suman un peso total de 36.662 [kg], destacándose que dependiendo de los materiales a utilizar se puede aumentar o reducir el peso de estos diseños, su factor de seguridad o el costo de los mismos.

Al comparar los diseños propuestos de extensión y brazo de reacción con los actualmente disponibles en el mercado, se destaca que los modelos propuestos son aproximadamente un 33 % más livianos.

Cabe destacar las ventajas que implica el poder desarrollar un proyecto completo de herramienta automatizada, como el hecho de proteger a los operarios de las empresas de mantenimiento de vehículos OTR, al retirarlos de la principal zona de accidentes en faena y evitando el uso de cilindros hidráulicos y neumáticos. Así como el posible ahorro en el tiempo destinado a la realización de la tarea de instalación y extracción de tuercas, ya que esta requiere del seguimiento de muchos protocolos de seguridad, lo que implica una disminución en los costos de operación asociados a esta tarea. Además del hecho de poder aumentar el rendimiento y producción en la actividad económica más importante del país.

Se destaca la importancia y pertinencia del proceso de desarrollo de productos elegido, ya que a partir de este se pudo cumplir con el objetivo general. Utilizando pocos recursos, (impresoras 3D, software CAD y un software de elementos finitos) y sin la necesidad de un gran conocimiento específico sobre el área de aplicación.

¹³El denominado como caja negra en este trabajo, un ejemplo pueden ser brazos robóticos.

En cuanto al prototipado y su proceso de manufactura, se nota que este presenta ciertas ventajas y desventajas. Como principal ventaja se destaca, que al trabajar con este modelo de impresoras 3D y filamentos de PLA hace que el proceso sea bastante barato y simple de utilizar, en comparación a otros métodos de prototipado.

Pero también conlleva ciertas desventajas, como el hecho de que existe cierto nivel de compresión en los productos manufacturados, lo que se traduce en una pérdida de precisión en el proceso de manufactura. Tras varias pruebas realizadas se pudo concluir que esta compresión depende tanto del tipo filamento utilizado, el material, el grosor de este, la altura de impresión, así como también del tipo de impresora 3D utilizada. No obstante, no se realizaron suficientes pruebas como para poder cuantificar el nivel de compresión asociado a cada cambio.

Otras desventajas, la limitante de tamaño de cada a pieza a modelar, que depende de la impresora a utilizar, la baja resistencia mecánica del PLA y la calibración de los equipos, que se hace de forma manual por el usuario, por ende, depende principalmente del criterio del calibrador.

A modo de conclusión general para el proceso de manufactura, se recomienda para el desarrollo de prototipos, si bien no es el método más eficiente, es bastante barato y simple. Pero no es recomendado para un producto final, menos en este tipo de aplicación, que requiere de una alta precisión y donde el material es sometido a altos esfuerzos.

La prueba de concepto realizada con el prototipo de sistema de acople, además de confirmar la capacidad que posee este diseño para superar el problema de alineamiento imperfecto entre el dado de impacto y la tuerca a tratar. Entregó información relevante para el diseño final, como la necesidad de implementar un sistema que asegure la correcta ubicación de la tuerca para el proceso de instalación, así como también la correlación del dado de impacto con la capacidad del sistema para evitar acoples imperfectos.

En el marco de la universalidad de la solución, se destaca la posibilidad de utilizar un solo cuadro, en el brazo de reacción. Para de esta forma, cambiar solo el acople a la tuerca adyacente según la tuerca a tratar. Pero esta opción involucra un aumento en la resistencia a la fluencia del material a utilizar para la construcción de esta pieza; debido a la aparición de concentraciones de esfuerzos, como consecuencia del cambio en la forma de la misma. Ver figura 71 en apartado anexos. Por lo tanto se debe analizar económicamente que conviene más, si un cuadro común o un cuadro y cilindro de acople para cada tuerca.

