

Universidad Internacional del Ecuador

Escuela de Ingeniería Automotriz



**Optimización Topológica Multifase Sobre Diseño Generativo de
Biela de Motor de Combustión Interna a Través del Software
Inventor**

**Proyecto de Titulación para la obtención del Título de Ingeniería en Mecánica
Automotriz**

Stalin Johnny Beltrán Zamora

Director: Ing. Edgar Gustavo Vera Puebla, MSc.

**Guayaquil-Ecuador
Marzo, 2022**

**Universidad Internacional Del Ecuador
Escuela De Ingeniería Automotriz**

Certificado

Ing. Edgar Gustavo Vera Puebla, MsC

CERTIFICA

Que el trabajo titulado “Optimización Topológica Multifase Sobre Diseño Generativo De Biela De Motor De Combustión Interna A Través Del Software Inventor”, realizado por la estudiante: **Stalin Johnny Beltrán Zamora**, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple las normas estipuladas por la Universidad Internacional del Ecuador, en el Reglamento de Estudiantes.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional. El mencionado trabajo consta de un empastado que contiene toda la información de este trabajo. Autoriza a la Sr. Stalin Johnny Beltrán Zamora, que lo entregue a biblioteca de la Escuela, en su calidad de custodia de recursos y materiales bibliográficos.

Guayaquil, 14 de marzo de 2022

Ing. Edgar Vera Puebla, MsC.

Director de Proyecto

Universidad Internacional Del Ecuador**Escuela De Ingeniería Automotriz****Certificado Y Acuerdo De Confidencialidad**

Yo, Stalin Johnny Beltrán Zamora, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet; según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

Stalin Johnny Beltrán Zamora

C.I: 1206089102

Dedicatoria

Quiero dedicar el presente proyecto a Dios y principalmente a mis padres, porque sin su apoyo incondicional y su enorme sacrificio, no hubiera sido posible llegar a cumplir la meta de culminar mi carrera universitaria. Valoro todo lo que han hecho por mí, es por eso que todos mis logros son dedicados a ustedes, gracias por ser unos padres ejemplares.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme lograr una de mis más grandes metas como es culminar mi carrera universitaria en Ingeniería Automotriz. A mis padres, Ángel Beltrán y Aurora Zamora, los cuales siempre me ha llenado de su amor incondicional y me han inculcado grandes valores y principios para sobrellevar todas las dificultades que se me presentan en todos los ámbitos de mi vida. También quiero agradecer a mi querida Universidad Internacional del Ecuador, a sus Docentes y Autoridades, los cuales demuestran con orgullo la pasión que llevan por la carrera de Ingeniería Automotriz.

Índice General

Certificado	iii
Certificado Y Acuerdo De Confidencialidad	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Ecuaciones	xvi
Índice de Tablas	xvii
Resumen	xviii
Abstract	xix
Capítulo I.....	1
Problema De La Investigación.....	1
1.1. Tema de Investigación	1
1.2. Planteamiento del Problema.....	1
1.3. Formulación del Problema	2
1.4. Sistematización del Problema	3
1.5. Objetivos de la Investigación	3

1.5.1. Objetivo General.....	3
1.5.2. Objetivos Específicos	3
1.6. Justificación e Importancia de la Investigación	4
1.6.1. Justificación Teórica.....	4
1.6.2. Justificación Metodológica.....	4
1.6.3. Justificación Práctica	6
1.6.4. Delimitación Temporal.....	6
1.6.5. Delimitación Geográfica.....	6
1.6.6. Delimitación del Contenido.....	7
1.7. Hipótesis.....	8
1.7.1. Variables de Hipótesis	8
1.7.1.1. Variables Independientes.	8
1.7.1.2. Variables Dependientes.....	8
1.8. Alcance.....	8
Capítulo II	10
2. Marco De Referencia	10
2.1. Introducción	10
2.2. Optimización	11
2.3. Tipos de Optimización Estructural.....	12
2.3.1. Optimización de Tamaño.....	13

2.3.2.	Optimización de Forma	13
2.3.3.	Optimización Topológica	13
2.4.	Antecedentes de Optimización Topológica.....	18
2.5.	Topología de Optimización de Elementos Estructurales	21
2.6.	Magnitudes del Diseño con Aplicación de Optimización Topológica.....	22
2.6.1.	Parámetros del Problema	22
2.6.2.	Variables del Problema.....	23
2.7.	Problema Elástico por el Método de los Elementos Finitos.....	23
2.8.	Conceptualización en Métodos de Optimización Topológica.....	24
2.8.1.	Dominio Extendido Fijo del Diseño.....	24
2.8.2.	Método de Material o Densidades	24
2.9.	Biela de Motor de Combustión Interna	24
2.10.	Procesos de Comprobación de Bielas.....	28
2.10.1.	Control de Peso.....	28
2.10.2.	Control de Diámetro Interior de Cabeza de Biela.....	29
2.10.3.	Control de Diámetro Interior de Pie de Biela	29
2.10.4.	Control de Alineación de Biela.....	30
2.11.	Fallas que Puede Presentar una Biela	31
2.11.1.	Rotura de Biela por Fuerzas Excesivas.....	31
2.11.2.	Rotura de Biela por Lubricación Inadecuada.....	31

2.11.3.	Análisis de Fallas Provocadas Sobre una Biela	32
2.12.	Fuerzas que Actúan Sobre una Biela.....	34
2.13.	Materiales	36
2.13.1.	Acero al Carbono	37
2.13.2.	Acero Templado.....	38
2.13.3.	Fundición Nodular o Dúctil	39
2.13.4.	Aluminio	40
2.13.5.	Titanio.....	41
2.13.6.	Acero AISI 1060.....	42
2.13.7.	Acero AISI 4140.....	42
2.14.	Resistencia a la tensión (S_u).....	43
2.15.	Resistencia a la fluencia (S_y).....	43
2.16.	Límite elástico	44
2.17.	Módulo de elasticidad o de Young.....	44
2.18.	Ductilidad y porcentaje de elongación	44
2.19.	Relación de Poisson.....	46
2.20.	Dureza.....	46
2.21.	Maquinabilidad.....	47
2.22.	Tenacidad.....	47
2.23.	Resistencia a la fatiga	47

2.24.	Densidad (ρ)	48
2.25.	Método de elementos Finitos (MEF).....	48
2.26.	Trabajos sobre la biela.....	49
Capítulo III.....		51
3.	Método	51
3.1.	Tipo de investigación.....	51
3.2.	Método empírico – analítico	52
3.3.	Metodología	53
3.4.	Proceso de optimización.....	54
3.5.	Medios.....	68
3.6.	Primeros Resultados.....	69
Capítulo IV		74
4.	Análisis de Resultados	74
Conclusiones.....		79
Recomendaciones.....		80
Bibliografía.....		81
Anexos.....		83
Anexo 1: Plano con Forma y Dimensión de Biela de Motor Mazda BT-50		83

Anexo 2: Informe Completo Análisis Estructural Biela Original 84

Anexo 3: Informe Completo Análisis Estructural de Rediseño de Biela..... 96

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Delimitación geográfica de la investigación</i>	7
Figura 2 <i>Solución de optimización topológica de elemento mecánico</i>	11
Figura 3 <i>Tipos de optimización estructural</i>	14
Figura 4 <i>Aplicación de OT en fabricación de alas para aviones</i>	20
Figura 5 <i>Descripción de nodo en mallado estructural</i>	23
Figura 6 <i>Biela de motor de combustión</i>	25
Figura 7 <i>Movimientos que actúan sobre la biela</i>	25
Figura 8 <i>Biela y sus partes</i>	26
Figura 9 <i>Tipos de secciones transversales de brazos de biela</i>	27
Figura 10 <i>Proceso de pesaje de biela</i>	28
Figura 11 <i>Control de diámetro de cabeza de biela</i>	29
Figura 12 <i>Control de diámetro de pie de biela</i>	30
Figura 13 <i>Control de alineación de biela</i>	30
Figura 14 <i>Rotura de biela a causa de fuerzas excesivas</i>	31
Figura 15 <i>Fuerzas que actúan sobre la biela</i>	34
Figura 16 <i>Instalación de bielas en un motor de combustión interna</i>	36
Figura 17 <i>Elementos de conexión a los extremos de la biela</i>	37
Figura 18 <i>Acero al carbono</i>	38
Figura 19 <i>Microestructura de un acero templado</i>	39
Figura 20 <i>Microestructura de fundición nodular</i>	40
Figura 21 <i>Características físicas del aluminio</i>	40
Figura 22 <i>Características físicas del titanio</i>	41

Figura 23 <i>Lingotes de Acero AISI 1060</i>	42
Figura 24 <i>Lingotes de Acero AISI 4140</i>	43
Figura 25 <i>Comportamiento de elongación</i>	45
Figura 26 <i>Solución por MEF de una biela</i>	49
Figura 27 <i>Biela del motor Mazda BT-50</i>	51
Figura 28 <i>Biblioteca para designación de materiales Inventor</i>	54
Figura 29 <i>Inventor, selección de nueva pieza y sistema de unidades</i>	55
Figura 30 <i>Inventor, selección de plano de coordenadas</i>	56
Figura 31 <i>Inventor, boceto de brazo de biela en 2D</i>	56
Figura 32 <i>Inventor, boceto de brazo con inicio de extrusión 3D</i>	57
Figura 33 <i>Inventor, modelado sobre plano inicial para brazo de biela en 3D</i>	57
Figura 34 <i>Inventor, modelado sobre planos adicionales en 3D</i>	58
Figura 35 <i>Inventor, generación de detalles de empalmes en brazo de biela 3D</i>	58
Figura 36 <i>Inventor, finalización de brazo de biela 3D</i>	59
Figura 37 <i>Inventor, finalización de bancada de biela 3D</i>	59
Figura 38 <i>Inventor, finalización de tornillería de biela 3D</i>	60
Figura 39 <i>Inventor, ensamble de biela 3D</i>	60
Figura 40 <i>Inventor, creación de análisis de tensión de biela</i>	61
Figura 41 <i>Inventor, creación de nuevo estudio</i>	62
Figura 42 <i>Inventor, restricción por pasador y por fricción</i>	63
Figura 43 <i>Inventor, aplicación de la fuerza de presión sobre la biela</i>	66
Figura 44 <i>Inventor, generación de vista de malla sobre la biela</i>	67
Figura 45 <i>Inventor, esfuerzo máximo de biela antes de la optimización</i>	67

Figura 46 <i>Inventor, generación de nueva forma en biela</i>	68
Figura 47 <i>Inventor, conservación de regiones en biela</i>	69
Figura 48 <i>Inventor, ejecución de forma por optimización topológica</i>	70
Figura 49 <i>Inventor, resultado de optimización topológica de la biela</i>	70
Figura 50 <i>Inventor, sobreposición de geometría primitiva</i>	71
Figura 50 <i>Inventor, generación de nueva geometría de biela</i>	71
Figura 52 <i>Inventor, rediseño de biela</i>	72
Figura 53 <i>Inventor, mallado del rediseño de biela</i>	72
Figura 53 <i>Inventor, resultados del análisis de tensión de biela</i>	73
Figura 55 <i>Inventor, comparativa tensión de Von Mises</i>	77
Figura 56 <i>Inventor, comparativa de desplazamiento por carga máxima</i>	77
Figura 57 <i>Inventor, comparativa de coeficiente de seguridad</i>	78

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Cilindrada unitaria.....	64
Ecuación 2 Cilindrada total.....	64
Ecuación 3 Volumen de la cámara de compresión	64
Ecuación 4 Volumen total del cilindro	65
Ecuación 5 Área de la sección del pistón.....	65
Ecuación 6 Fuerza que soporta el pistón por explosión.....	65

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparativa de Propiedades Físicas	74
Tabla 2 Resultados generales comparativos de simulaciones.....	76

Resumen

El presente proyecto investigativo se involucra en el campo del área del diseño aplicado a la industria automotriz para lo cual se utiliza un proceso denominado Optimización Topológica que tiene como finalidad hacer a través de un método de elementos finitos que una estructura disminuya su masa, pero conservando todas sus propiedades mecánicas.

Para la aplicación de este tipo de optimización se utiliza el software Inventor, siendo este uno de los programas que contine la biblioteca de Autodesk, el mismo que brinda todas las herramientas para poder alcanzar el objetivo principal del presente estudio.

Por otra parte, este trabajo brinda al investigador el conocimiento de cómo se lleva a cabo esta metodología desde su concepción hasta finalizar con el rediseño del elemento que para el presente estudio se basa en una biela de un motor de combustión interna del vehículo de la marca Mazda BT-50 alimentado con combustible Diésel.

Alcanzando con este tipo de metodología una optimización de masa en un 25,2 % pero conservando todas sus características mecánicas, así como su factor de seguridad a través de su comparación entre la biela original con la propuesta de rediseño, el mismo que supero en un valor de 8 lo que permite la seguridad que el elemento no sufriría ningún tipo de fallo en su estructura cuando es aplicado su mayor carga puntual, la misma que es producida al momento que se genera la fase de trabajo del motor.

Palabras clave: Optimización topológica, diseño, biela, motor, automotriz.

Abstract

This research project is related to the field of design applied in the automotive industry, it uses a process called Topological Optimization and its purpose is to make through a finite element method makes a structure to decrease its mass but conserving all its mechanical properties.

To carry out this type of optimization an Inventor Software is used, it is one of the programs contained in the Autodesk Library, which provides all the tools to achieve the main objective of this study.

On the other hand, this work provides to the researcher the knowledge of how this methodology is carried out since its conception to the end of the redesign of the element, which is going to be used, for this present study a connecting rod of an internal combustion engine of a vehicle brand Mazda BT-50 powered by diesel fuel is used.

Using this type of methodology an optimization of mass of about 25.2% is reached but conserving all its mechanical characteristics, as well as its safety factor through the comparison between the original connecting rod and the redesign proposal , the same that surpassed the value of 8, it proves that the security of the element would not suffer any type of failure in its structure when a greatest punctual load is applied which is produced at the moment that the engine work phase is generated.

Keywords: Topological optimization, design, connecting rod, engine, automotive.

Capítulo I

Problema De La Investigación

1.1. Tema de Investigación

Optimización Topológica Multifase Sobre Diseño Generativo De Biela De Motor De Combustión Interna A Través Del Software Inventor.

1.2. Planteamiento del Problema.

El mundo de la industria automotriz siempre está evolucionando y dentro de ese fundamento los diseñadores buscan insaciablemente obtener sistemas más eficientes, menos complejos, mecanismos con menor cantidad de elementos, piezas con mayor resistencia y alivianadas pero conservando o mejorando su resistencia, durabilidad, menor empleo de recursos y bajo costo de producción, todo esto se resumen en disminución considerable de consumo de combustible y mejoramiento de la maniobrabilidad de sus vehículos.

Uno de los factores con los que viene luchando cada día la industria automotriz desde sus inicios es el peso que poseen sus componentes y disminución de potencia lo que se refleja en la masa suspendida o que contiene cada uno de sus elementos ya sea por el tipo de material o aleaciones con que están elaborados. Existen otros factores que influyen como lo es el caso de los esfuerzos estáticos y dinámicos a los que un vehículo está inducido constantemente, condiciones de superficie por donde se desplaza, factores climáticos, entre otros.

Uno de los componentes más importantes del vehículo por no decir el principal es el motor que es en su gran mayoría del parque automotor del planeta, es el motor de combustión interna, el mismo que con el pasar de los años también ha cumplido la misma evolución que el de los vehículos, por ese motivo en la actualidad se habla de la elaboración y aplicación de motores de combustión interna denominados Menguantes, los mismos que son cada vez más pequeños, con menor cantidad de componentes y generan la misma o mejor eficiencia que los motores tradicionales que se han utilizado con énfasis hasta la actualidad.

Uno de los elementos con los que cuenta un motor de combustión interna es la biela la cual es una parte del conjunto del tren de potencia, la misma que tiene como finalidad de articular los esfuerzos y movimientos que se producen durante su funcionamiento, también cumple la función de transmitir el movimiento y esfuerzos longitudinales entre dos componentes como lo es el bulón y el cigüeñal.

Adicionalmente la biela está sometida a soportar constantemente esfuerzos de compresión y de tracción, pero si el proceso mejora el uso de recursos, esto se traduce en disminución de masa no suspendida dentro del motor, en cambio si se logra reducir considerablemente el peso de este componente sin afectar su conformación estructural ayuda indudablemente en la mejora directa sobre la eficiencia del funcionamiento del mecanismo y por consiguiente del motor.

El presente trabajo investigativo tiene la finalidad de determinar el proceso correcto para optimizar topológicamente por medio de multifases la estructura de una biela de un motor de combustión interna mediante el software Inventor y así poder minimizar la masa no suspendidas sin perder su eficiencia de resistencia estructural o propiedades mecánicas.

Para poder alcanzar este objetivo se planea lo siguiente: identificar las magnitudes de las fuerzas que ejercen sobre la biela a través de revisión bibliográfica que permita minimizar su estructura a la que fue diseñada originalmente, generar una propuesta de rediseño de la biela con optimización de la pieza mediante el uso del software Inventor y evaluar la biela.

Para finalizar la evaluación estructural de la biela se toman los datos obtenidos en un software para después hacer una comparativa y así validar respectivos resultados.

1.3. Formulación del Problema

¿Cómo se presenta una solución a la reducción del peso de una biela utilizada en un motor de combustión interna, manteniendo su misma resistencia estructural a través de la utilización de un software de CAD que genera una optimización de material multicapas por

medio de análisis de elementos finitos y todo lo obtenido sirva como fundamento teórico y práctico para la comunidad investigativa de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador y a la industria automotriz a nivel mundial?

1.4. Sistematización del Problema

- a. ¿Cuáles son los factores que influyen en la optimización de peso de una biela utilizada en un motor de combustión interna a través del uso de un software de CAD?
- b. ¿Qué tan efectivo será el análisis y obtención de datos aplicado a optimización de peso de una biela a través de análisis de elementos finitos por el software Inventor?
- c. ¿De qué manera influye la utilización de softwares para optimización de peso en elementos automotrices y que sirva de base para estudios estructurales al estudiantado de la Universidad Internacional del Ecuador extensión Guayaquil por medio de esta metodología?

1.5. Objetivos de la Investigación

1.5.1. *Objetivo General*

Optimizar topológicamente el peso en una biela original de motor de combustión interna diésel marca Mazda BT-50 con aplicación del software Inventor por medio de análisis de elementos finitos.

1.5.2. *Objetivos Específicos*

- Indagar las especificaciones físicas y características estructurales de la biela del motor Mazda BT-50 a diésel.
- Determinar el proceso idóneo que permita la optimización topológica multifases estructural de una biela de un motor de combustión interna mediante el software Inventor.
- Generar a través de los resultados alcanzados una propuesta de rediseño de la biela con optimización de peso pero que conserve sus límites de seguridad referente a

las propiedades mecánicas de la biela bajo los esfuerzos del motor de combustión interna a las se encuentra sometida en funcionamiento.

1.6. Justificación e Importancia de la Investigación

1.6.1. Justificación Teórica

El presente estudio investigativo pretende aplicar el criterio de optimización topológica multifases, para lo cual las fases del proceso y postproceso se lleva a cabo a través del software Inventor, el mismo que permite determinar en qué secciones se puede rebajar el peso de cualquier elemento sin que sea afectado su resistencia estructural por medio de un análisis de elementos finitos que no es más que la división de cada porción, elemento o dominio geométrico que es fraccionado en subdominios y dependiendo de cada una de las características mecánicas y geométricas con que se encuentran interconectadas cada una de estas partes las cuales componen una relación matemática con los nodos que son los puntos de enlace entre los elementos que conforman el dominio, dando así lugar a la solución de la simulación y de esta manera reducir material, mejorando así su desempeño en el mecanismo que intervenga.

Bajo este criterio se ha tomado en cuenta que el estudio se centra en la biela del motor de la marca Mazda con su modelo BT-50 a diésel siendo este un motor de uno de los vehículos más comerciales en el Ecuador y que es sometido a trabajo severo y esfuerzos generados por las distintas zonas climáticas y características geográficas que tiene el país.

1.6.2. Justificación Metodológica

Según (Meza, Tamayo, & Franco, 2015) afirman que: “La optimización topológica con sus siglas OT aplicada al diseño de elementos estructurales de peso reducido es un método numérico que permite la síntesis de estructuras con valores óptimos de uno o varios de sus parámetros físicos”.

Este inconveniente que suele presentar está en la máxima rigidez con limitación de volumen lo que genera que se debe encontrar la repartición de material sobre un dominio en el

que se concentren los puntos de mayor rigidez, para establecer carga aplicada y así restringir el volumen final del material que se utiliza en la estructura.

El propósito de optimizar el peso de la biela de motor a diésel de Mazda BT-50 realizando la comparación con el elemento original es el de mejorar su eficiencia generando así una propuesta de rediseño y que sirva de un banco de información para en algún momento poder iniciar una fase de construcción y aplicación bajo pruebas físicas de este elemento y mejorar de esta manera el proceso de manufactura por parte de la marca.

Así mismo con la aplicación programación del software Inventor, permite que este proceso pueda ser aplicado a otros componentes que se construyen en la industria automotriz.

En referencia al presente proyecto en estudio se determina que es una investigación del tipo experimental, debido a que se estudia en un todo el problema de manera controlada y así poder obtener importantes valores y resultados para después proceder a su respectivo análisis. En este proyecto se efectúa el análisis directo a la biela del motor diésel de la camioneta Mazda BT-50 de acuerdo a sus especificaciones técnicas y que esos valores son la base para el cálculo en su estudio estático y poder compararlos con los resultados arrojados por el software luego de determinar sus respectivas condiciones de frontera, para luego cumplir con las siguientes fases:

- Caracterización del material
- Cálculo de análisis estático
- Aplicación del proceso CAD de la biela
- Simulación a través de software Inventor
- Análisis de elementos finitos
- Obtención de resultados

1.6.3. *Justificación Práctica*

El presente estudio referente a la optimización topológica de peso en una biela de motor de la marca Mazda BT-50 a través de un análisis de elementos finitos por medio del software Inventor, se lo realiza con el fin de conocer el proceso respectivo que permite modelar y determinar a través de los valores obtenidos en que parte de su cuerpo se pueden perfeccionar su forma estructural por medio de sistemas de ingeniería asistida por ordenador observando su comportamiento y según los datos que se obtienen, en comparación con los originales poder presentar un rediseño de la nueva forma de tal manera que se disminuya el peso y se conserve su resistencia estructural, de esta manera no solo se cumple con el objetivo de la presente investigación si no que se puede continuar en futuras investigaciones aplicando el respectivo proceso y generando la construcción de elementos automotrices y aplicarlo de manera real.

1.6.4. *Delimitación Temporal*

El desarrollo del presente estudio se lo realiza a partir del mes de julio de 2021 y se tiene planificado que se estaría concluyendo en el mes de febrero de 2022, lapso en el que realizará una importante investigación, así como desarrollar los objetivos planteados, siendo el principal obtener los valores que permiten aplicar la optimización topológica multifase del peso de la biela del motor de vehículo Mazda BT-50 y generar una nueva propuesta de reingeniería de al elemento en estudio.

1.6.5. *Delimitación Geográfica*

En cuanto a la limitación geográfica de la presente investigación se lleva a cabo en el Ecuador, provincia del Guayas, cantón Guayaquil dentro de las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador extensión Guayaquil que se encuentra ubicada en la Avenida Las Aguas y 15va., como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Delimitación geográfica de la investigación



1.6.6. Delimitación del Contenido

El presente estudio se lleva a cabo a través de un proceso investigativo detallista y se sustenta por medio de bibliografía, artículos científicos y proyectos investigativos que se han llevado a cabo siendo en su mayoría artículos o estudios científicos que se han realizado en otros establecimientos universitarios y por investigadores del área. Para lo cual el límite del presente proyecto es la obtención de los datos que permitan interpretar la optimización topológica del peso de la biela.

1.7. Hipótesis

La optimización topológica multifases de la biela del motor diésel de la marca Mazda BT-50 a diésel a través del software Inventor por medio de elementos finitos, permitirá reducir significativamente su peso y conservar sus características estructurales mecánicas.

1.7.1. Variables de Hipótesis

1.7.1.1. Variables Independientes.

- Sistema de diseño asistido por ordenador.

1.7.1.2. Variables Dependientes.

- Biela de motor Mazda Mazda BT-50 a diésel
- Manejo de Software
- Modelos matemáticos.

1.8. Alcance

El alcance que pretende el presente proyecto investigativo con el nombre de: Optimización topológica multifase sobre diseño generativo de biela de motor de combustión interna a través del software Inventor, es llevado a cabo por parte del autor de la investigación y el grupo de docentes del área de diseño de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador extensión Guayaquil y su alcance está fundamentado por la logística a través de tres fases, las mismas que se dividen de la siguiente manera: la fase inicial consiste en la recopilación de información técnica correspondiente a la biela del motor de combustión interna de la marca Mazda, modelo BT-50, con alimentación de combustible diésel, como segunda fase se contempla el seleccionar correctamente la metodología que permita el dibujo, renderizado y simulación a través del software Inventor, el cual permitirá lograr uno de los objetivos más importantes planteados en el presente estudio y la tercera fase corresponde en el manejo del software Inventor Profesional para así poder rediseñar el

modelado de la biela, lo que admitirá el análisis de los resultados y obtención de la nueva propuesta de optimización topológica de la biela en estudio.

Capítulo II

Marco De Referencia

2.1. Introducción

La optimización topológica conocida con sus siglas OT en el campo de la ingeniería y según definición de: “Una técnica englobada dentro del campo del análisis estructural, basándose en el análisis mecánico de un componente o estructura, siendo su principal objetivo aligerar el peso del componente, pero manteniendo las funcionalidades mecánicas del componente” (Román, 2018).

El concepto de optimización topológica y su aplicación se ha considerado de suma importancia en el campo de la industria automotriz, así como componentes que conforman un vehículo, pero con la ayuda de este procedimiento se logra disminuir el peso de la estructura o de un elemento y todo esto se traduce en disminución de consumo de recursos, mejoramiento de la maniobrabilidad del mecanismo que se encuentre influenciado y aumento significativo de su eficiencia del sistema.

Lo que representa de manera positiva del procedimiento de aplicar una correcta optimización topológica es la de disminuir la masa suspendida del elemento o mecanismo sin que este disminuya o pierda sus propiedades de resistencia estructural.

Para el caso de presente estudio investigativo el elemento a ser analizado es una biela del motor diésel con su marca Mazda el mismo que cumple la función principal de transmitir toda la presión generada por la combustión de gases los mismos que la ejercen sobre la cabeza del pistón directamente para luego ser transmitida al bulón, siendo la biela el nexo directo entre el bulón y el cigüeñal.

Además de transmitir de manera mecánica esta presión la biela también cumple otra función y es la de transformar el movimiento lineal alternativo que se genera en la parte superior

del mecanismo a un movimiento rotativo uniforme en la parte inferior donde se encuentra el cigüeñal del motor.

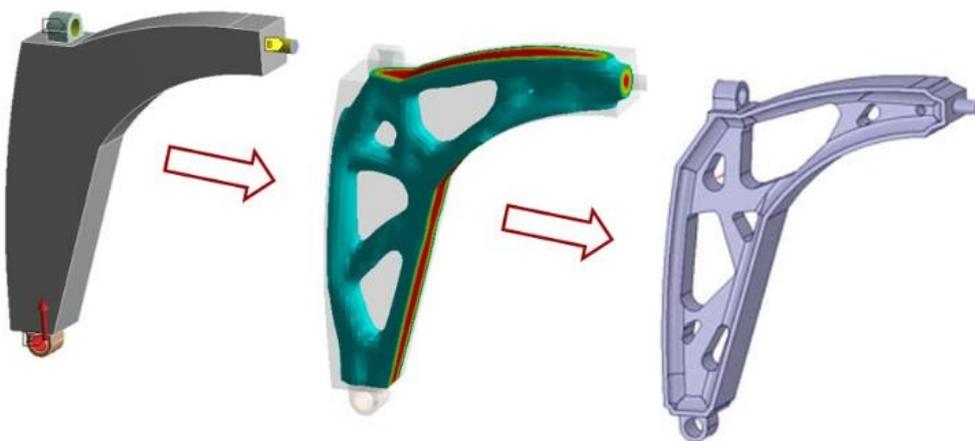
Bajo todo lo expuesto en los párrafos anteriores se determina que en el transcurso del tiempo la industria automotriz por medio de la disminución de masa en los componentes y sin perder características mecánicas ha alcanzado un mejor rendimiento y eficiencia en vehículos, pero teniendo en cuenta que en la actualidad con la ayuda de los softwares de diseño este trabajo es realizado en un corto tiempo y con un ahorro significativo de recursos.

2.2. Optimización

Para conceptualizar el término optimización algunos autores lo determinan como el lograr la mejor solución posible a un problema proyectado o planteado, pero tomando muy en cuenta que esta solución no es la de encontrar la mejor solución de un problema sino más bien encontrar la solución óptima, como se puede observar en la figura 2, en la que se representa en elemento mecánico que a través de una optimización topológica se logra dar una solución que es la de liberar masa y obtener una solución en la que no se pierde sus características mecánicas de manera correcta.

Figura 2

Solución de optimización topológica de elemento mecánico



En el campo de la formación profesional de ingeniería y más aún dentro de la vida laboral lo que se pretende siempre es dar la mejor solución a un sinnúmero de problemas, cuando sobre este se pueden presentar algunas posibles soluciones pero esto no quiere decir que de este conjunto de soluciones no todas son las que poseen un menor costo y tomando en cuenta que este es un factor importante al momento de diseñar o rediseñar un elemento, además que este brinde las mejores funciones posibles en un largo tiempo de vida y que se encuentre trabajando de manera eficiente.

Se debe tomar muy en cuenta que en terminología y conceptualización no es lo mismo el uso de los términos optimización con el de eficiencia ya que la optimización se enfoca en el mejoramiento de un elemento o mecanismo hasta tal punto que se vuelve imposible seguir mejorándolo, aclarando que dentro del mismo alcance ninguno de sus factores se puede salir de sus objetivos como por ejemplo que por continuar mejorando un elemento cada vez más este se aleja de objetivo de ser rentable, entrando de esta manera a un juego con el termino de eficiencia, que afecta las mejoras logradas hasta un punto de costo, las mismas que influyen en factores como dinero, esfuerzo y tiempo. Por tal motivo una mejora va hacer eficiente siempre y cuando el costo de esa mejora será menor a la obtenida inicialmente.

Por este motivo la optimización estructural en las distintas áreas de la industria automotriz se encuentra en constante evolución y de esta manera se convierte en una herramienta que se la emplea cada día más para el diseño de cada componente, mecanismo y sistema del vehículo.

2.3. Tipos de Optimización Estructural

Dentro del área de la ingeniería industrial existen tres tipos de optimización estructural bien definidos según estudios y autores de bibliografía especializada como se describe a continuación:

2.3.1. Optimización de Tamaño

Por medio de la optimización estructural en el campo de la industria este pretende de determinar las dimensiones óptimas de cada uno de los elementos que forman un mecanismo estructural con una forma predefinida como lo son: espesores de placas, secciones de barras, etc., siendo este el inconveniente más sencillo por el motivo que el número de variables en el problema es limitado y de esta manera discretiza una estructura preestablecida con elementos de barras articuladas logrando de esta manera hallar las dimensiones óptimas de la estructura como se muestra en la figura 3(a).

2.3.2. Optimización de Forma

Según (Lozano, Velázquez, & Zepeda, 2010) establece que: “Se busca integrar y desarrollar metodologías que encuentren nuevos diseños, basados en la modificación de forma, cumpliendo criterios como: menor concentración de esfuerzos, vibraciones mecánicas, temperatura, reducción de peso, factor de seguridad y se fabrique con menor cantidad de material”

A través de la optimización de forma se logra encontrar la forma recomendable de una estructura, pero de topología fija, siendo parte de una forma predefinida y modificando así sus contornos interiores y exteriores con los que se define la estructura, como se muestra en la figura 3 (b).

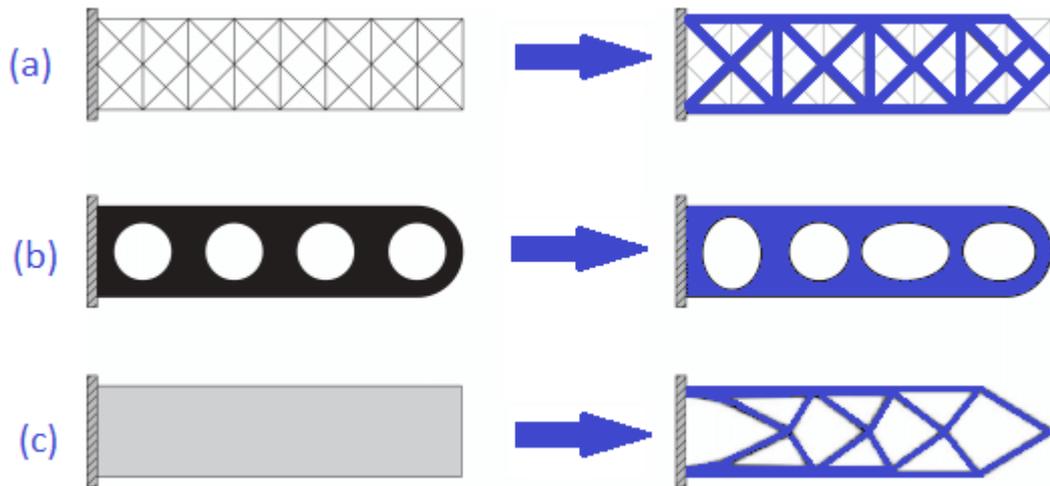
2.3.3. Optimización Topológica

Este tipo de optimización dentro del diseño estructural está basado con el objetivo de la distribución óptima en lo concerniente a la masa del material de una estructura, siendo comparable entre la masa del dominio inicial y en función de algunas especificaciones como: cargas a las que la estructura se encuentra sometida y apoyos fijos, estableciendo de esta manera una óptima distribución de material lo mismo que permite soportar algunas cargas de tal

manera que las deformaciones sean mínimas al igual que sus esfuerzos, como se puede observar en la figura 3 (c).

Figura 3

Tipos de optimización estructural



En lo concerniente al diseño en la industria automotriz esta es aplicada en la elaboración de componentes automotrices a través de sistemas de diseño asistidos por ordenador con sus siglas CAD e integrando de manera directa el análisis de elementos finitos, logrando de esta manera mejorar de debido proceso de diseño para así obtener significativamente soluciones óptimas, con un peso aligerado, pero sin ofrendar la eficiencia y eficacia. Se debe considerar un aspecto muy importante y es que a través de este proceso de optimización de la estructura del componente esta se modifica, pero la topología de mantiene constante.

Actualmente se utilizan softwares de ingeniería asistida por ordenador con sus siglas CAE que cuentan con recursos que permiten generar topología de optimización y así integrar el proceso del desarrollo del producto.

Para el diseño de autopartes de un vehículo se establecen distintos enfoques, los mismos que pueden ser iniciados a través de un análisis del material que este dispone, la geometría que utiliza y las cargas a las que se encuentra sometido.

Siendo uno de los criterios más importantes el material que se utiliza durante su proceso de diseño, lo que permite que se tenga en cuenta este factor como uno de los más determinantes y así poder seleccionar el o los materiales que pueden ser utilizados para la construcción del elemento, pero teniendo en consideración aspectos comerciales como lo es la facilidad en adquirirlos en el mercado y su costo considerable tanto de manera local o de exportación.

La forma de un elemento o autoparte se encuentra determinada principalmente por las cargas a las que esta está sometida, así como su espesor. En cuanto al diseño y forma de la biela del motor se toman en cuenta algunos modelos matemáticos que permiten con sus resultados evaluar las respectivas cargas que influyen sobre este elemento durante su funcionamiento y teniendo en cuenta factores importantes como esfuerzos de carga, centro de gravedad y su masa.

Una de las limitantes para el diseño es el espacio donde debe ir colocado, así como su consideración de montaje y desmontaje en caso de armado o reparabilidad, esto limita considerablemente el tamaño y su respectiva forma.

Aquí cabe mencionar que dentro del diseño automotriz de cada uno de los componentes es el de tomar muy en cuenta la factibilidad del proceso de manufacturación para la cual existen algunos tipos de metodologías.

Una de estas metodologías es la optimización a través de software que permite aplicar un conjunto de modelos matemáticos que consienten en disminuir a través de simulación la masa del elemento a ser construido, para luego aplicar un mallado de acuerdo al tipo de elemento y programa que admita determinar las operaciones respectivas logrando de esa manera el análisis y simulación del mismo.

La ayuda que brinda la topología de optimización ambientalmente es muy importante a nivel industrial por el motivo que se desarrollan a través de este método componentes eficientes minimizando de esta manera la contaminación, también se disminuye significativamente el

consumo de energía en fases de construcción y sobre todo al momento que la autoparte se encuentre dentro de su aplicación o funcionamiento.

En lo correspondiente a las variables en el campo del diseño esta permite seleccionarlas, también fijar una función de manera que sea un objetivo a optimizar, pero siempre tomando en cuenta algunas de sus restricciones.

Se debe tener en consideración que, al ejecutar una simulación a través de un método de elementos finitos, este puede ser tomado en cuenta como un modelo de ingreso, rendimiento y solución, para una optimización, donde el resultado va a depender de las condiciones de todo su entorno, así como el porcentaje de su rendimiento volumétrico.

En lo concerniente a los datos que se obtienen de un análisis lineal estáticos estos deben ser obtenidos correctamente, agregando los esfuerzos máximos permisibles en condiciones de carga estática, así como indicar el peso en cada condición de carga única en aplicación de este tipo de metodología de optimización las mismas que serán las condiciones de carga múltiple. Cabe recalcar que dentro del diseño pueden ser aplicadas otros tipos de cargas, pero éstas deben ser tomadas como referencia las condiciones extremas como por ejemplo longitudes máximas o aceleraciones laterales máximas.

Para poder llevar a cabo una correcta optimización topológica de un elemento estructural es muy necesario la selección y elección de un correcto software que permita generar la simulación de manera específica para lo cual dependerá de algunas características como lo son la versatilidad al momento de utilizarlo, el proceso a ser utilizado y del tipo de producto a ser aplicado.

Actualmente se ha mostrado significativamente el aumento de la utilización de estos tipos de software que permiten generar procesos de simulación para maquinados, tipos de diseños, análisis de cada uno de sus componentes y sobre todo poder generar topología de optimización de una manera amigable con el medio ambiente, por el cual se disminuye

significativamente la utilización de material así como manipular otros tipos de materiales sobre todo compuestos que de igual forma son amigables con el medio ambiente y sin duda alguna a través de este proceso de optimización topológica se permite realizar un análisis de tiempos de producción y sobre todo costos.

Cabe recalcar que una correcta aplicación de una optimización topológica permite encontrar nuevas soluciones a problemas complejos en el ámbito del diseño y producción, así como mejorar procesos de calidad y seguridad.

En resumen, este método de optimización topológica es un conjunto de modelos matemáticos que permite perfeccionar el diseño del material dentro de un espacio definido, sobre el cual se ejerce un conjunto significativo de cargas, las mismas que se encuentran condicionadas por su entorno y restricciones por las que se maximizan su rendimiento dentro de un sistema. Cabe aclarar que la optimización topológica es muy diferente a otros tipos de optimizaciones como lo son las de tamaño y de forma.

Para la evaluación del desempeño de un diseño la optimización topológica utiliza una formulación convencional a través de elementos finitos y de esta manera se optimiza por medio de técnicas de programación matemática fundamentada en gradientes, algoritmos genéticos, algoritmos de criterio de optimalidad y método de asíntotas.

De esta manera la optimización topológica posee una gama amplia de aplicaciones en campos como: ingeniería civil, bioquímica, mecánica y aeroespacial, siendo la conceptualización de optimización topológica parte fundamental para los ingenieros que han adoptado este proceso principalmente, por motivos que les permite trabajar con formas libres que influyen en su construcción de manera natural, aunque se pueden presentar por esta atribución ciertas complicaciones al fabricar, por este motivo la optimización topológica se debe ajustar al modo de fabricación y manufacturación, todo esto se logra generar un alto

campo de investigación que se encuentra de manera activa, por este motivo es que la optimización topológica es parte fundamental del diseño para la fabricación aditiva.