En cuanto al método de los elementos finitos y al uso de un software comercial para aplicarlo, cabe destacar, que es posible llegar a aproximaciones relativamente correctas, indistintamente del método o forma de malla a utilizar; pero la diferencia radica en la cantidad de recursos que toma llegar a una aproximación adecuada.

La zona de mayor sollicitación para el sistema de acople, se encuentra como es de esperarse en la zona del dado de impacto que se encuentra en contacto las ranuras de la base de dicho sistema. Debido al pequeño choque que ocurre cuando estas dos piezas se juntan para transmitir el torque hacia la tuerca, como consecuencia del ajuste entre ambas.

Para la parte interna de la extensión se destaca que su zona de mayor sollicitación es el cilindro que permite la conexión entre la herramienta de torque y el sistema de acople. Lo que supone una ventaja al comprobar los resultados ya que este cilindro tiene un resultado teórico exacto.

Para el brazo de reacción las zonas de mayor sollicitación corresponden a las formas de eje redondo con filete en el hombro que se encuentran en ambos cilindros, tanto en el de conexión a la tuerca adyacente como en el de conexión a la herramienta de torque. Este resultado también es esperado ya que la teoría señala que esta forma en particular tiene un alto factor de concentración de esfuerzos [7], también se destaca el hecho de que se hace muy difícil poder evaluar las roscas correspondientes en el cuadro y la tuerca, debido a que genera problemas en el mallado de los mismos, pero en este caso se utilizó un modelo que simula el comportamiento de la rosca y se emplea un dado dimensionado adecuadamente ,según normas para esta aplicación, en el caso en particular mostrado es un ANSI M64x 6 .

TRABAJOS FUTUROS

En el marco de las soluciones específicas presentadas en este trabajo se recomienda:

- Diseñar una pieza que permita separar a la zona del riel con el cilindro que está conectado a la herramienta E-RAD, de manera tal, que el mismo brazo de reacción pueda ser utilizado para las todas las ruedas y tuercas posibles a tratar, además de permitir utilizar diferentes materiales en las diferentes piezas que conforman el brazo de reacción. En este punto, se recomienda hacer el análisis de elementos finitos, utilizando una malla de orden cuadrático basada en hexaedros, debido a que esta pieza estará expuesta principalmente a flexión.
- Analizar la factibilidad de la inclusión de un sistema que permita gestionar la tuerca al momento de ser extraída, como por ejemplo con un modelo similar al mencionado en la referencia [32].
- Diseñar una pieza de sacrificio para el conjunto de brazo de reacción, extensión y sistema de acople, en lo posible asociada a uno de los dos últimos elementos mencionados, para que de esta forma en caso de alguna falla los elementos mas valiosos del conjunto no se vean afectados.

En el caso de desarrollar un proyecto de herramienta automatizada completo, con un sistema de posicionamiento definido:

- Realizar una prueba en terreno de la extensión, brazo de reacción y sistema de acople en conjunto con el resto de la herramienta automatizada (caja negra), para en primer lugar confirmar la validez del modelo numérico presentado en este trabajo de título y a su vez, encontrar otros problemas asociados a variables que no se pueden detectar de manera simple realizando el estudio desde un laboratorio de simulación, como por ejemplo posibles deformaciones en la rueda.
- Optimizar el diseño final presentado, en base a algún parámetro requerido, por ejemplo, costo total, peso, confiabilidad, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASMEB107.110 (2012). *Socket Wrenches, Handles, and Attachments*.
- [2] ASMEB107.33M (2002). *Socket Wrenches, Impact (Metric Series)*.
- [3] ASMEB107.4 (2005). *Driving and Spindle Ends for Portable Hand, Impact, Air and Electric Tools (Percussion Tools Excluded)*.
- [4] Atlas Copco (2018). *Tool accessories*.
- [5] Benzley, S., Perry, E., Merkley, K., Clark, B., y Sjaardema, G. (1995). A comparison of all hexagonal and all tetrahedral finite element meshes for elastic and elasto-plastic analysis. *Proceedings, 4th International Meshing Roundtable*, 17.
- [6] bosch (2019). Manual de datos y accesorios de impacto. *Recuperado de:* <https://www.bosch-professional.com/es/>.
- [7] Budynas, R. G. . y Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, volumen 8. McGraw Hill.
- [8] CAE ASSOCIATES (2014). *Engineer's Guide to Finite Element Analysis of Part-to-Part Connections*.
- [9] Chandrupatla, B. (2002). *Introduction to Finite Elements in Engineering*, volumen 3. Prentice Hall.
- [10] COCHILCO (2013). Perspectivas de la inversión en la minería chilena. *Recuperado de:* <https://boletin.cochilco.cl>.
- [11] COCHILCO (2016). Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre. *Recuperado de:* <https://www.cochilco.cl/>, pp. 26–33.
- [12] COCHILCO (2017). Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre. *Recuperado de:* <https://www.cochilco.cl/>, p. 21.
- [13] COCHILCO (2018). Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales. *Recuperado de:* <https://www.cochilco.cl/>, pp. 60–62.
- [14] Coll, A. (2003). *Mejora de la calidad de mallas para elementos finitos*. UPC.
- [15] Consejo Minero (2018). Cifras actualizadas de la minería. *Recuperado de:* <http://dev.consejominero.cl>, p. 37.
- [16] Cook, R. D. (1995). *Finite Element Modeling for stress analysis*, volumen 1. Jhon Wiley & Sons, INC.

- [17] DeWalt (2018). Catálogo tarifa. *Recuperado de:* https://www.dewalt.es/partage/brochures-ES/DW_CATALOGO_2018_ES.pdf.
- [18] FMA (2018). Otr tire ring remover product description. *Recuperado de:* <https://www.fmaindustrial.com/en/productos/otr-tire-ring-remover/>.
- [19] GearWrench (2018). Catálogo de productos. *Recuperado de:* http://www.elit.com.mx/wp-content/uploads/2017/12/GEARWRENCH-HERRAMIENTAS-CATALOGO-2018_0.pdf.
- [20] Global Mining Products Inc. (2006). E-rad electronic torque tools. *Recuperado de:* <http://www.globalminingproducts.com/MERAD4000.html>.
- [21] INCO (1982). *Properties of some metals and alloys*, volumen 1.
- [22] ISO286 (2010). *Geometrical product specifications*.
- [23] J Shigley, C. M. (2000). *Diseño en ingeniería mecánica*, volumen 5. McGraw Hill.
- [24] KOMATSU (2017). Shop manual komatsu 930e-4 dump truck cebm020600.
- [25] Kreiner, J. (2008). *Generación de mallas de elementos finitos en 3D y aplicaciones a problemas elípticos*, volumen 1. UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES.
- [26] Makita (2019). Manual herramientas. *Recuperado de:* <http://www.makita.cl/download/catalogos/Catalogo-Makita-2019.pdf>.
- [27] MechaniCalc (2019). Engineering materials database. *Recuperado de:* <https://mechanicalc.com/reference/engineering-materials>.
- [28] Minería Chilena (2009). Monitoreando neumáticos gigantes. *Recuperado de:* <http://www.mch.cl/>.
- [29] Naman Automative Solutions (2013). *TYRE CHANGERS For Change of Tyre*.
- [30] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J. Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, volumen 6. ELSEVIER.
- [31] Pahl, G. B., Beitz, W., Feldhusen, J., y Grote, K. (2007). *Engineering design: a systematic approach*, volumen 3. Springer.
- [32] Piñones (2016). *Casos de estudio de la aplicación de una metodología de diseño en el contexto de la industria minera*. UTFSM.
- [33] RAD (2016). Serie electrónica e-rad blu. *Recuperado de:* <https://www.radtorque.eu/es/herramientas/electronica/serie-e-rad-blu/?r=1>.
- [34] RAD (2019). *RAD Torque product brochure*.
- [35] Revista Técnicos Mineros (2015). El difícil recambio de neumáticos en la minería.