2.4. Antecedentes de Optimización Topológica

En las últimas décadas el uso de la herramienta de optimización topológica se afianzó de manera creciente en el campo de la investigación, enlazando de esta manera algunas ciencias como son la matemática, ciencias computacionales y la mecánica, teniendo así significativas aplicaciones prácticas en algunas áreas industriales como la industria automotriz, aeroespacial, ingeniería civil, etc. También posee una elevada importancia en el área de la microtecnología, sobre todo en el diseño y fabricación de mecanismos flexibles.

La optimización topológica por medio de un software permite resolver de manera eficiente un problema numéricamente, a través de algoritmos iterativos que minimizan una determinada función como objetivo.

Las primeras aplicaciones sobre el uso de optimización topológica se dieron con el diseño de elementos estructurales los mismos que se encontraban sometidos a esfuerzos o cargas puntuales pretendiendo que se proporcione apoyos como restricción y máxima rigidez ante las cargas.

Dentro de la ingeniería mecánica existen algunas aplicaciones que permiten generar optimizaciones topológicas como, por ejemplo: diseño de perfiles de alas de aviones, hélices de helicópteros, comportamiento en la dinámica de fluidos, intercambiadores de calor, diseño de metamateriales, sistemas microelectromecánicos, mecanismos flexibles, etc.

En lo concerniente a fabricación de piezas mecánicas de manera industrializada muchas fábricas lo realizan en las distintas áreas industriales como lo son: obra civil, aeroespacial o la naval que son industrias en las que se requieren significativamente que cada uno de sus diseños de elementos sean en lo posible de menor peso, pero con la mejor resistencia mecánica

estructural para así lograr la mejor resistencia a los esfuerzos a la que estarán sometidos cada uno de sus componentes.

Uno de los criterios que más utiliza un diseñador es el de reducir el peso de un elemento, eliminando material, pero comprobando de manera estricta a través de ensayos de resistencia mecánica que el resultado del elemento cumpla con los objetivos planteados para su funcionalidad.

Dentro de los registros históricos se ha definido por algunos autores que se inició aplicando este método por el año 1904, siendo su aplicación sobre barras estructurales en las que se redujo su peso en su mecanismo, de esta manera se dio un giro en lo concerniente a la inclusión de programas computacionales para los años sesenta, dando de esta manera un adelanto tecnológico en cuanto a procesos interactivos para la resolución de problemas.

Para los años setentas ingresan al mundo industrial las computadoras digitales, por lo que se consagró de manera importante el concepto y aplicación de optimización topológica, obteniendo de esta manera ventajas significativas al utilizar en el proceso de optimización los métodos numéricos.

Además de lo indicado de manera cronológica esta evolución no cabe duda que existen otros métodos que en los últimos años se han creado de manera paralela y entre estos tenemos los siguientes:

- Criterio de oportunidad (OC)
- Método de las asíntotas móviles (MMA)
- Programación lineal secuencial (PLS)

De acuerdo a otros estudios cronológicos de Optimización Topológica no es más que un método que se deriva de las matemáticas y luego de ser claramente explicado su definición, se lo aplicó en el área de la industria mecánica aproximadamente a partir del año 2000.

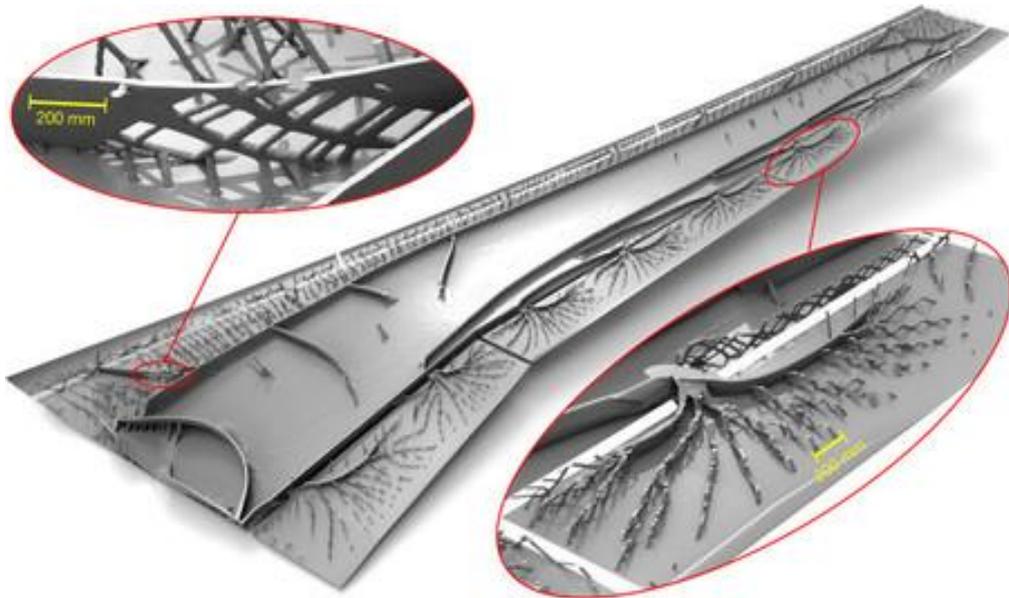
Este avance tecnológico a través de softwares de optimización topológica cada día se ha venido mejorando paulatinamente y esto se refleja en la utilización constante en los ingenieros de diseño y les da una ventaja de poder guardar el material del elemento mientras mejoran o mantienen su flexibilidad o fuerza en caso de ser necesario, teniendo muy en cuenta algunas de las restricciones que son aplicadas sobre el elemento en estudio.

Antes que se implemente la optimización topológica los métodos que se aplicaban eran en base a intuición, siendo esto más por métodos pruebas y error, así como el criterio intuitivo del diseñador o los ingenieros encargados del proceso de manufactura.

Cabe indicar que la aplicación de este método de optimización topológica desde que se empezó a aplicarlo fue solo a elementos de dimensiones pequeñas, pero a partir del año 2017 se realizó las primeras aplicaciones a elementos de grandes como por ejemplo en el área de la industria de la maquinaria pesada del ejército, así como en diseño de aviones comerciales, como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Aplicación de OT en fabricación de alas para aviones



2.5. Topología de Optimización de Elementos Estructurales

Dentro del diseño de un elemento en el que se considera de manera primordial la optimización topológica a través de un medio continuo, lo que se intenta obtener no es más que la óptima distribución de la estructura, en los que por medio de una discretización del dominio y con la ayuda de la aplicación de elementos finitos se logra que cada uno de los elementos en estudio son representados por divisiones de materiales con aplicación de una correcta optimización topológica estructural.

Dentro del estudio de la optimización topológica de estructuras discretas se puede definir que es un método que se sustenta a partir de un dominio para luego este proceder a subdividirlo en dos categorías que son:

- Optimización topológica de estructura discreta.
- Optimización topológica de estructuras de malla continua.

En lo concerniente a la optimización topológica de estructura discreta, esta suele tomar en cuenta un dominio en los que se presentan varios puntos distribuidos y a su vez los resultados son obtenidos de manera óptima por medio de soluciones matemáticas.

En cambio, que la optimización topológica de malla continúa, se toma muy en cuenta el dominio continuo de la estructura discretizada a través de un grupo muy grande y cuya junta óptima es obtenida de manera analítica y a través de la teoría de la elasticidad.

Para la implementación de procedimientos de optimización topológica en diseños estructurales se debe proceder a seguir los siguientes pasos los mismos que permitirán desarrollar un análisis por optimización topológica y estos son:

- Proceder a la definición de un dominio inicial que sea lo más grande posible para de esta manera lograr garantizar que no se vayan a presentar limitaciones, esto se debe a que si se toma en cuenta un dominio pequeño lo que se logra es que se reduzca el espacio de las soluciones. Por este motivo es que el dominio inicial se

relaciona intrínsecamente con el tipo y la aplicación de las condiciones de carga, sumándole a esto las restricciones generadas por las condiciones de contorno.

- Luego se procede a la discretización del dominio a través de elementos finitos.
- Posteriormente se procede a implementar el algoritmo de optimización topológica. El cual procederá a realizar el análisis del dominio de manera interactiva calculando las tensiones mecánicas por medio de elementos finitos, distribuyendo y así procediendo a eliminar material de la estructura del elemento en estudio y de esta manera lograr obtener como resultado una óptima redistribución del material en su respectivo espacio.
- Se procede a interpretar los resultados obtenidos, en los que se procede a eliminar las secciones con problemas que por su proceso generan los algoritmos, como las denominadas escalas de grises e inseguridades tipo de ajedrez.
- Posteriormente se procede a verificar los resultados que se obtienen a través de un software o programa que aplique elementos finitos para finalmente proceder a la fabricación de la estructura del componente mecánico.

2.6. Magnitudes del Diseño con Aplicación de Optimización Topológica

Dentro del diseño de un elemento se utilizan ciertas magnitudes que se relacionan con propiedades de directamente influyen durante el proceso del desarrollo de la optimización topológica de las cuales un grupo de estas permanecen fijas y otras son las que pueden ser variadas o modificadas, clasificándose de la siguiente forma:

2.6.1. *Parámetros del Problema*

Estos parámetros no son más que las magnitudes en las que durante el desarrollo del proceso de optimización topológica no podrán ser modificadas en su valor durante todo el proceso de diseño y sus valores se encuentran condicionados a factores externos del problema.

2.6.2. Variables del Problema

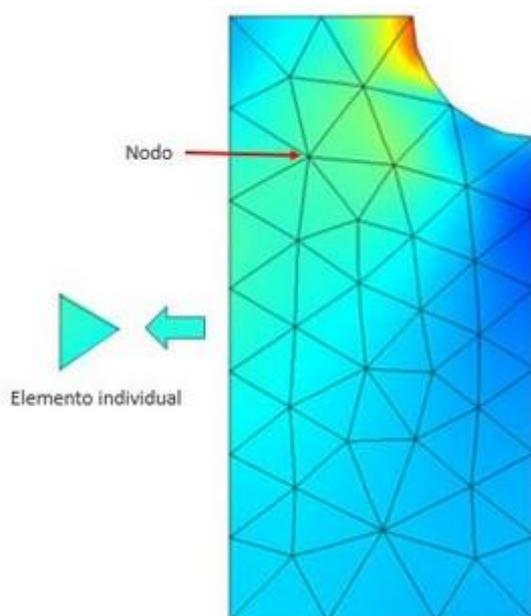
Estos son los valores que pueden variar de acuerdo al avance del proceso de diseño y se los clasifica en cuatro grupos como lo son:

- Propiedades constructivas. - Este grupo viene dado por: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidad, etc.
- Topología del elemento estructural mecánico: perímetro total, densidad del material, etc.
- Geometría del elemento estructural mecánico: radios de entalle, altura, espesor, longitud, etc.
- Propiedades de la sección del elemento estructural mecánico: momento de torsión, momento de inercia, área, etc.

2.7. Problema Elástico por el Método de los Elementos Finitos

Figura 5

Descripción de nodo en mallado estructural



Para proceder a desarrollar y aplicar el método de discretización por elementos finitos sobre un dominio en elementos finitos o subdominios y que estos se encuentren interconectados a través de nodos para que así formen una malla como se puede observar en la figura 5, se debe

lograr obtener una solución aunque se generen en el proceso algunos problemas complejos provocados por ecuaciones diferenciales parciales los cuales a través de este método se reducen a una solución simultánea para cada uno de los elementos finitos, los mismos que en forma conjunta nos conlleva a obtener un sistema de ecuaciones lineales, las mismas que al introducirles al software se logran sus respectivas soluciones.

2.8. Conceptualización en Métodos de Optimización Topológica

La fundamentación que se genera en el método de optimización topológica se basa en dos conceptos como lo son: “el dominio extendido fijo del diseño y el modelo del material” (Meza C. , 2012),

2.8.1. Dominio Extendido Fijo del Diseño

Cuando se trata de diseño se conoce a un dominio extendido fijo como un espacio donde se puede construir una determinada estructura de un elemento a través de un algoritmo de optimización topológica el cual radica en una forma de dominio con una forma fija donde es contenida una estructura desconocida y a su vez se encuentra restringido por medio de puntos de apoyo estructurales conjuntamente con los puntos donde se aplican las cargas, los mismos que en conjunto forman parte del diseño estructural del elemento.

2.8.2. Método de Material o Densidades

Otro de los conceptos es el método de densidades que no es más que un modelo de material el cual simula una microestructura del elemento en análisis y que a través de modelos matemáticos permite interpretar como un valor de densidad para cada uno de los puntos del dominio, el mismo factor que puede ir variando de 0 a 1

2.9. Biela de Motor de Combustión Interna

Existen algunos autores que presentan definiciones correspondientes a lo que es una biela para lo cual de manera generalizada se puede definirla como: “Elemento mecánico que

sirve como unión entre dos piezas, permitiendo la transformación del movimiento rotativo a lineal o viceversa” (González, 2016), como se puede observar en la figura 6.

Figura 6

Biela de motor de combustión

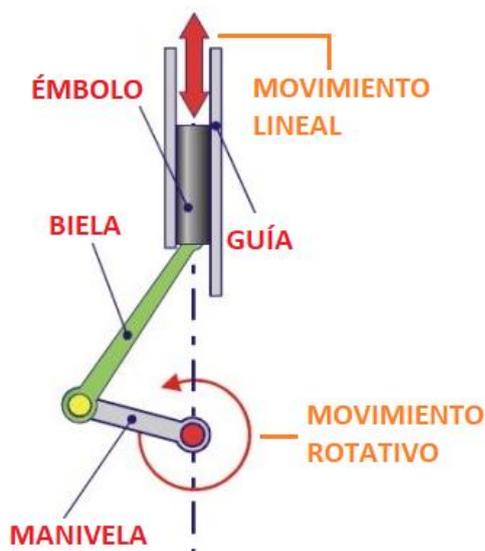


Así mismo una biela es un elemento que su función fundamental es la de soportar cargas que se generan por la combustión interna del motor y que permiten la transformación de movimiento.

Los movimientos a los que se somete una biela de un motor de combustión son rotativo y alternativo, como se muestra en la figura 7, dentro de los puntos críticos mientras que continúa su trayectoria cíclica el resto de puntos poseen una trayectoria que se va componiendo por estos dos, por ende, a este mecanismo se lo conoce con el término biela manivela y en el campo de la mecánica tiene un sinnúmero de aplicaciones.

Figura 7

Movimientos que actúan sobre la biela



Para poder definir las partes fundamentales con que cuenta una biela de un motor de combustión son:

- Pie
- Cuerpo
- Cabeza

En la figura 8, se puede observar las partes fundamentales de la biela de un motor de combustión.

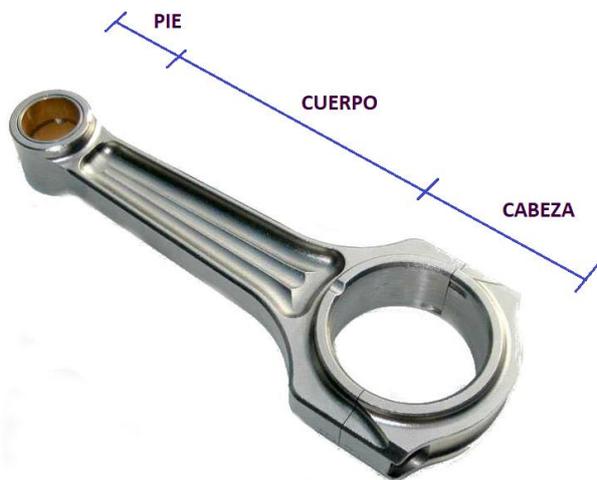
El pie de la biela es la parte que está en contacto con el bulón o pin de pistón el mismo que posee en funcionamiento un movimiento alternativo.

El cuerpo de biela es la parte del elemento que tiene como finalidad de unir tanto al pie como la cabeza así mismo en aspectos de diseño es la parte donde si conformación es tal que debe soportar la mayoría de cargas de compresión y trata que este componente no se deforme, los movimientos a los que este se somete mientras se encuentra operando son los de rotación y traslación.

La cabeza de biela es la parte que tiene como finalidad de conectar a este elemento con las muñequillas del cigüeñal y en su funcionamiento trabaja con un movimiento rotativo.

Figura 8

Biela y sus partes



Dependiendo del tipo de biela y su conformación geométrica pueden poseer otros elementos que trabajan conjuntamente o hacer ver a la biela como un conjunto de elementos los mismos que pueden ser:

- Tornillería de unión de biela y bancada
- Bancada de biela
- Cojinete de pie de biela
- Cojinete de cabeza de biela
- Tapones
- Orificios para lubricación
- Salpicador

Todos estos componentes o partes de la biela son de suma importancia dependiendo de su aplicación por ende este se convierte en un elemento de suma importancia e indispensable para el funcionamiento de los motores de combustión interna o aplicación en compresores alternativos. Su diseño se fundamenta en generar la conexión entre el cigüeñal y el conjunto de bulón con pistón, mecánicamente a este tipo de mecanismo se lo denomina biela manivela.

Un factor de diseño muy importante se basa en la conformación de la sección transversal del brazo de biela en lo que puede ser de la forma I, + o H, como se muestra en la figura 9.

Figura 9

Tipos de secciones transversales de brazos de biela



En lo concerniente a los materiales con los que se suelen de manera común construir una biela para motores de combustión se encuentran los siguientes:

- Acero
- Aluminio
- Titanio

En lo respecto al proceso de fabricación de bielas dentro del campo en la industria automotriz estos se dan generalmente por forja, función o maquinado.

2.10. Procesos de Comprobación de Bielas

Basándose en algunos de los procesos de diseño de bielas para motores de combustión dentro de la fase de manufactura se han determinado que las comprobaciones que deben llevarse a cabo son las siguientes:

2.10.1. Control de Peso

Este factor es muy importante para el funcionamiento con el conjunto de todas las bielas en funcionamiento que lleva un motor por el motivo que se requiere que exista un correcto equilibrio y por ende todas las bielas deben poseer el mismo peso y con su respectiva tolerancia, este procedimiento se muestra en la figura 10.

Figura 10

Proceso de pesaje de biela

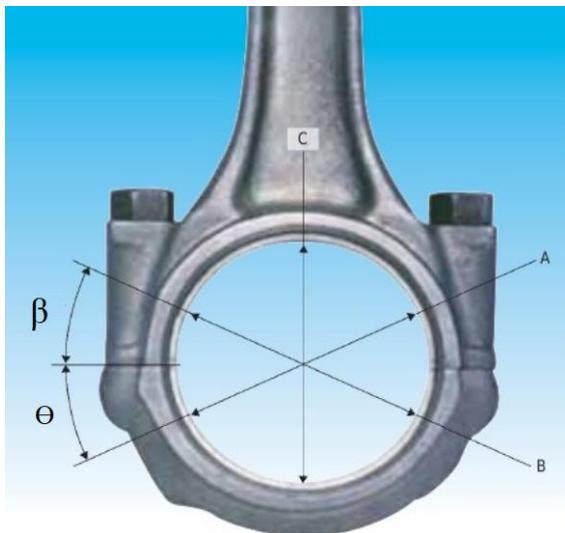


2.10.2. Control de Diámetro Interior de Cabeza de Biela

Este proceso permite determinar el diámetro con que cuenta la parte interior de la cabeza de biela como se muestra en la figura 11, ya que en conjunto con el cojinete se debe dejar un espacio determinado de apriete y respetando las especificaciones del fabricante con el fin de poder obtener la correcta luz de aceite para cuando entre en funcionamiento, ya que si este juego no es el correcto el elemento va a generar cargas en distintos puntos debido a un apriete inadecuado lo que provocará mal funcionamiento del mecanismo y probablemente daños graves en cada uno de los elementos involucrados.

Figura 11

Control de diámetro de cabeza de biela



2.10.3. Control de Diámetro Interior de Pie de Biela

Al igual que el procedimiento de control con el diámetro de la cabeza de biela el mismo principio se aplica para el diámetro del pie de biela, como se muestra en la figura 12, ya que en este caso el factor que se debe tener en cuenta es que debe existir o generar una luz de aceite entre la biela y el bulón, lo que determinará un correcto funcionamiento, esta luz viene determinada en las especificaciones emitidas por el fabricante, en caso que no se realice este tipo de control se tendrá daños en el funcionamiento del mecanismo provocando directamente fallas graves en cada uno de sus elementos que se encuentren involucrados.

Figura 12

Control de diámetro de pie de biela



2.10.4. Control de Alineación de Biela

Este control permite verificar que los centros de cada uno de los diámetros del pie y cabeza de biela estén alineados permitiendo de esta manera que el acoplamiento que se generará entre el bulón del pistón con el cigüeñal sea el correcto, pero siempre respetando las especificaciones del fabricante, como se puede observar en la figura 13.

Figura 13

Control de alineación de biela



2.11. Fallas que Puede Presentar una Biela

Pueden existir un sinnúmero de fallas que presenta una biela de un motor de combustión debido a que las causas son diversas, pero entre los factores más importantes por los que se pueden dar están los siguientes:

2.11.1. Rotura de Biela por Fuerzas Excesivas

Esta falla es muy común y se puede presentar normalmente cuando el motor de combustión se encuentra en funcionamiento y dentro de la cámara de combustión se generan cargas o fuerzas de elevadas presiones, así como de distinta intensidad, siendo dirigidas al pistón, bulón y luego a la biela para posteriormente llegar hasta el cigüeñal, como se puede observar en la figura 14.

Figura 14

Rotura de biela a causa de fuerzas excesivas



2.11.2. Rotura de Biela por Lubricación Inadecuada

Otra de las fallas comunes que se pueden generar y que afectan a la biela es la falta o deficiencia de lubricante durante su funcionamiento dentro del motor de combustión interna, lo que provoca que se eleve abruptamente la temperatura por fricción entre los componentes y genere un cambio de las características del material, debilitando de esta manera a su estructura y obteniendo como resultado una rotura del elemento.

2.11.3. Análisis de Fallas Provocadas Sobre una Biela

Para poder determinar este análisis de fallas se pretende tener conocimiento del funcionamiento de cada uno de los sistemas que conforman un motor de combustión interna por el motivo que la falla o deficiencia del funcionamiento de cada uno de estos puede responsabilizar de manera directa o indirecta la falla de una biela, y entre estos daños o indicios por los que puede darse estos inconvenientes están los siguientes:

- Corte por impacto
- Fractura dúctil o quebradiza
- Fractura por fatiga
- Fallas anormales o por manipulación

En lo concerniente a corte por impacto se puede expresar lo siguiente: Esta falla se llega a producir cuando sobre el elemento se presentan cargas o esfuerzos provocados por golpes con otro elemento y para su análisis visual se presenta como una superficie lisa y sedosa, así como abolladuras en las áreas próximas. Para su inspección se recomienda que se realice en un área donde preste condiciones de buena iluminación y para la preparación de la superficie afectada se utilice disolventes de limpieza con características de rápida evaporación.

Otro tipo de análisis es el de fractura dúctil o quebradiza que corresponde a una forma de conducción del operador de manera severa y se puede generar en muy poco tiempo generando deformaciones plásticas y fracturas o cortes de tamaños considerables.

También otro análisis a las fallas está el conocido como fractura por fatiga, que es generada por la concentración de cargas cíclicas que influyen directamente sobre la biela y localización de focos de esfuerzos en sectores puntuales y se debe tomar en cuenta que muchas veces en la zona donde se genera la fractura no se puede ver claramente la deformación plástica.

Por último, se tiene un análisis de fallas denominado como de fallas anormales o por manipulación que consiste en la presencia de fallas de la biela producidos por fallas en el

proceso de maquinado y por ciertas condiciones en el proceso de operaciones anormales o de mala operación por parte de los técnicos, lo que se debe tener en cuenta es que estas condiciones anormales que se presentan de manera común son las siguientes:

- Pernos flojos o rotos. - Cuando un elemento de apriete se encuentra en mal estado o las condiciones de apriete no son las correctas estos lo que hacen es dañar a la biela. En lo correspondiente al apriete de tornillería esta siempre se debe tomar y aplicar los valores referenciales de las especificaciones del fabricante para de esta manera disminuir el que se rompan las bielas o que se deforme.
- Reutilización de elementos defectuosos. - Estas fallas se dan por no respetar los criterios y condiciones del fabricante, esto se debe a que algunos de los componentes cumplen su vida útil y debe darse un cambio por elementos nuevos, pero la deficiencia de no tener una correcta capacitación técnica lleva a cometer errores y entre estas está la de tomar la decisión de reutilizar los componentes que ya cumplieron su periodo de vida.
- Fallas de cojinetes. - Los cojinetes son elementos denominados de sacrificio y esto indica que trabajan para evitar el desgaste del elemento base y de esta manera al desempeño correcto del mecanismo, el inconveniente se genera cuando estos elementos no cumplen su correcto desempeño, provocando de esta manera varios tipos de fallos como: rotura de brazo de biela, ralladura de orificio interior de cabeza de biela u orificio interno de pie de biela.
- Fuerzas externas. - Aquí las bielas suelen doblarse debido a generación de esfuerzos externos sobre ciertas partes del elemento por consecuencia de otros componentes que influyen sobre la biela o por restricción de movimiento generado por el pistón durante su desempeño.

2.12. Fuerzas que Actúan Sobre una Biela

Dentro de todas las cargas que actúan sobre una biela de un motor de combustión existen ciertas fuerzas que se las denominan alternativas de inercia, y estas van divididas de acuerdo a la variación de velocidad del pistón cuando se desplaza en carrera ascendente o descendente según su carrera y las otras fuerzas que actúan pues son las influenciadas por el gas generado y de los movimientos alternativos que se presentan.

También se debe tener muy en cuenta la distancia que posee el brazo de biela desde el centro del orificio de pie de biela con el centro de la cabeza de biela debido a que los esfuerzos con los que experimenta pueden provocar pandeo de la biela por lo que al momento de diseñar se debe tomar en cuenta esta consideración y lo que se trata es que esta distancia sea disminuida para poder evitar este inconveniente generados por la inercia que experimenta en funcionamiento.

Otro aspecto a tomar en cuenta son las fuerzas centrífugas que ejercen sobre la biela provocadas por el movimiento de las masas alternativas, así como las rotativas con el conjunto del mecanismo pistón junto a la biela, como se puede observar en la figura 15.

Figura 15

Fuerzas que actúan sobre la biela



Se debe tomar en cuenta que mientras se encuentra en funcionamiento el motor de combustión interna existen fuerzas que actúan sobre el mecanismo biela – manivela, siendo estas fuerzas generadas por la presión de los gases combustionados durante la fase de trabajo del motor y también por la conjunción de inercia de las masas que se encuentran en movimiento, para el análisis de estas cargas es fundamental para así proceder a generar los cálculos de la resistencia mecánica de cada uno de los elementos del motor, pero también se realiza la depreciación de las fuerzas de fricción durante este proceso.

En el caso de las fuerzas de inercia a las que está sometido el elemento de la biela y que influyen sobre las masas de todo el mecanismo son tomadas en cuenta las velocidades en cuanto a las variables en dirección y magnitud, las mismas que se encuentran presentes durante todo el proceso o ciclo de trabajo del motor de combustión interna, las mismas que son divididas como fuerzas con movimiento giratorio y movimiento alternativo.

Dichas fuerzas de inercia sobrepasan de manera considerable a la de los gases por el motivo que un motor de combustión interna produce un alto régimen de giro del motor o denominado número de revoluciones, siendo este el motivo la importancia que poseen al momento en que se realiza cada uno de los cálculos de la resistencia a la fatiga del elemento en estudio.

Las fuerzas de inercia que posee el mecanismo biela – manivela tomando en cuenta su masa son las siguientes:

- De la masa con movimiento alternativo
- De la masa que gira
- De la masa que actúa en conjunto con un movimiento complejo

Así mismo se debe considerar que el elemento de biela tiene un movimiento de vaivén y avance considerando el plano perpendicular al eje del cigüeñal, para lo cual si se requiere determinar cuáles son los valores de cada una de las fuerzas de inercia que actúan sobre la biela

y de los cálculos dinámicos del conjunto de la biela de forma sintetizada se debe utilizar un método de reducción de masa, tomando en cuenta que las masas que actuaran son las siguientes:

- Masa del eje de pie de biela
- Masa del eje de la cabeza de biela
- Centro de gravedad que permite guardar la dinámica de todo el mecanismo

2.13. Materiales

Uno de los elementos fundamentales para el funcionamiento de un motor de combustión interna sin duda alguna es la biela, la misma que está encargada de transmitir potencia y generar un cambio del movimiento, como se muestra en la figura 16.

Figura 16

Instalación de bielas en un motor de combustión interna



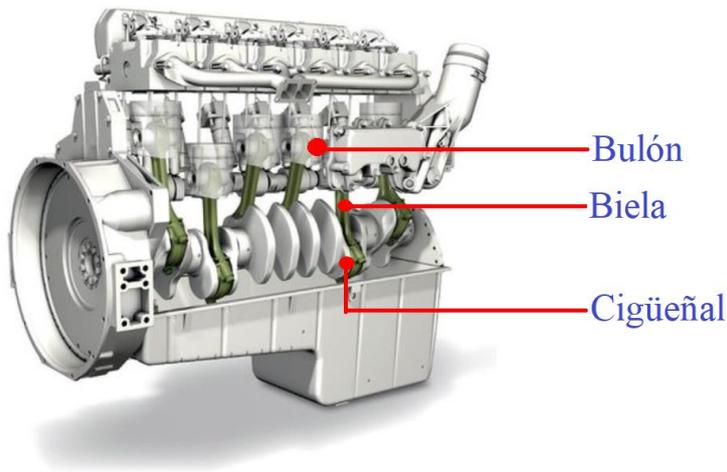
**BIELAS EN UN MOTOR DE
COMBUSTIÓN INTERNA**

Dentro de su funcionamiento una biela trabaja con cargas de compresión, tracción y flexión, por tal motivo es fundamental las características del material con el que están fabricadas y en conjunto estas deben soportar las fuerzas a las que se encuentra sometida, por este motivo a través de este proyecto investigativo lo que se busca es aligerar su peso y que se garantice su correcto funcionamiento. El material más utilizado para la elaboración de bielas es “el acero AISI 4340” (Morillo, 2017).

Para la elaboración de las bielas es importante tomar en cuenta absolutamente todas las fuerzas que soporta así como tener en cuenta los contra esfuerzos generados con los elementos que se encuentran trabajando a los extremos de la biela y que la sujetan como lo son el bulón que conecta al pistón así como la muñequilla de bancada que conecta al cigüeñal, como se muestra en la figura 17.

Figura 17

Elementos de conexión a los extremos de la biela



Otro factor a tomar muy en cuenta en una biela es que esta soporta grandes cargas sobre el cuerpo de la misma, esto se debe a que es la parte del elemento donde posee menos cantidad de material, adicional a esto también se debe tomar en cuenta por el mismo criterio a la zona del pie de biela que conecta con el bulón, esto se debe a que es otro punto crítico y de análisis continuo.

A continuación, se procederá a detallar alguno de los materiales más utilizados en el proceso de fabricación de bielas y estos son los siguientes:

2.13.1. Acero al Carbono

Como definición los aceros al carbono son aquellos que “contienen un porcentaje diverso de carbono que es vital para definir sus propiedades mecánicas, menos de un 1,65% de manganeso, un 0.6% de silicio y un 0.6% de cobre” (UNLP, 2015).

La gran mayoría de aceros justamente son los aceros al carbono, como se muestra en la figura 18, por lo que el aumento del porcentaje del carbono en su composición permite que su composición estructural mejorando de esta manera sus propiedades mecánicas y estas son las siguientes:

- Aumento de resistencia y dureza.
- Disminuye sus propiedades correspondientes a su ductilidad, soldabilidad y elongación.

Figura 18

Acero al carbono



2.13.2. Acero Templado

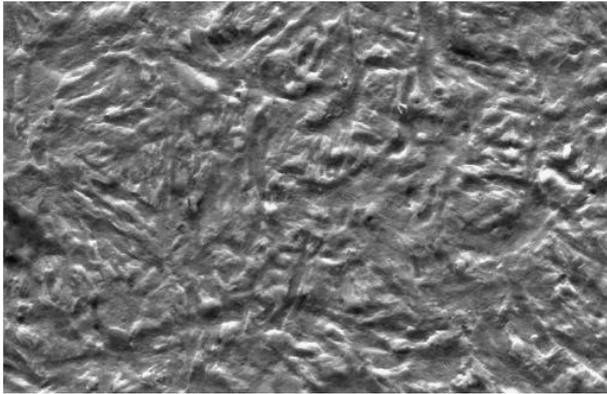
Este tipo de acero también conocido como acero fresco posee características de ser frágil en el caso de que si su contenido de carbono es superior en el rango del 0.2 al 0.3%.

El cuidado que se debe tener en cuenta es que este tipo de material es muy frágil lo que conlleva que no se puede aplicar con facilidad en algunas aplicaciones, dentro de la ciencia de la metalurgia esta característica puede ser eliminada a través de una pérdida de dureza por medio de calentar ligeramente a este tipo de acero por medio de un proceso metalúrgico conocido como templado.

La representación de la microestructura del acero templado se puede observar en la figura 19.

Figura 19

Microestructura de un acero templado



Este proceso térmico de templado sobre un material consiste en elevarle la temperatura y hacerlo enfriar ya sea con la utilización de agua, aire o aceite mejorando de esta manera las propiedades del material como lo es la dureza.

El proceso conocido como revenido se alcanza calentándolo al acero martensítico hasta alcanzar una temperatura muy inferior al de utectoide en un lapso de tiempo específico y este rango puede estar entre los 250 y 650 grados centígrados.

2.13.3. Fundición Nodular o Dúctil

Esta es un tipo de aleación de hierro y carbono de igual manera como lo es el acero. Esto se puede entender generalmente entendiendo que un acero es una aleación con un porcentaje inferior del 1.7% de carbono y si este porcentaje es mayor al indicado este se convierte en hierro fundido o una fundición.

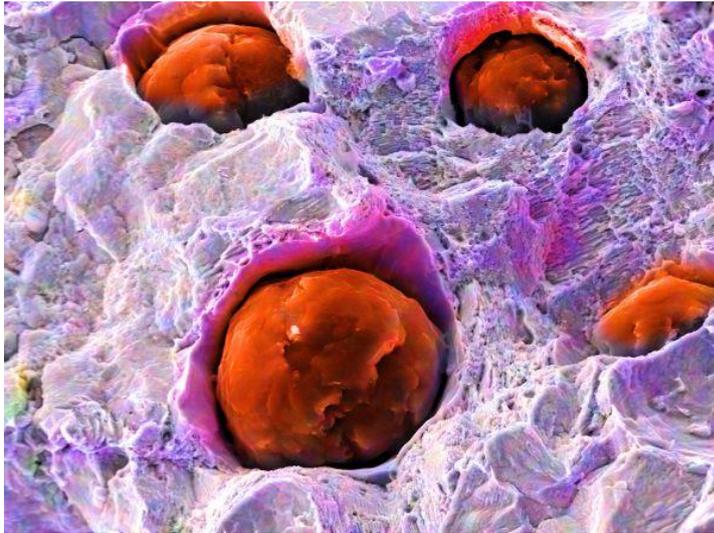
Metalográficamente se posee un límite del 1.7% ya que este limita el proceso de solidificación caso contrario se procede a generar a la austenita, esto se refleja en la figura 21.

A través de este tipo de fundición lo que se obtiene con la ayuda de aleaciones a base de hierro que a su vez posee diversos contenidos de silicio y carbono.

Lo que se logra obtener con este tipo de fundición en lo concerniente a sus propiedades son las siguientes: tenacidad, correcta endurecibilidad, muy buen maquinado, fluidez para la colada y alta ductibilidad.

Figura 20

Microestructura de fundición nodular



2.13.4. Aluminio

Por su bajo costo este suele ser uno de los materiales más utilizados, así como su ligereza en peso. Desde hace mucho tiempo también se lo aplica a través de aleaciones tales como níquel, cobalto y cromo, de esta manera lo que se logra es aumentar las prestaciones de las propiedades físicas.

Dentro de la conceptualización de términos el aluminio es un metal brillante, blanco con alta reflectividad de luz, así como de calor, como se muestra en la figura 21.

Figura 21

Características físicas del aluminio



Esto se refiere a la capacidad que posee un metal en poder conducir el calor. La conductividad es para el aluminio de un valor en el rango de 80 a 230 W/m*K, siendo este valor superado por el cobre. Pero el aluminio sobresale por el motivo que este es un material ligero.

En lo concerniente de elaboración de elementos se puede aplicar por medio de dos procesos como lo son: mecanizado y fundición.

2.13.5. Titanio

Si se desea un material extremadamente resistente para la elaboración de piezas este es el titanio, pero, así como brinda excelentes propiedades así mismo los costos para su obtención son muy elevados por motivos como el tener maquinaria especial en su manipulación, dentro de las propiedades están las de ser un material ligero y obtener propiedades mecánicas muy buenas, así como excelente resistencia elástica y un amplio límite de ruptura.

Este metal se lo considera dentro de una clasificación que va en el grupo de elementos de transición, con su color característico como lo es el blanco plateado como se muestra en la figura 22, es un metal muy ligero y sobre todo es muy resistente. Este metal es utilizado básicamente en aleaciones con metales que sustituyen al aluminio para ser aplicado en la medicina, cápsulas especiales, misiles, fabricación de piezas de aviones, entre otras aplicaciones.

Figura 22

Características físicas del titanio



2.13.6. Acero AISI 1060

Este tipo de acero suele ser muy utilizado para la fabricación de bielas en algunas marcas de vehículos muy reconocidas como lo son Hyundai, KIA, entre otras. Esto se basa a que es un material que brinda características como lo son la resistencia al desgaste y entre otras piezas que se fabriquen en el área de la automoción están los ejes, semiejes, discos de embragues, engranajes, pistones, entre otros, como se puede observar en la figura 23.

Figura 23

Lingotes de Acero AISI 1060



2.13.7. Acero AISI 4140

Este es un tipo de acero el cual posee un temple en aceite con porcentajes de medio carbono con molibdeno obteniendo de esta manera propiedades de buena penetración de temple, así como unas excelentes características para la estabilidad en condiciones de alta temperatura de hasta los 400 grados centígrados sin presentar fragilidad de revenido, también es muy versátil, así mismo es muy bueno para soportar esfuerzos de torsión y fatiga para secciones medianas, así como pequeñas.

Este tipo de material es utilizado también para la elaboración de bielas para marcas reconocidas de vehículos como lo es la Volkswagen y que le brindan importantes características como lo son alta resistencia la carga, esto se debe a que cuenta con excelentes propiedades mecánicas.

Físicamente podemos observar un lingote de este tipo de acero en la figura 24.

Figura 24

Lingotes de Acero AISI 4140

**2.14. Resistencia a la tensión (S_u)**

Dentro de la curva en un diagrama esfuerzo – deformación la resistencia a la tensión es el punto máximo que se genera durante el ensayo y lo que se termina a través de este criterio es que es el esfuerzo máximo aparente en la probeta. Este esfuerzo aparente es el resultado de la división la carga aplicada para el área de sección inicial de la probeta.

Cuando está por alcanzar o alcanza su máxima aplicación de carga el diámetro de la probeta presenta disminución, por lo que al seguir aplicando mayor carga lo que se logra la existencia de un esfuerzo de ruptura.

También existen otro tipo de ensayo, pero no es como el explicado anteriormente que se refería al de estiramiento de la probeta, en este caso lo que se le aplica al elemento en ensayo es que se presenta una compresión sobre el elemento, siendo esta cargad e compresión tomada en cuenta matemáticamente como negativa, de esta manera lo que se logra no es más que un esfuerzo negativo.

2.15. Resistencia a la fluencia (S_y)

Básicamente lo que se logra con la parte de la resistencia a la fluencia es que cuando se aplica una deformación permanente a la probeta. Dentro del análisis o interpretación de comportamientos se puede observar que, si el punto de fluencia es notable, la característica es

denominada punto de fluencia, pero si no se aplica de esta forma lo que se va a denominar es resistencia a la fluencia.

2.16. Límite elástico

Conceptualmente se determina que el límite elástico es: “Una medida de resistencia de deformación plástica. Los límites elásticos están comprendidos entre 35 MPa para un aluminio de baja resistencia hasta valores superiores a 1400 MPa para aceros de alta resistencia” (Callister, 2007)

Interpretando este concepto podemos decir que la zona de límite elástico se consigue cuando al aplicar carga sobre una barra o elemento que se encuentra en estado original esta se llega a deformar y después de retirar la carga, vuelve a su condición de origen.