- [36] Stanley (2019). Llaves de impacto. *Recuperado de:*
<https://www.stanleyinfrastructure.com/es/>.
- [37] StructurePoint (2017). *Finite element aspect ratio influence in concrete foundation models*.
- [38] Titan Mining (2013). Servicios y productos de minería.
- [39] Ultimaker (2016). *GO Factsheet*.
- [40] URREA (2017). Manual de dados y accesorios de impacto. *Recuperado de:*
<http://www.elpanol.com/pdf/urrea/manuales/>.
- [41] Wang, E., Nelson, T., y Rauch, R. (2004). Back to elements - tetrahedra vs. hexahedra.

ANEXOS

4.1. Figuras

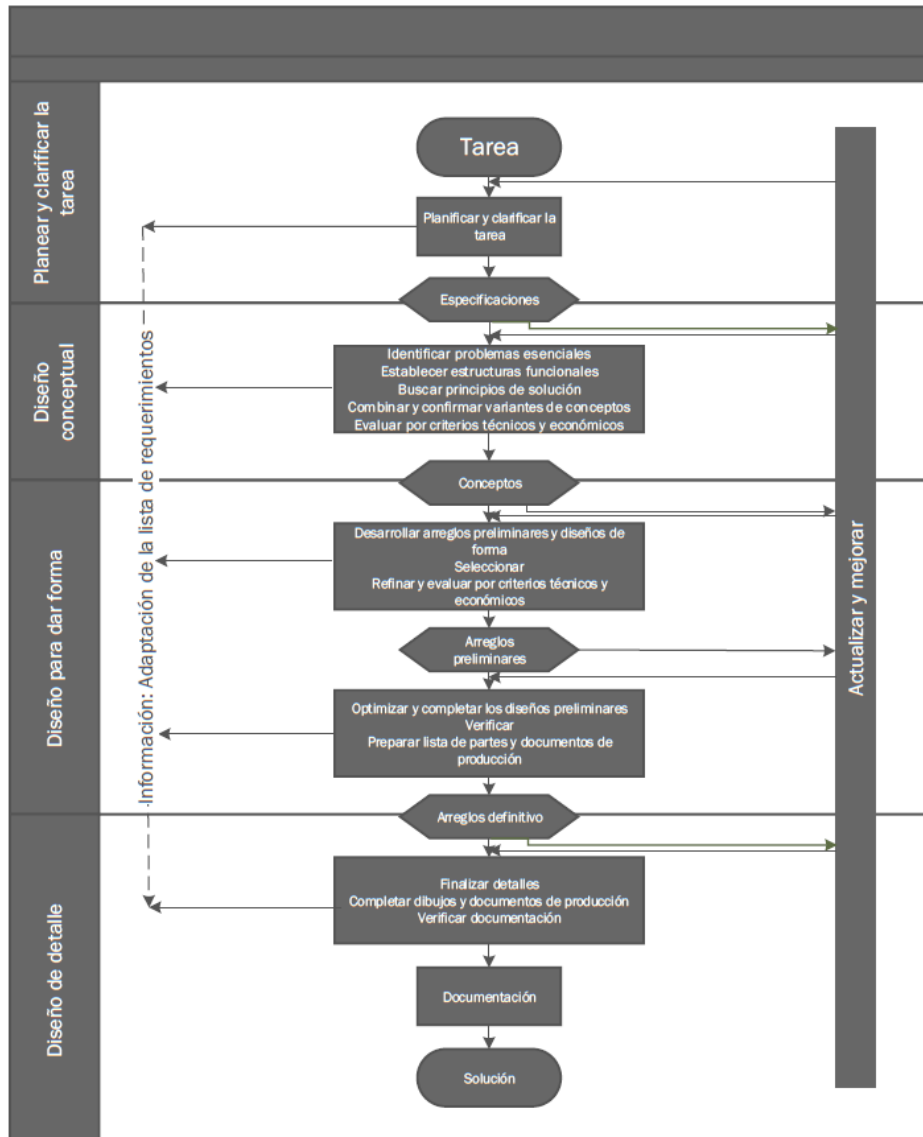


Figura 65: Proceso de desarrollo de productos propuesto por Pahl.
Fuente: Pahl et al (2007). Engineering design: a systematic approach [31]

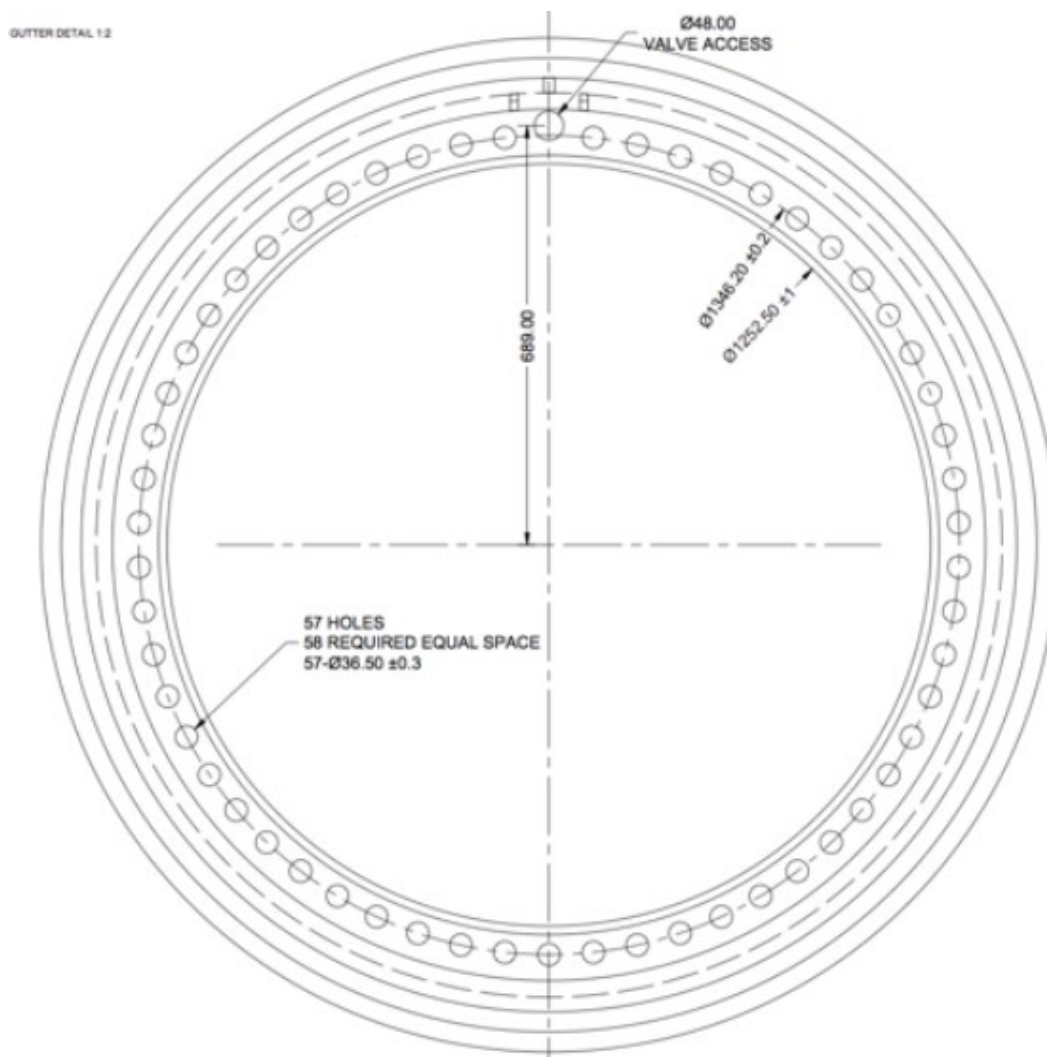


Figura 66: Plano de rueda de camión KOMATSU 930e.
Fuente: Manual de camión KOMATSU 930E.