Si se llega a aplicar mayor carga sobre el elemento y al retirar la carga este elemento no vuelve a las condiciones originales, quedándose deformado, a esta fase se la denomina como zona plástica, por ende, el límite elástico se encuentra en el punto en que está más cerca de la resistencia de fluencia.

2.17. Módulo de elasticidad o de Young

De acuerdo a algunos autores se lo puede definir de la siguiente manera: “Es un módulo de elasticidad para el esfuerzo de tracción y compresión en el régimen de elasticidad lineal de una deformación uniaxial y generalmente se evalúa mediante pruebas de tracción” (Salazar, 2007).

Por ende, el módulo de elasticidad no es más que la resistencia o rigidez a la que está sometida la deformación de un material.

2.18. Ductilidad y porcentaje de elongación

Los elementos que se suelen fabricar con materiales dúctiles presentan con facilidad fallas, teniendo en cuenta que no es lo mismo hablar de ductilidad con fragilidad ya que son conceptos contrarios.

Por este motivo la definición de ductilidad no es más que la deformación de este material hasta antes que llegue al punto de fractura final.

Esta es una ventaja que ayuda a los elementos que se encuentran elaborados a través de este tipo de materiales por que presentan mayor resistencia en comparación a los fabricados con materiales frágiles y son sometidos a cargas repetitivas.

Para poder determinar la ductilidad esta no es más que el porcentaje de elongación, lo que conlleva a la variación entre la longitud final con la inicial del elemento y está dividida para la longitud inicial, posteriormente si se requiere conocer el porcentaje que se genera a este valor se lo multiplica por cien, este comportamiento se puede ver en la figura 25.

Si el resultado obtenido es mayor al 5% se considera que se tratad y un material dúctil de lo contrario es un material frágil.

Para elementos en los que por el material que se encuentran elaborados la elongación supera el 12%, son elementos que se los recomiendan para mecanismos que van a estar sometidos o soportarán cargas repetitivas.

Figura 25

Comportamiento de elongación



2.19. Relación de Poisson

“La relación de la deformación unitaria de contracción y tensión se denomina relación de Poisson. Los valores típicos para el acero son de 0.22 a 0.30 y para el aluminio de 0.3 a 0.33” (Mena, 2017)

Se debe tener en cuenta que el coeficiente de Poisson se refiere a una constante elástica que lo que hace es proporcionar una determinada medida que se refiere al estrechamiento del área seccionada de un prisma que es de material elástico lineal y una configuración isotrópica cuando se genera un estiramiento de manera longitudinal provocando de esta manera un adelgazamiento en las direcciones perpendiculares a donde se genera el estrechamiento de elemento.

2.20. Dureza

Cuando se refiere al término de dureza en un material esta es la resistencia que posee a ser penetrado.

Para poder determinar estos valores de dureza se utilizan los siguientes equipos:

- Rockwell
- Brinell

El durómetro denominado Brinell, usa como elemento de penetración a una esfera de acero endurecido con un diámetro de 10 mm, 3000 o 500 kg fuerza de carga dependiendo de material con que está construido el elemento a ser analizado.

En cambio, que el durómetro Rockwell, usa una esfera de acero endurecido con un diámetro de 1/16 de pulgada, que posee una carga de 100 kg para materiales de metal blando y para materiales metales más duros como aceros con tratamiento térmico, se usa con una carga de 150 kg, con un penetrador con punta de material de diamante y su forma de la punta es cónica esférica.

2.21. Maquinabilidad

Este término permite generar una referencia ya que es una propiedad con que cuentan los materiales y consiste en la determinación comparativa de facilidad con que un material puede ser mecanizado a través de arranque de viruta.

Su determinación se la da a través de ensayos con los que se generan procesos comparativos por medio de los siguientes parámetros:

- Volumen del material arrancado
- Potencia consumida en el proceso de mecanizado
- Fuerza de corte necesario
- Acabado superficial
- Desgaste de la herramienta
- Vida de la herramienta, entre otros.

2.22. Tenacidad

Dentro de la ciencia de los materiales el término de tenacidad no es más que la energía de deformación total la cual tiene la capacidad de acumular o absorber un material antes de que se genere la rotura en condiciones de impacto, por medio de dislocaciones, esto se debe básicamente al grado de cohesión molecular existente entre su estructura.

Los elementos que están sometidos a fuerzas aplicadas súbitamente deben poseer un elevado nivel de tenacidad.

2.23. Resistencia a la fatiga

Cuando se hace un estudio o análisis de ciencia de materiales con referencia de resistencia a la fatiga se describe como el comportamiento de deformación, así como de fallo de materiales bajo una fuerza o carga cíclica.

Ahora que, si se aplica a un ensayo que se base en resistencia a la fatiga, pero con presencia de amplitudes constantes también se lo denomina como ensayo de Wöhler.

Por medio de un ensayo de Wöhler, permite determinar la amplitud en cuanto a la tensión tolerable en el transcurso del número de ciclos establecidos.

2.24. Densidad (ρ)

Este término físico está conceptualizado como: “La densidad de una sustancia es el cociente entre su masa y su volumen”

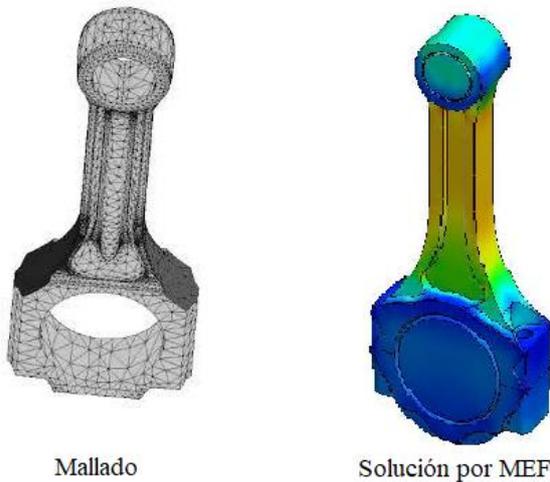
De esta manera se puede establecer que la densidad es una propiedad característica de una sustancia que se encuentre de manera independiente de su volumen o masa.

2.25. Método de elementos Finitos (MEF)

En la industria automotriz cada día se presentan nuevos desafíos en lo concerniente a elaboración de nuevos elementos, lo que implica buscar nuevos métodos que permitan mejorar considerablemente el producto, así como minimizar los costos por producción, logrando este objetivo a través de la incursión de nueva tecnología en lo referente al análisis de productos, para así lograr una obtención de productos de mayor eficiencia y de menor costo.

Lo que sí se debe tener en cuenta es: “El MEF es una herramienta de análisis aproximado y no un método mágico. El análisis por el MEF no dará más ni mejores resultados que los que puede presentar los datos” (Cerroloza, 2007). Esto se refiere que, si los datos que se introducen son de confianza y los correctos, solo en ese caso los resultados obtenidos serán confiables y por ende correctos.

Aquí aparece un término que es el método numérico que se encarga de dar solución a problemas de ingeniería, en los que su resolución implica un grado de dificultad muy elevado, debido que sus características de sus formas geométricas son muy complejas, una distorsión de fuerzas no distributivas, variación en las características de los materiales, soluciones analíticas complejas que deben ser solucionadas a través de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales que manualmente no pueden ser solucionadas, como se puede apreciar de manera precisa en la figura 26.

Figura 26*Solución por MEF de una biela*

La ayuda que brinda el aplicar el método por elementos finitos en el área de la industria automotriz permite resolver problemas como: transferencia de calor, análisis estructural, comportamiento de flujo de fluidos, etc.

Pero se debe tener presente la discretización, lo que significa que como ocurre en la aplicación de otros métodos aquí también va a generar valores aproximados, provocados por la generación del mallado de la estructura de diferentes dimensiones y estos a su vez interconectan por medio de puntos comunes denominados nodos. Los mismos que permiten formar superficies que se comportan como áreas de control independientes, afectando de esta manera las condiciones de frontera del cuerpo.

2.26. Trabajos sobre la biela

Las empresas que se dedican a la fabricación de elementos para motores de combustión interna trabajan mucho para mejorar cada uno de sus componentes y entre estos están las bielas para lo cual en el proceso de diseño poseen diferentes procesos, pero en el presente trabajo investigativo se procede a realizar el siguiente enfoque:

El análisis referente a la optimización topológica de las bielas a través de un enfoque a las distintas formas que podría tener, sin importar el tipo de fabricación que se debe aplicar para su elaboración, así como su mecanizado.

El diseño de la biela se realiza utilizando el software Inventor tanto para la fase de modelado, simulación y optimización topológica a través de análisis de elementos finitos lo que permite demostrar que es factible la reducción del peso del elemento.

La reducción del peso de la biela para un motor de combustión interna para este trabajo investigaciones se basa en otros trabajos en los que al aplicarlo se ha llegado a una disminución mayor al 40% de su peso.

Capítulo III

Método

El presente proyecto investigativo, se basa en lograr una reducción de peso de las bielas del motor utilizado en camionetas Mazda BT-50, como se muestra en la figura 27, por medio de una metodología de diseño automotriz denominada optimización topológica que permite disminuir masa del componente pero no disminuye la eficiencia del elemento durante su funcionamiento tomando en cuenta los esfuerzos máximos a los que se expone el componente, toda esta información es extraída por medio de revisión bibliográfica, así mismo la aplicación del método se lo realiza por medio del software Inventor, el mismo que permite realizar todo lo concerniente al diseño asistido por ordenador y permitiendo así llegar a gestionar el análisis por elementos finitos, para luego proceder a la validación del rediseño de la biela para finalmente se permita compara entre el diseño inicial y la propuesta del nuevo diseño.

Figura 27

Biela del motor Mazda BT-50



3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se fundamenta en documentos bibliográficos los mismos que se aplican en las fases iniciales lo que permite tener el conocimiento consolidado en los principios de conceptualización así como de la metodología, los parámetros fundamentales y

las especificaciones de la biela, lo que permite determinar la aplicación de las respectivas cargas sobre el elemento y así proceder a colocar los valores que se requieren para proceder con la optimización topológica del elemento y luego generar el respectivo análisis del rediseño de la biela.

Para la siguiente fase se aplica el tipo de investigación denominado experimental, el cual se basa en la administración de las variables independientes, para bajo la mayor cantidad de condiciones controladas para de esta manera poder medir la generación o que efecto influye sobre la variable dependiente, para así generar una comparativa y logrando que los valores finales generen el mismo resultado final con otros componentes.

Con la aplicación de este método de investigación sobre optimización topológica lo que se logra no solo es poder definir una nueva forma física de la biela sino el poder determinar la nueva geometría del elemento, determinación del factor de seguridad y sobre todo la disminución del peso de la biela.

Para finalizar con estas fases del presente proyecto lo que se logra es aplicar la investigación cualitativa, que permite plantear una observación del comportamiento del componente luego de ser aplicado sus cargas de funcionamiento y así se determinen con claridad los objetivos planteados de una manera no cuantificable de la obtención de datos.

3.2. Método empírico – analítico

Basado en la lógica empírica y la experimentación este es uno de los modelos de investigación científica que permite como fundamento poder determinar una adecuación más no una hipótesis a la realidad a través de la observación, medición, experimentación y estudio poder determinar la posibilidad de fabricar un rediseño de la biela.

Por medio del método experimental aplicado al presente proyecto investigativo representa la determinación de las fuerzas y la limitación de las variables independientes como lo es el material que se utiliza en la biela para el motor Mazda BT-50, para así al introducir

estos datos al software Inventor este pueda optimizar topológicamente su forma de una manera inicial para luego se genere el análisis lo que permite mejora la forma para que luego en el proceso de mecanización pueda llevarse de la mejor manera y que se minimicen las zonas de riesgos.

Por medio de la utilización del software en este tipo de métodos de optimización topológica como una herramienta, se presentan ventajas importantes al momento de manejo del proceso virtual y así se puede realizar modificaciones de maneras múltiples o las veces que se requieran, así como la modificación de cargas.

Para el presente estudio de la biela del motor Mazda BT-50 se fundamentó de acuerdo a lo establecido por el propio fabricante la aplicación del material Acero AISI 4340 el mismo que se encuentra preestablecido en la biblioteca de materiales de Inventor.

3.3. Metodología

El presente proyecto investigativo se basa en la aplicación del método fundamental de optimización topológica, así como del método de usabilidad, lo que establece inicialmente en la búsqueda de la información de las características, funcionabilidad y aplicabilidad del elemento que en este caso es la de la biela del motor de combustión interna, también el establecer las metas de confiabilidad, el análisis de las funciones y todos los requerimientos que se aplican sobre el elemento en estudio.

Posteriormente en la fase del diseño se aplica algunos fundamentos de suma importancia como lo son: eficiencia del componente, dimensiones del componente, las formas que tiene el elemento inicial o base, pero siempre conservando los puntos críticos en cuenta a puntos de anclaje y de esta manera poder generar una comparación del peso entre el diseño y la propuesta del rediseño.

Luego de la generación del modelado de la biela o fase de implementación se procede a dar las condiciones para la simulación y entre estos tenemos:

- Determinación de material
- Tipo de mallado
- Determinación de cargas y restricciones
- Generación de optimización topológica

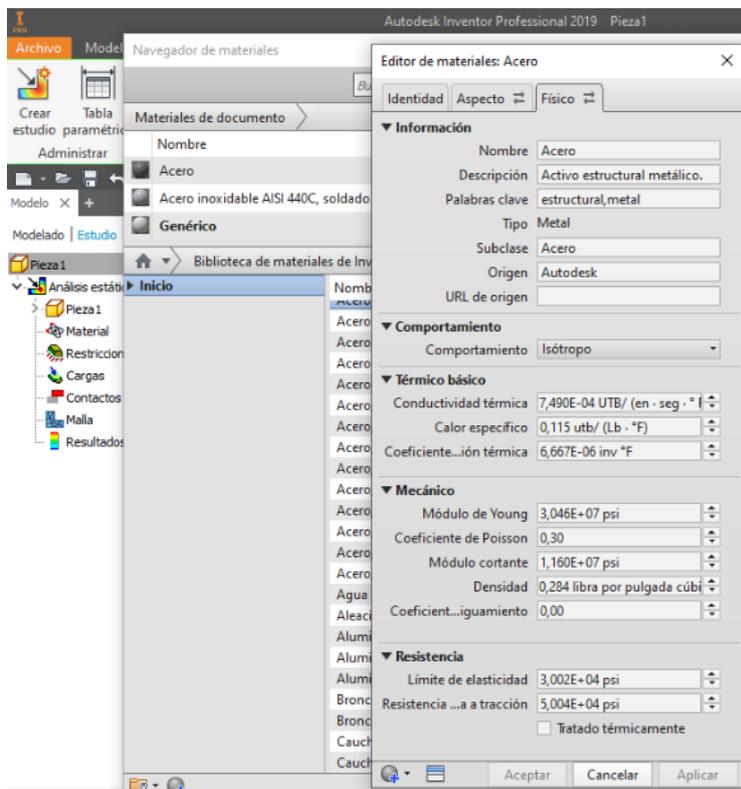
Luego que se genere el proceso de optimización topológica de la biela se procede a la realización del nuevo modelado en base a los datos obtenidos para luego volver aplicar la simulación y con esos nuevos resultados generar el análisis final, para así poder plantear la nueva propuesta de rediseño de la biela en estudio.

3.4. Proceso de optimización

El proceso de optimización topológica de la biela del motor de combustión interna Mazda BT-50 inicia con todas las especificaciones bibliográficas ya descritas anteriormente y adicional a esos datos el material utilizado que es “el acero AISI 4340” (Reyes, Cañizares, Villacres, & Noroña, 2017) como se muestra en la figura 28.

Figura 28

Biblioteca para designación de materiales Inventor

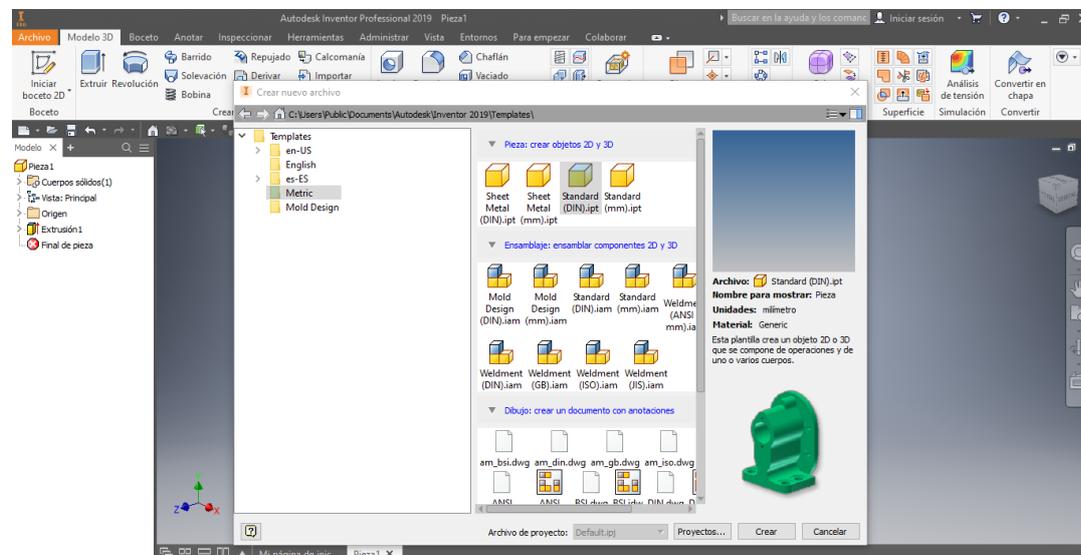


Otro de los datos básicos que se requieren son las dimensiones del elemento en estudio como le es la biela del motor Mazda BT-50 y que se encuentra en el Anexo 1, en donde se indican cada una de las especificaciones dimensionales del cuerpo de la biela, los elementos de tornillería y de la bancada de biela que en conjunto forman al componente en estudio.

Luego de tener toda la información se procede a generar el modelado de la biela con la utilización del software Inventor en el que primero se determinara un nuevo archivo con la selección de pieza en 2D y con un sistema de unidades internacionales que para este caso es en milímetros, como se muestra en la figura 29.