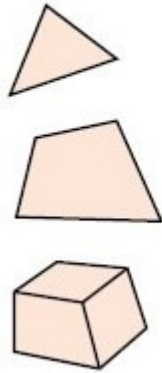


Figura 67: Tuerca comercial maraca IMPORTER.



Figura 68: Tuercas ubicadas muy cerca unas de otras en un camión OTR.

Aspecto de ratio bueno



Aspecto de ratio malo

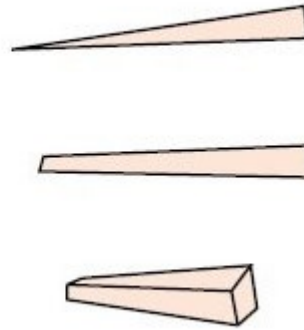
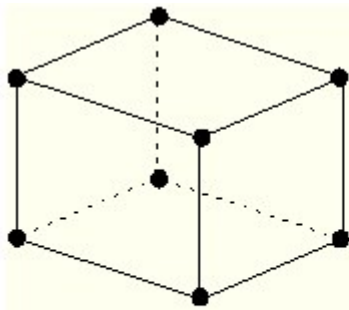
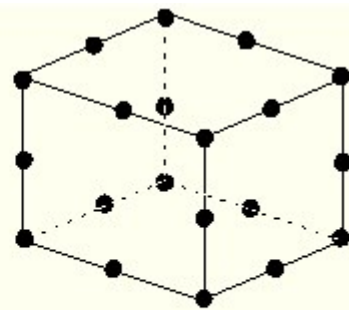


Figura 69: Relación de aspecto (aspect ratio) para ciertos tipos de celdas.



(a) Linear element
(8-node brick, C3D8)



(b) Quadratic element
(20-node brick, C3D20)

Figura 70: Elementos de primer y segundo orden.

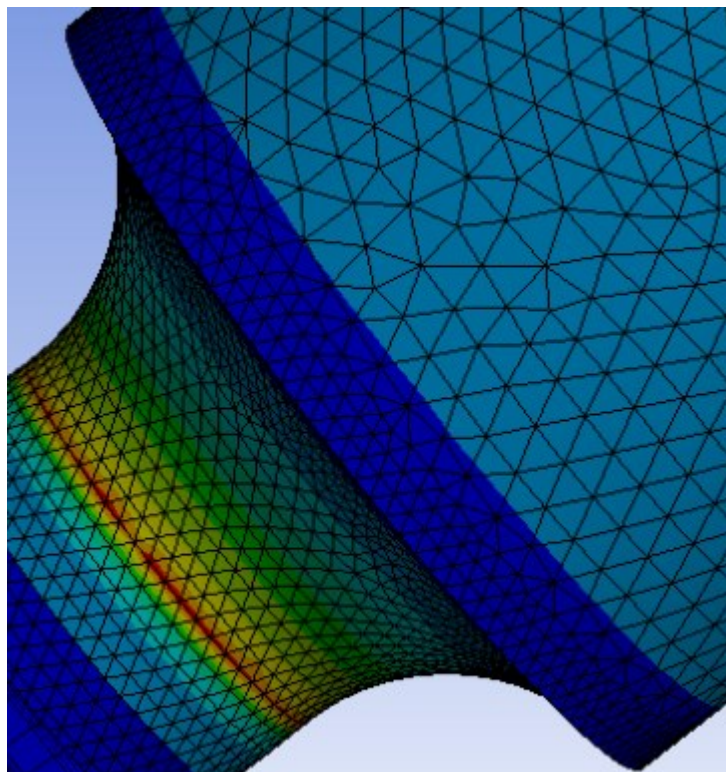


Figura 71: Forma mas universal para punto de reacción.