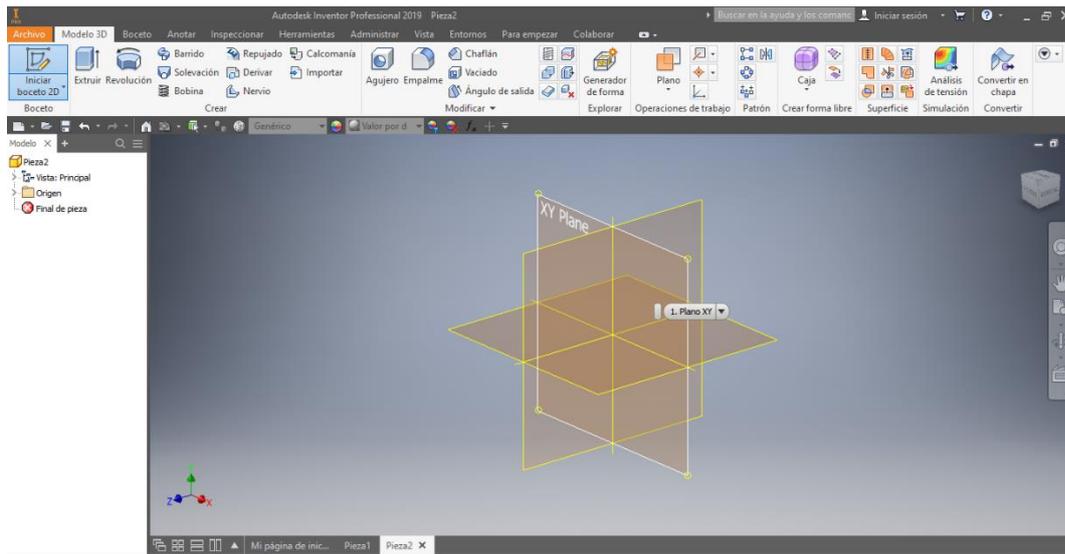
Figura 29

Inventor, selección de nueva pieza y sistema de unidades

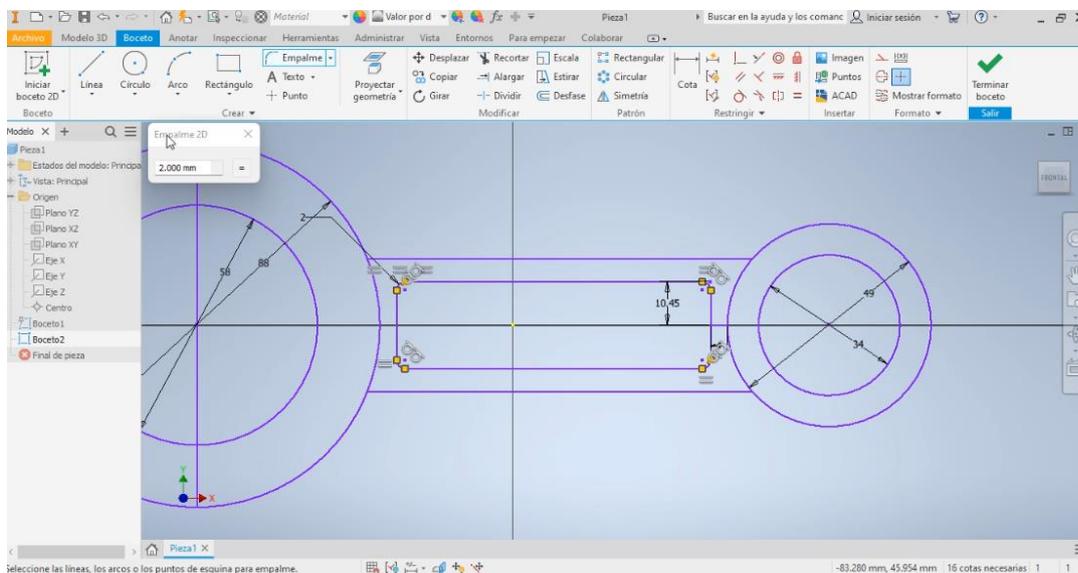


Posteriormente se procede a determinar el respectivo plano y sobre que coordenadas se va a trabajar el elemento que para este caso será inicialmente en 2D, como se puede observar en la figura 30.

La ventaja o versatilidad que brinda este software es amplia y amigable ya que se puede trabajar con varias piezas de manera individual y después generar ensambles y simulaciones que para este estudio es uno de los objetivos.

Figura 30*Inventor, selección de plano de coordenadas*

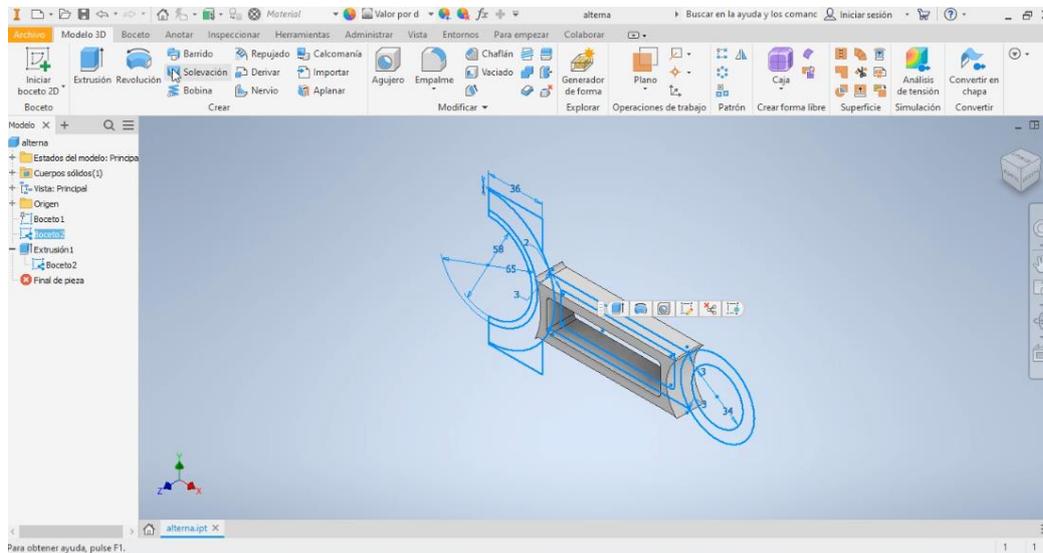
Luego de haber determinado el plano de coordenadas y con los datos de la geometría de la biela se procede a dibujar el elemento en 2D teniendo en cuenta cada uno de los trazos del elemento, así como generando las respectivas restricciones de cada una de las líneas, como se puede observar en la figura 31, y que en la misma solo se procede a realizar la parte del brazo de biela como componente inicial.

Figura 31*Inventor, boceto de brazo de biela en 2D*

Continuando con el modelado del brazo de biela se procede a finalizar la parte de boceto en 2D, para luego proceder a trabajar con la fase de extrusión, lo que permitirá dar volumen al componente y de esta manera se inicia el proceso de manejo en 3D, como se muestra en la figura 32.

Figura 32

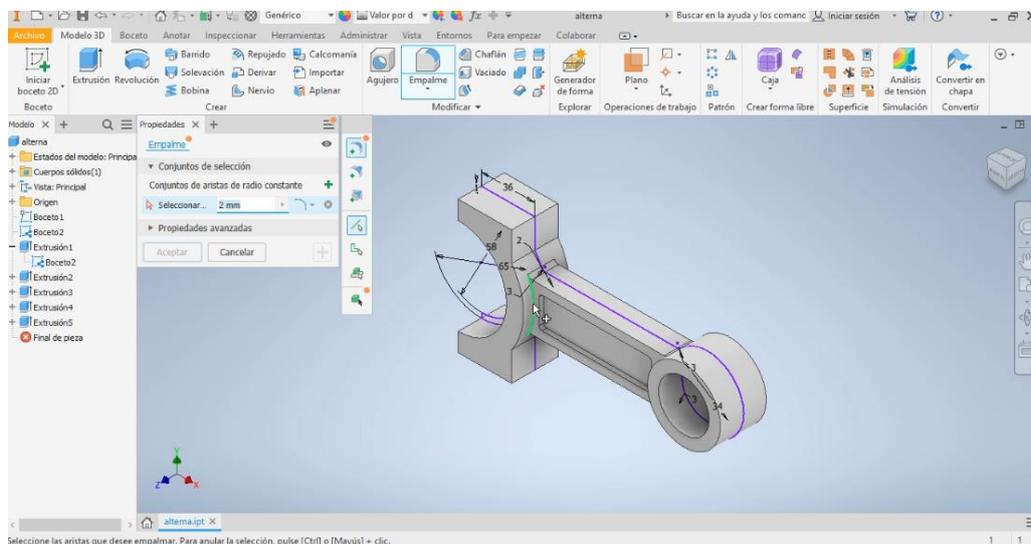
Inventor, boceto de brazo con inicio de extrusión 3D



El uso de extrusión en el modelado del brazo de biela es utilizado en un alto porcentaje por la forma que tiene el componente como se muestra en la figura 33, pero se debe tomar en cuenta que se trabaja en un solo plano seleccionado.

Figura 33

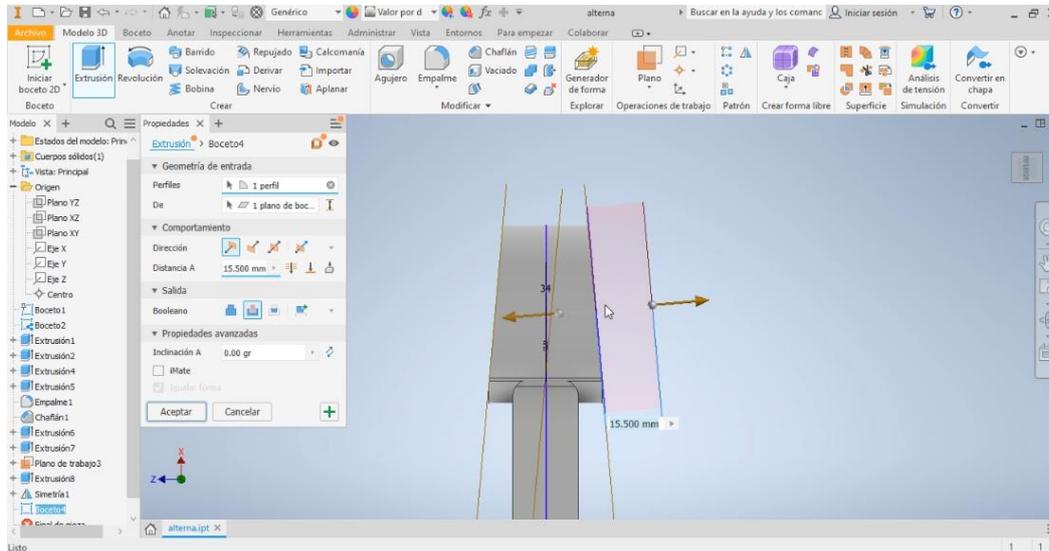
Inventor, modelado sobre plano inicial para brazo de biela en 3D



Una vez que se posee las extrusiones en un solo plano del modelado del brazo de biela se procede a generar detalles del elemento con la utilización de otros planos como se muestra en la figura 34, en los que se realiza las inclinaciones del pie de biela, así como orificios de lubricación.

Figura 34

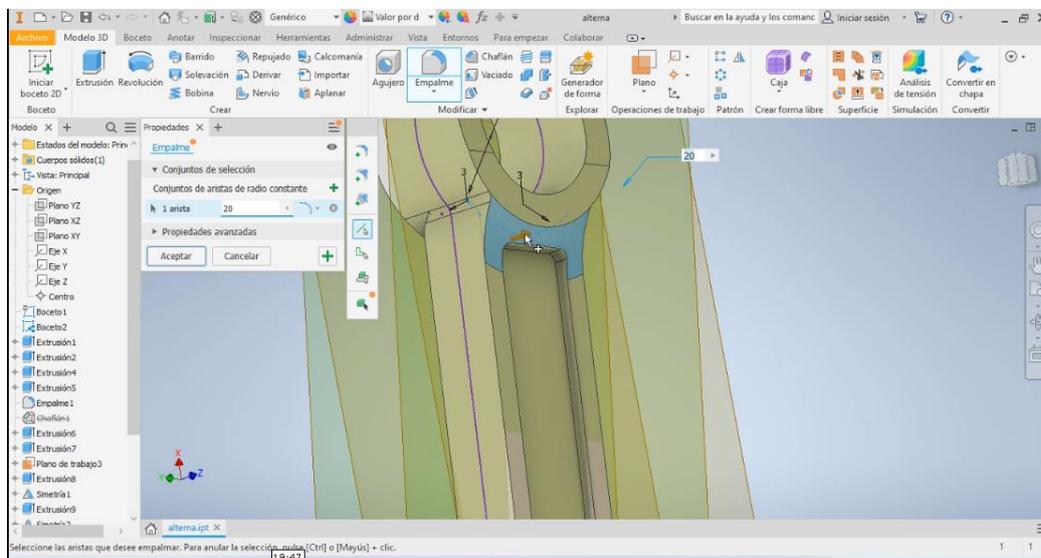
Inventor, modelado sobre planos adicionales en 3D



Otros detalles que se realizan son los empalmes o chaflanes que permiten modelar la forma del mecanizado final como se puede observar en la figura 35.

Figura 35

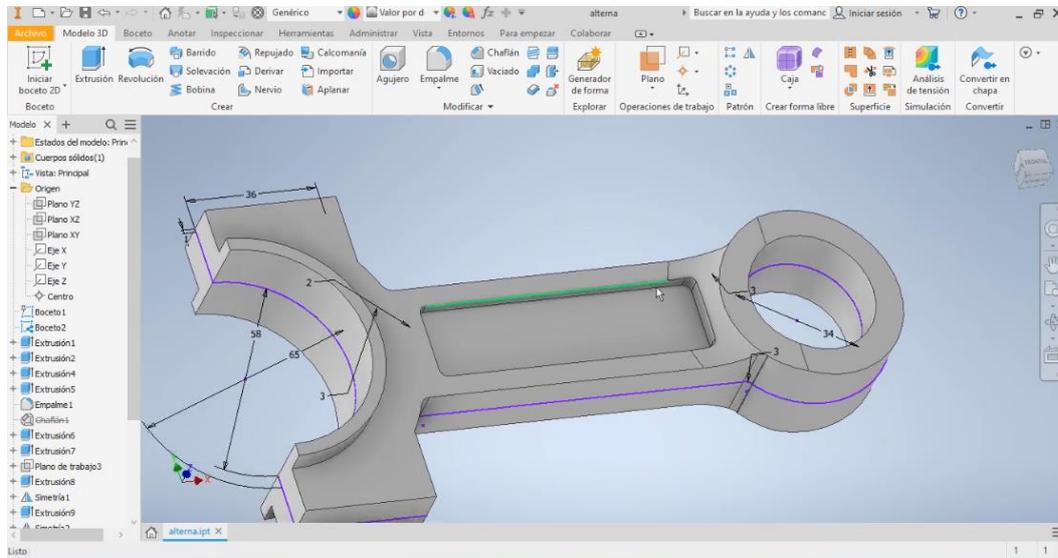
Inventor, generación de detalles de empalmes en brazo de biela 3D



De esta manera queda finalizado el proceso de modelado del brazo de biela como se puede ver en la figura 36.

Figura 36

Inventor, finalización de brazo de biela 3D



Generando una nueva pieza y siguiendo el mismo proceso se procede a realizar los otros componentes como se muestran a continuación, bancada de biela en la figura 37 y tornillería en la figura 38.

Figura 37

Inventor, finalización de bancada de biela 3D

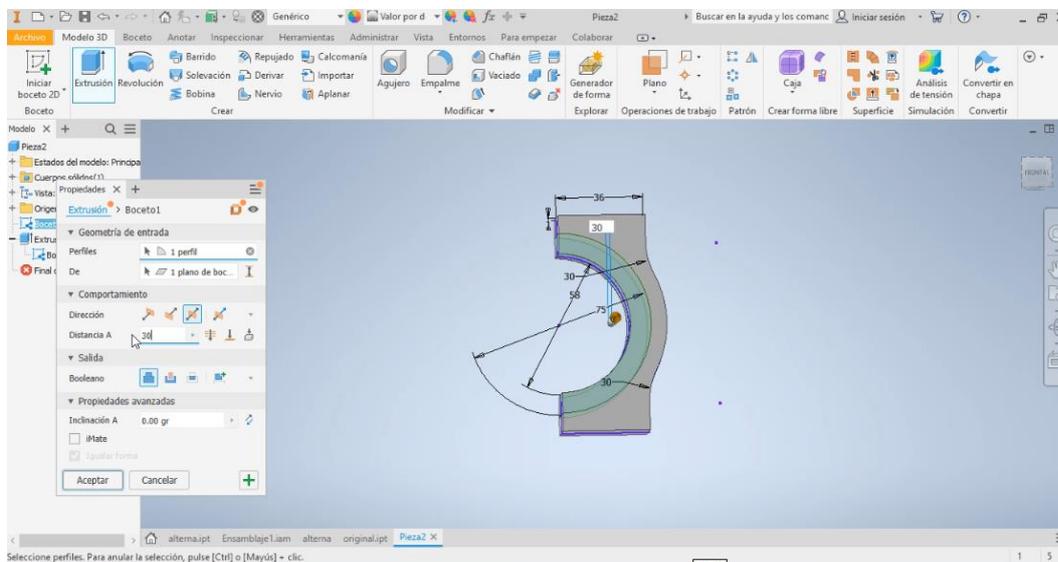
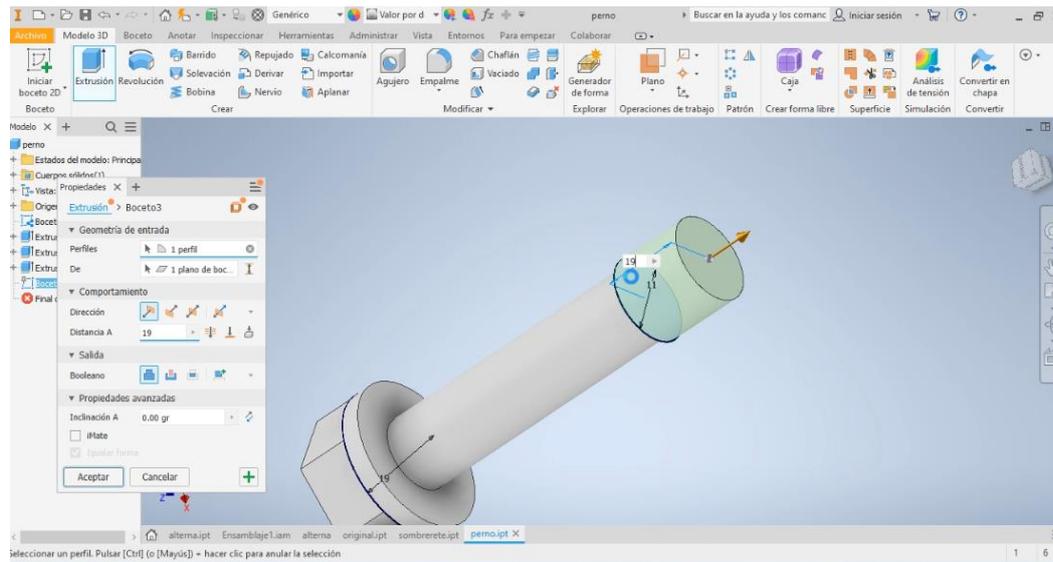
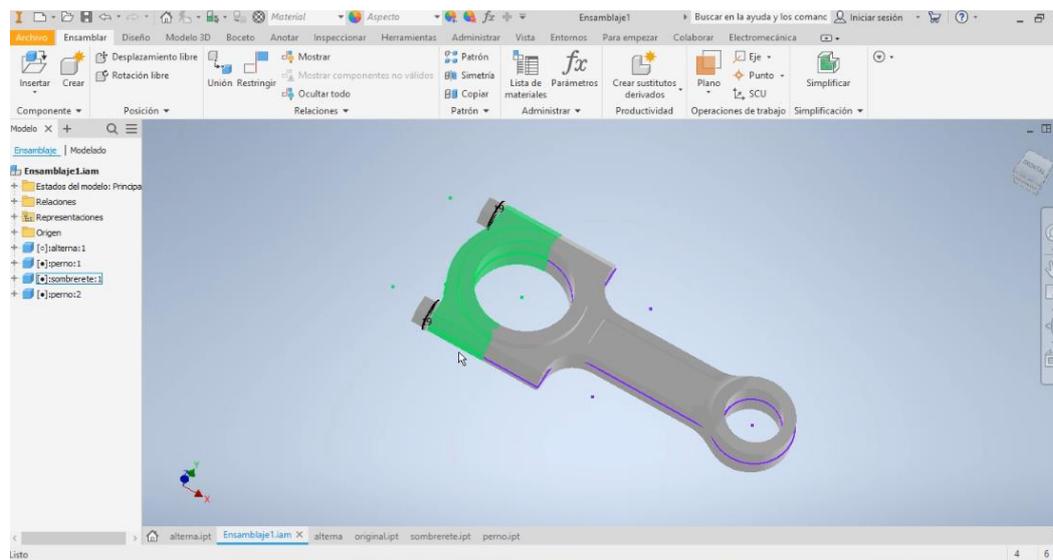


Figura 38*Inventor, finalización de tornillería de biela 3D*

Una vez elaborados cada uno de los elementos se procede a realizar el ensamble y de esta manera se termina la fase de modelo completo de la biela del motor Mazda BT-50 como se muestra en la figura 39.

Figura 39*Inventor, ensamble de biela 3D*

Una vez que se ha concluido el proceso de modelado 3D en el software Inventor, se procede a guardar el ensamble para de esta manera continuar con el método que consiste en generar la optimización topológica, la misma que se procede a abrir la pieza o ensamble,

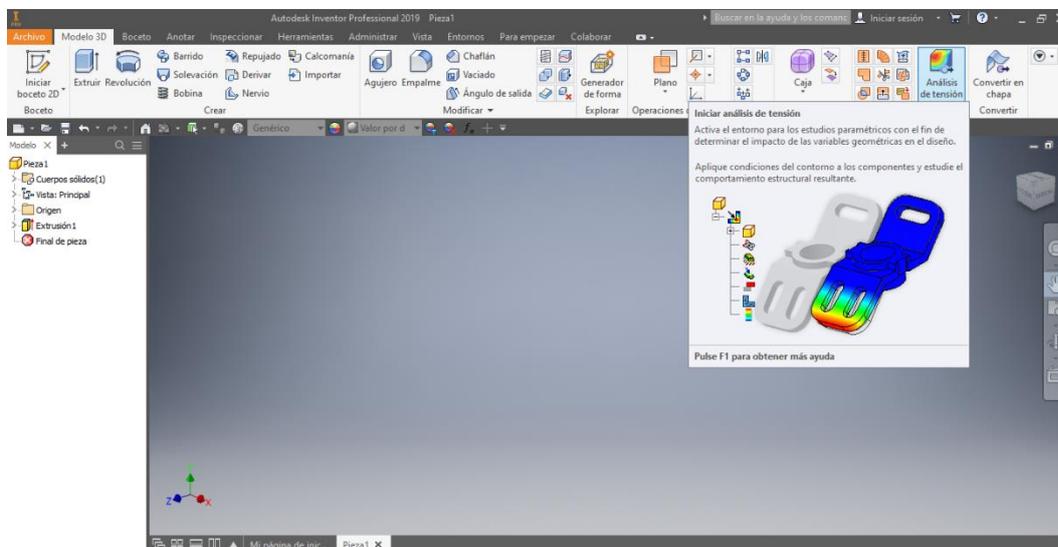
teniendo en cuenta las dimensiones correctas que debe tener en este caso la biela según las especificaciones y geometría del fabricante, para luego proceder a colocar o designar el material con el que se realiza la simulación que para el caso en estudio es el Acero AISI 4340 el mismo que tiene las siguientes propiedades mecánicas:

- Dureza estado bonificado: 28 – 34 HRc
- Esfuerzo Fluencia: 60 – 70 kg/mm²
- Esfuerzo Tracción: 95 – 105 kg/mm²
- Elongación (min.): 10 – 18 %

Posteriormente a selección del material se procede a generar un nuevo análisis de tensión como se muestra en la figura 40, el mismo que permitirá activar todos los entornos del software para el respectivo estudio paramétrico con la finalidad de determinar el impacto de las variables geométricas del diseño, aplicando todas las condiciones del entorno a cada uno de los elementos a los cuales se va a realizar el análisis y así poder interpretar los resultados del comportamiento estructural.

Figura 40

Inventor, creación de análisis de tensión de biela



Para el presente estudio se toma en cuenta que la simulación se la realiza bajo condiciones de comportamiento estático de la biela.

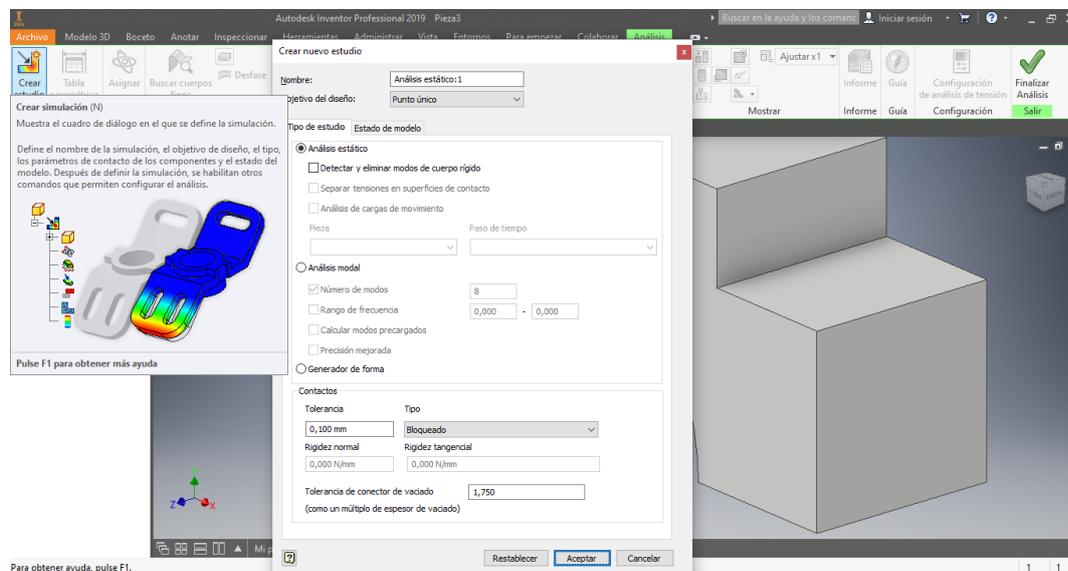
Luego se procede a generar un nuevo estudio de simulación como se puede apreciar en la figura 41, el mismo que permite definir lo siguiente:

- Nombre de la simulación
- Objetivo del diseño
- Tipo de tamaño de contacto de los componentes
- Estado del modelo

Luego de generar estos parámetros se abrirá un nuevo mapa de diálogo en el que se permite configurar el análisis.

Figura 41

Inventor, creación de nuevo estudio



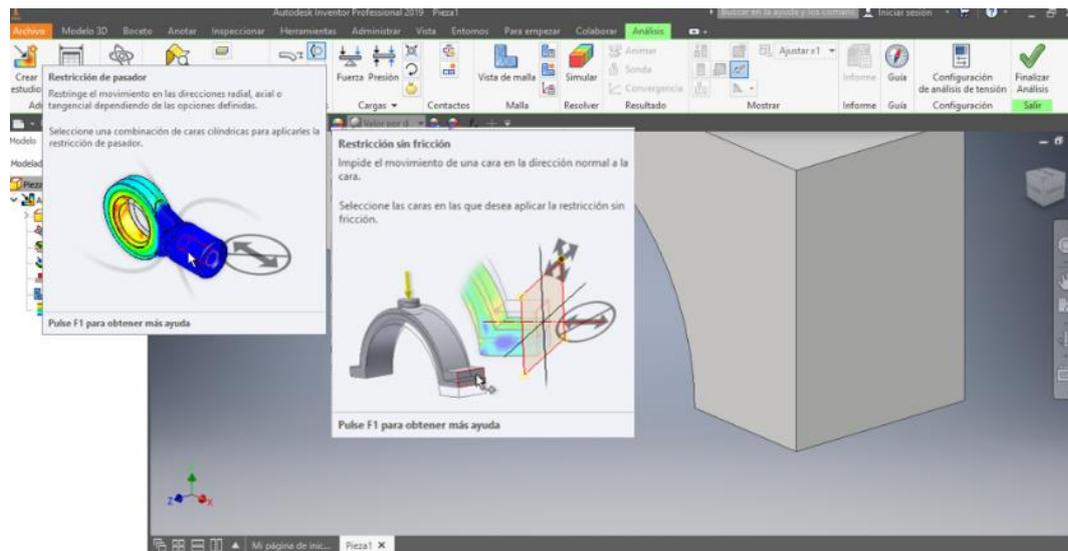
Continuado con el proceso se procede a colocar las restricciones del elemento lo que permite limitar los movimientos en todas o determinadas direcciones de la geometría que se encuentre seleccionada.

Para esta parte del proceso lo que corresponde a seleccionar son las caras, las aristas o vértices que permitan generar las restricciones que se requieran sobre todo las que se determinan como fijas.

De acuerdo al objeto y características de elementos en estudio también se pueden aplicar restricciones por pasador o restricciones sin fricción, como se muestra en la figura 42.

Figura 42

Inventor, restricción por pasador y por fricción



Algo muy importante es este punto y que se tiene que tomar en cuenta es que al momento que se aplican las restricciones se deben aplicar de acuerdo a su geometría de la biela la conservación de la región dependiendo de las caras, así como orientación y opciones de cambio de tamaño.

Luego de haber generado las restricciones se procede a realizar la designación de las cargas según la geometría, arista o vértice que se designe. Esta aplicación se genera por medio de vectores de fuerza, pudiendo así simular el comportamiento del modelo sometido a una carga con distribución uniforme para el caso de caras o aristas, o cargas concentradas si es aplicado sobre un vértice.

Teniendo en cuenta que el presente proyecto está basado su estudio en una biela de una camioneta Mazda BT-50 las especificaciones que brinda la marca son los siguientes:

- Diámetro del pintón (\emptyset): 93 mm
- Carrera (s): 92 mm
- Cilindrada (comercial): 2500 cm³
- Número de cilindros (i): 4
- Relación de compresión (ϵ): 18:1

Esta información permite obtener a través de cálculos los valores que se requieren para el estudio, los mismos que se expresan a continuación:

Con los valores del diámetro del cilindro y la carrera se obtiene la cilindrada unitaria (V_h).

Ecuación 1

Cilindrada unitaria

$$V_h = \frac{\pi s \phi^2}{4}$$

$$V_h = \frac{\pi 9.2cm * (9.3cm)^2}{4}$$

$$\mathbf{V_h = 624,948cm^3}$$

Luego se obtiene la cilindrada total (VH) que está dada por la multiplicación de la cilindrada unitaria por el número de cilindros con que cuenta el motor (i).

Ecuación 2

Cilindrada total

$$VH = V_h * i$$

$$VH = 624,948cm^3 * 4$$

$$\mathbf{V_h = 2499,790cm^3}$$

Una vez obtenida la cilindrada total se procede a obtener el volumen de la cámara de combustión (V_c) que es la división entre la cilindrada unitaria para la relación de compresión menos 1.

Ecuación 3

Volumen de la cámara de compresión

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1}$$

$$V_c = \frac{624,948cm^3}{18 - 1}$$

$$\mathbf{V_c = 36,762cm^3}$$

Una vez que se tiene los valores de la cámara de combustión y el volumen del cilindro se procede a obtener el valor del volumen total de cilindro más el de la cámara (V_a).

Ecuación 4

Volumen total del cilindro

$$V_a = V_h + V_c$$

$$V_a = 624,948\text{cm}^3 + 36,762\text{cm}^3$$

$$\mathbf{V_a = 661,71\text{cm}^3}$$

Para conocer el área del pistón (A) se utiliza el valor del diámetro del cilindro.

Ecuación 5

Área de la sección del pistón

$$A = \frac{\pi \phi^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi (9.3 \text{ cm})^2}{4}$$

$$\mathbf{A = 67,929\text{cm}^2}$$

A través de un estudio realizado se obtuvo un valor de la “presión del ciclo de explosión $P_z = 8860000\text{N/m}^2$.” (Morillo, 2017) , con el que se obtiene el valor de la fuerza que soporta la parte superior del pistón generada por la transformación de energía (F_e), la misma que se obtiene de la siguiente forma:

Ecuación 6

Fuerza que soporta el pistón por explosión

$$F_e = P_z * A$$

$$F_e = 8860000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 0,006793 \text{ m}^2$$

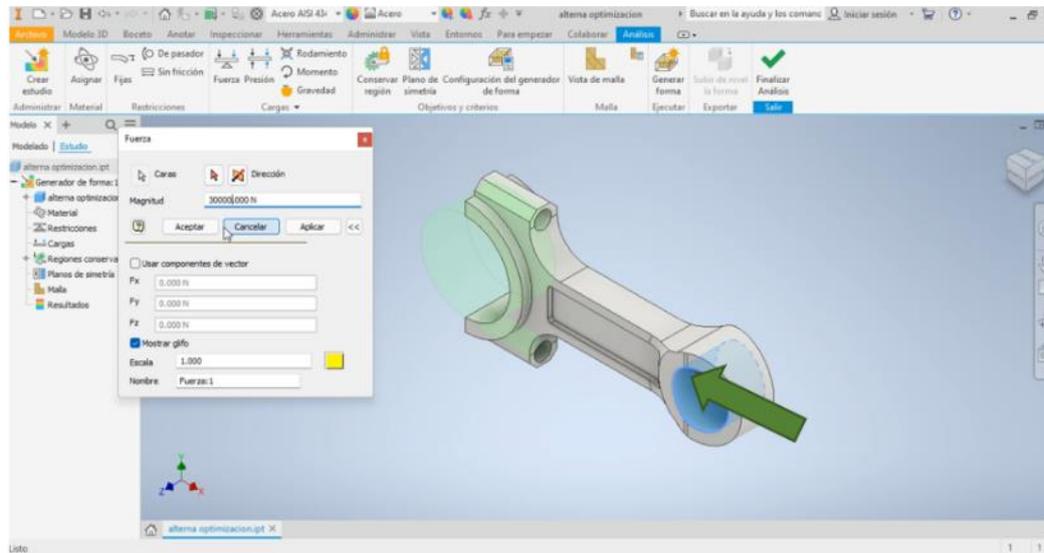
$$\mathbf{F_e = 60185,98 \text{ N}}$$

Obteniendo esta fuerza que es la máxima que se presenta en todo el ciclo de trabajo es la que se procede a ser aplicada al elemento en el punto del orificio del pie de biela en dirección

al cuerpo como se muestra en la figura 43, se tiene que tomar en cuenta sobre que eje se está trabajando.

Figura 43

Inventor, aplicación de la fuerza de presión sobre la biela



Posterior a este proceso se genera la vista de malla en el modelo de la biela, lo que permitirá visualizar en relación a las distintas operaciones geométricas, teniendo en cuenta que se debe superponer la malla con los resultados de la simulación para poder observar la relación que existe entre las concentraciones de tensión y cada uno de los elementos de la malla como se muestra en la figura 44.

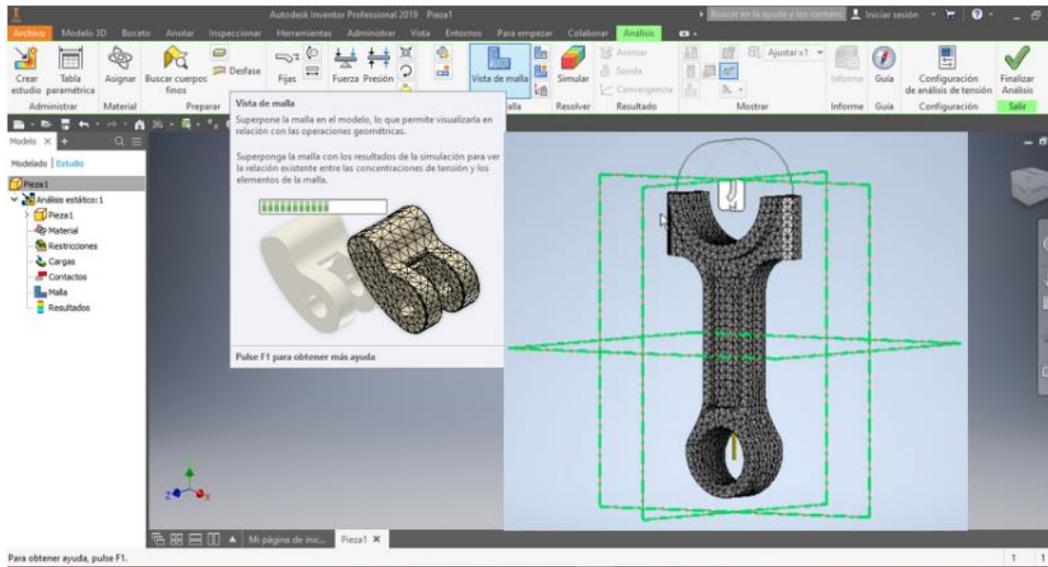
En esta sección en software nos permite proceder a generar la malla por defecto o caso contrario también brinda la forma de que se puede generar algunas configuraciones como lo son las siguientes:

- Configuración de malla
- Control de malla local
- Configuración de convergencia

Para al caso del presente estudio se procede aplicar el modo que recomienda el software por defecto.

Figura 44

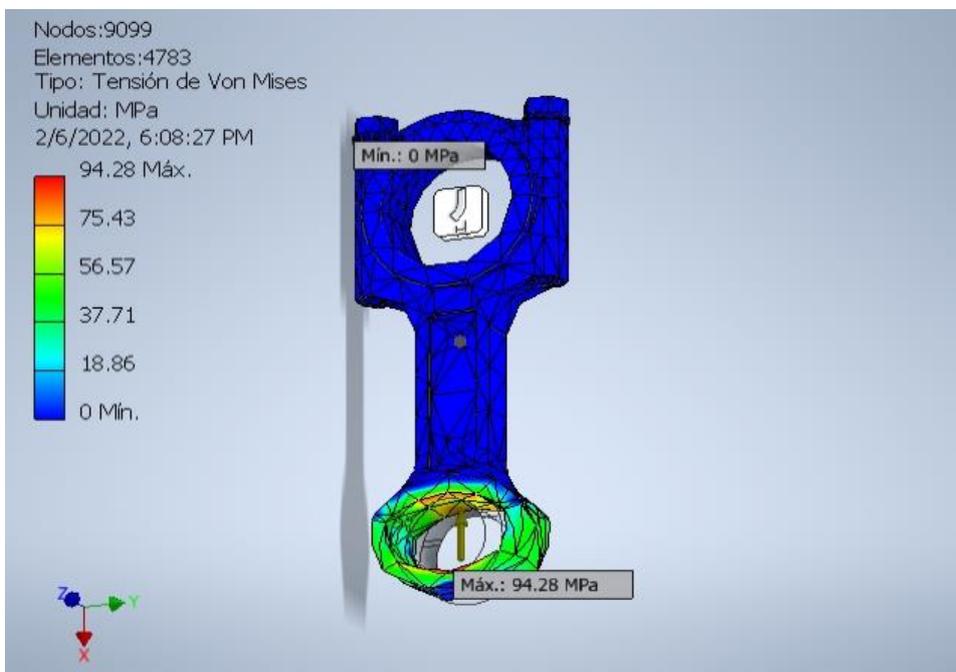
Inventor, generación de vista de malla sobre la biela



Luego de haber generado el mallado de la biela se procede a generar el análisis de tensión de los que se observan los valores que genera el software y los resultados que para este caso fueron los siguientes: Esfuerzo máximo: 94,29 MPa, aplicado a la parte inferior del pie de la biela donde se concentra el punto crítico, como se puede observar en la figura 45.

Figura 45

Inventor, esfuerzo máximo de biela antes de la optimización



Gráficamente se puede observar los tonos de los esfuerzos lo que permite interpretar que el color azul es donde la estructura presenta un esfuerzo casi nulo y es donde con la optimización topológica que realiza el software se puede trabajar para alcanzar el objetivo de retirar masa y hacerlo más ligero, pero con las mismas propiedades mecánicas.

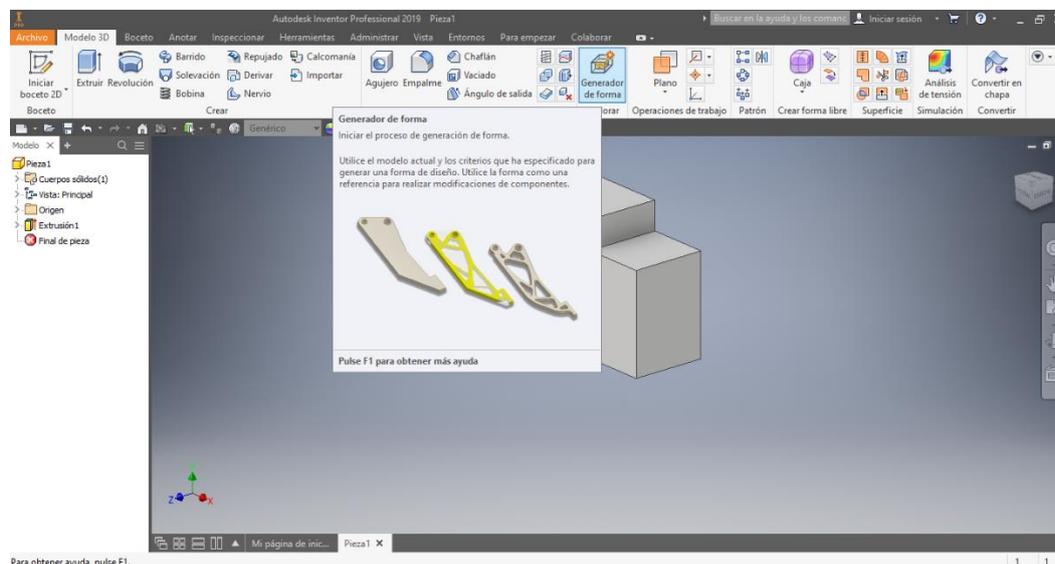
Una vez que se han generado la simulación se procede a extraer el informe completo del estudio el mismo que se lo puede observar de manera completa en el anexo 2 que corresponde a la biela antes de la optimización topológica, esto permite realizar el respectivo análisis comparativo del estudio aplicado es decir entre la biela original y la biela optimizada o a su vez también nos permite realizar este mismo análisis comparativo con otros softwares.