4.2. Software utilizados

Además del software ANSYS 19.1 el cual es descrito en el punto 2.4.1. En este apartado se mencionan otros softwares utilizados para el desarrollo del presente trabajo de título:

- Autodesk Inventor Professional 2019: software CAD 3D Autodesk Inventor se utiliza para diseño, renderización y simulación de productos
- Ultimaker Cura 3.4.0: Cura es una aplicación de corte de impresora 3D empleado por Ultimaker.

4.3. Equipos utilizados

- Motor híbrido paso a paso OPENBUILDS MT-1704HS168A-OB: Para darle el movimiento rotacional necesario para la extracción o instalación de tuercas al sistema de acople.



Figura 72: Motor híbrido paso a paso OPENBUILDS utilizado en el arreglo.

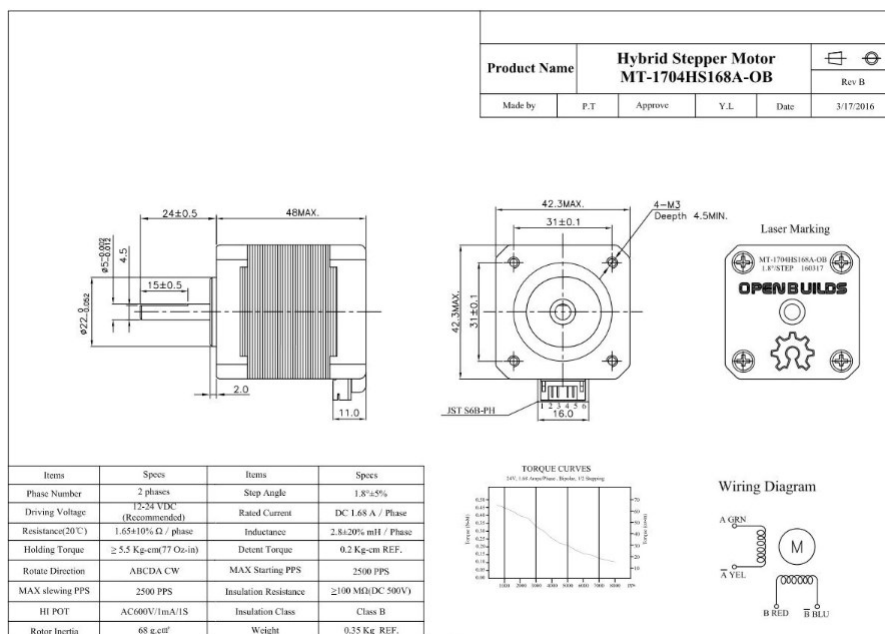


Figura 73: Plano motor híbrido paso a paso.

- Ultimaker² GO: Impresora 3D utilizada para la manufactura de las piezas del prototipo de sistema de acople. (factsheet disponible en la pagina de ultimaker)



Figura 74: Impresora 3D Ultimaker ² GO disponible en el laboratorio de prototipado de IDP UTFSM.

- Paquete de actuadores lineales C-BEAM OPENBUILDS: Para simular el movimiento del brazo robótico en el eje axial, realizando el acercamiento o alejamiento de la herramienta hacia la tuerca.



Figura 75: Paquete de actuadores lineales C-BEAM utilizado en el arreglo.

- Placa controladora arduino CNC de 6 ejes: para controlar tanto el paquete de actuadores lineales como el motor híbrido paso a paso, la configuración de todo el arreglo es realizada por el alumno.



Figura 76: Placa controladora arduino CNC de 6 ejes utilizada en el arreglo.