3.5. Medios

El medio para continuar con la segunda parte del estudio y que nos permite alcanzar el objetivo como lo es la optimización topológica y estudio de elementos finitos es el software Inventor con el que se procede a realizar una generación de forma geométrica, la misma que el software lo ejecuta utilizando el modelo inicial de la biela y las especificaciones que se aplicó en el diseño, teniendo en cuenta que esta forma no es más que una referencia para efectuar modificaciones del elemento en estudio, como se muestra en la figura 46.

Figura 46

Inventor, generación de nueva forma en biela



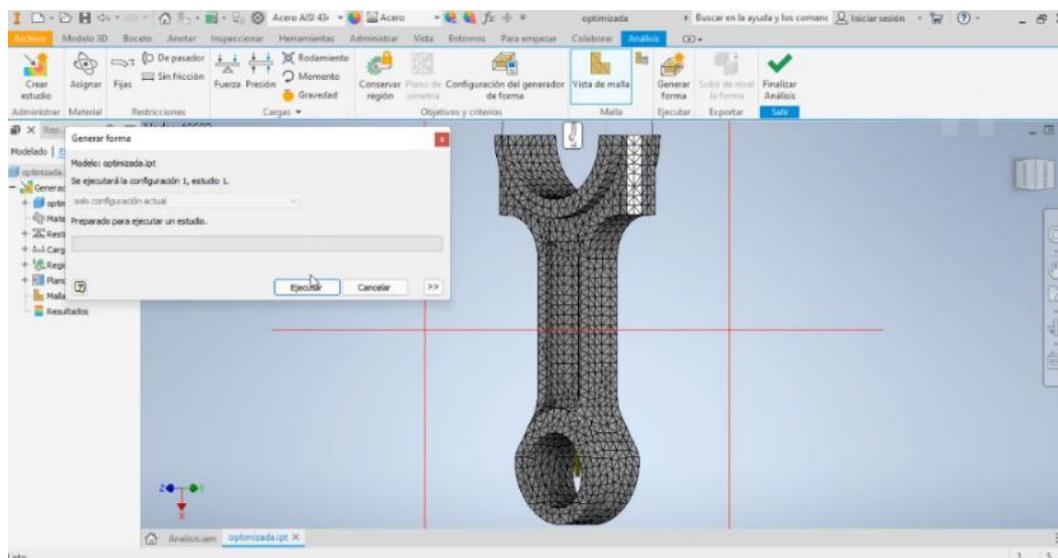
Para obtener ayuda, pulse F1.

3.6. Primeros Resultados

Para la obtención de los primeros resultados se procede a replicar el mismo procedimiento que se realizó en la generación del análisis de tensión y adicional se debe tener en cuenta las regiones que se van a conservar con el fin de que en esas áreas no se proteja de una reducción de material, como se puede observar en la figura 47, también se procede a seleccionar los planos de simetría se los selecciona los tres con el fin de lograr un equilibrio de todo el elemento y obtener un modelo balanceado.

Figura 47

Inventor, conservación de regiones en biela

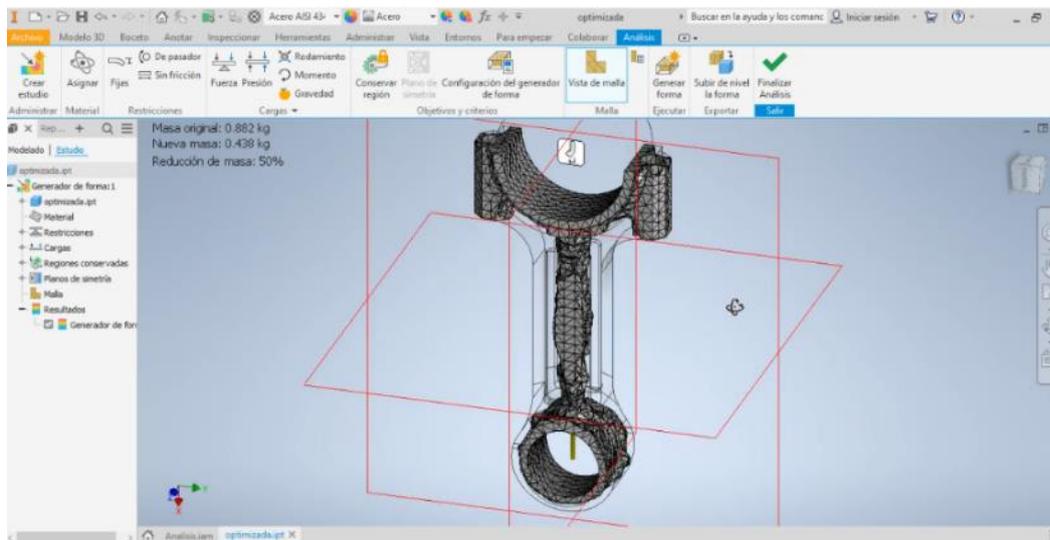


Luego se procesa a condicionar que la optimización topológica de la biela no debe superar el 50% y con una reducción de la malla de 2,5 eso es todo en cuando datos que se ingresan al software para luego ejecutar la nueva forma de la biela, generando de esta manera los resultados del programa como se muestra en la figura 48.

Se debe tomar en cuenta que la optimización topológica en un elemento puede ser mayor o menor al 50%, esto dependerá de la construcción del elemento, así como el análisis e interpretación del diseñador.

Figura 48

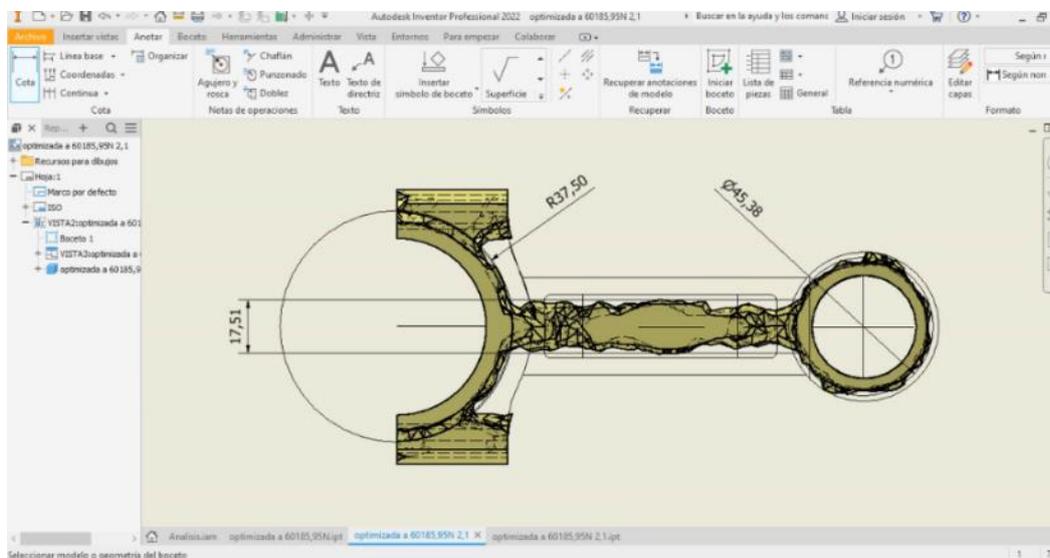
Inventor, ejecución de forma por optimización topológica



De acuerdo con los resultados de la optimización topológica que nos genera el software como muestra la figura 49 y viendo el comportamiento del componente si se requiere se procede a formar secciones de conservación de geometría cuidando su forma base y que guarde sus características mecánicas. Este resultado de la optimización sin duda alguna permite al final generar un análisis comparativo.

Figura 49

Inventor, resultado de optimización topológica de la biela

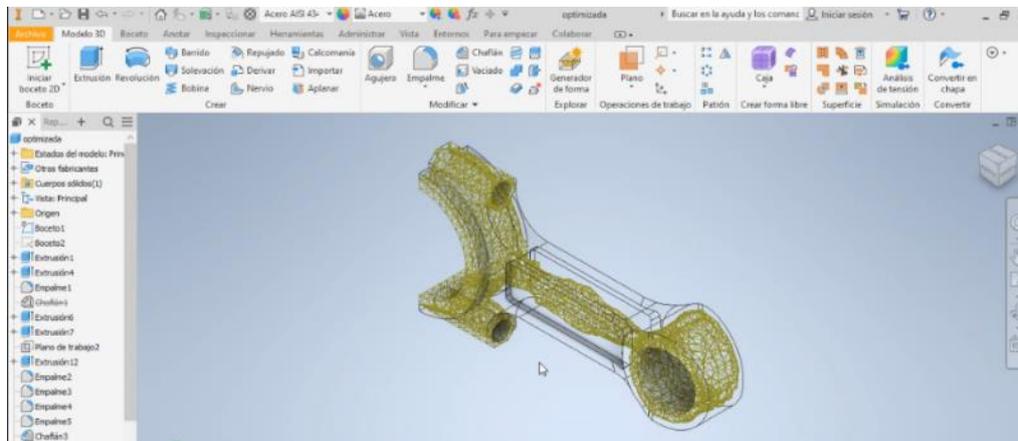


Continuando con el proceso ya de rediseño y optimización de la biela en estudio se procede a subir de nivel la forma o elemento, de tal manera que se pueda observar

conjuntamente con el elemento original o primitivo, como se muestra en la figura 50, para así aplicar las operaciones requeridas y logran definitivamente la biela optimizada, esto quiere decir que se debe ir modificando la geometría de la biela, pero con el cuidado de no retirar masa de los resultados obtenidos.

Figura 50

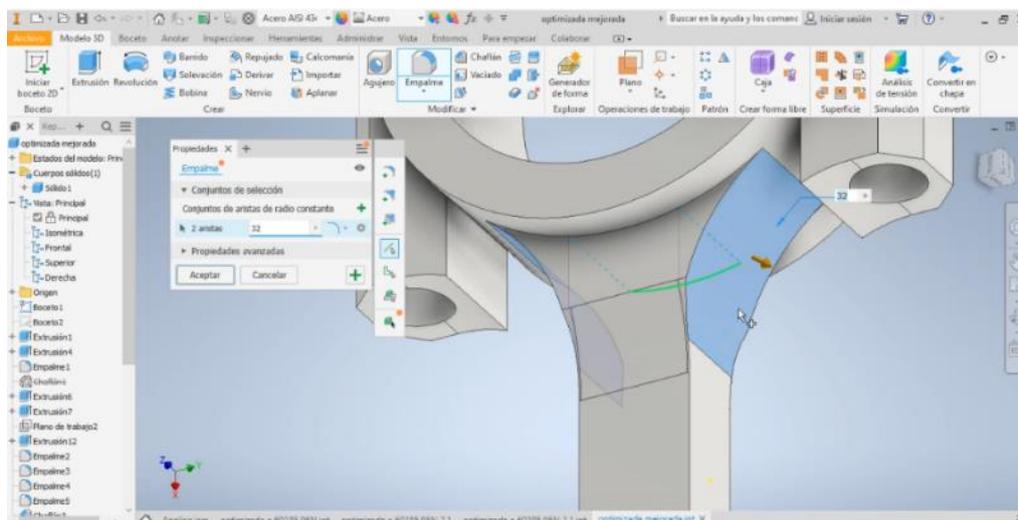
Inventor, sobreposición de geometría primitiva



Posteriormente se procede a trabajar con el rediseño de la parte de reducción de dimensiones de la biela como se muestra en la figura 51, pero se debe tener presente en esta fase que las formas que se vaya a rediseñar no sean complejas para que no complique al proceso de manufactura del componente así como la disminución de energía o recursos para su construcción.

Figura 51

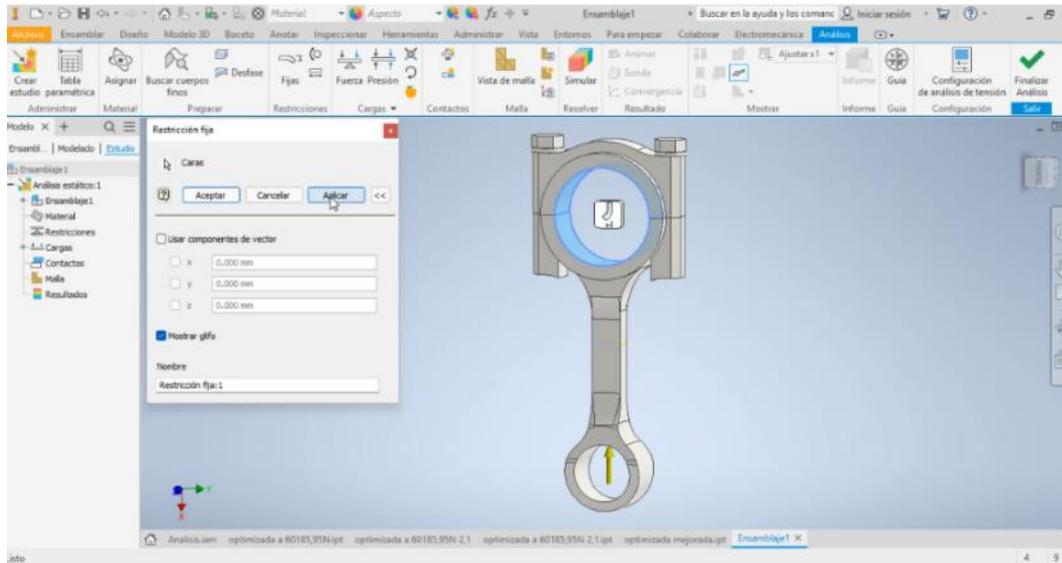
Inventor, generación de nueva geometría de biela



En la figura 51 se puede observar rediseño de la biela en estudio con cada uno de los elementos que la conforman.

Figura 52

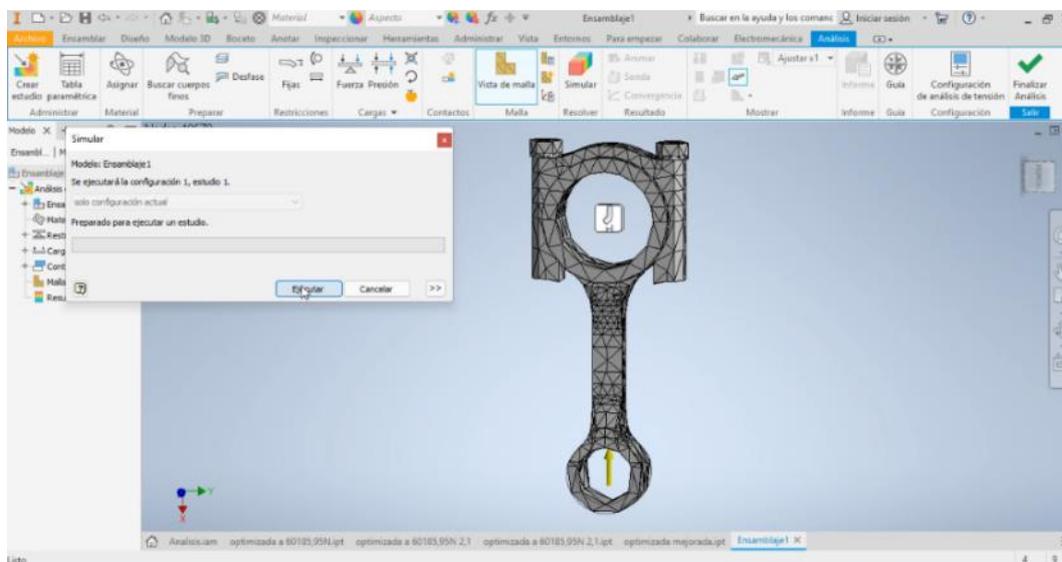
Inventor, rediseño de biela



Luego de tener el rediseño se procede a repetir el proceso que se realizó con el modelado inicial como se muestra en la figura 53, que para este caso es la fase del mallado.

Figura 53

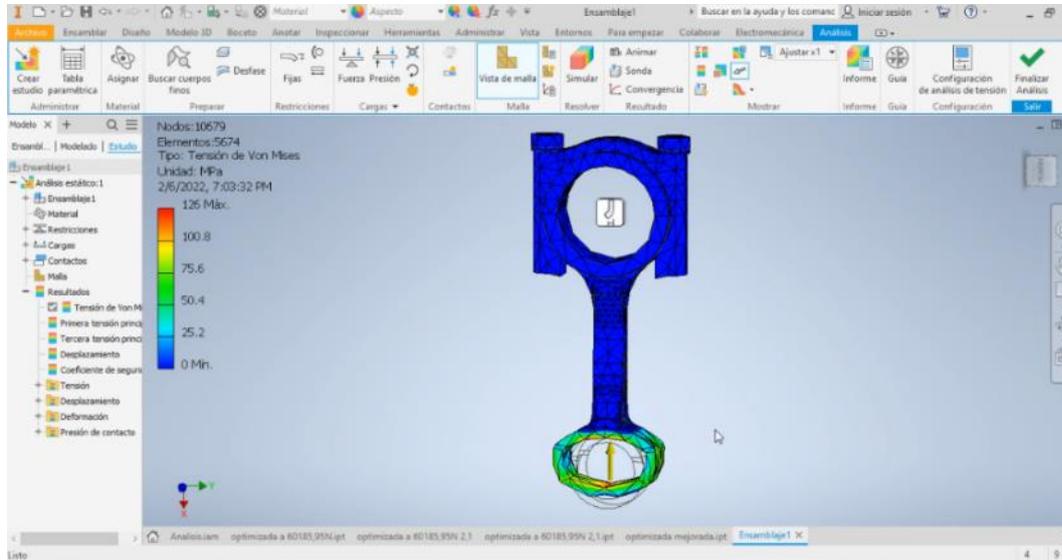
Inventor, mallado del rediseño de biela



Para luego de ingresar los mismos parámetros y valores enviar a ejecutar el análisis y obtener los resultados como se muestra en la figura 54.

Figura 54

Inventor, resultados del análisis de tensión de biela



Para de esta manera terminar con el proceso teniendo en cuenta que el valor obtenido en este caso es de una tensión máxima de 125.958 MPa.

Al igual que el análisis de tensión de la biela original se procede a generar el informe completo de la nueva biela a través del software como se puede observar en el anexo 3.

Capítulo IV

Análisis de Resultados

Luego de obtener los resultados por parte del programa Inventor aplicado a la optimización topológica de la biela del motor de combustión interna de la marca Mazda modelo BT-50 con alimentación de combustible Diésel se procede a analizar la comparativa entre los valores obtenidos con la simulación de la biela original con el modelado de la biela después de haber aplicado el proceso de optimización topológica, como se muestra en la tabla 1 y teniendo en cuenta que se utiliza el mismo material que para el caso de este estudio es de acero AISI 4340 el mismo que posee las siguientes propiedades:

- Densidad de masa: 7.85 g/cm³
- Límite de elasticidad: 1102 MPa
- Resistencia máxima a la tracción: 1171 MPa
- Módulo de Young: 207 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0.33 su
- Módulo cortante: 77.81 GPa

Tabla 1

Comparativa de Propiedades Físicas

	Propiedades Físicas	
	Biela Original	Rediseño de biela
Masa	1.31824 kg	1.06413 kg
Área	51517.7 mm ²	46957.8 mm ²
Volumen	167292 mm ³	135558 mm ³
Centro de Gravedad	X = -16.519700 mm	X = -42.0085 mm
	Y = -2.5227800 mm	Y = -17.1113 mm
	Z = -0.0203607 mm	Z = -7.32722 mm

Haciendo la comparación se puede observar que con la aplicación de una topología del 50 % y con el rediseño del modelado, lo que se logró es la reducción de masa de 0.25411 kg el mismo que corresponde a una reducción del 19,28 %, en cuanto al área su disminución es del 8,9 % y en lo concerniente al volumen es del 18,96 %, con estos valores se puede determinar que en un primer análisis se empieza a lograr un objetivo que es la reducción de masa, pero se deben tomar en cuenta los valores comparativos entre los valores que se irán analizando.

Para el análisis del estudio de elementos finitos se establecen valores físicos de que se utilizan para la simulación y entre estos están los de la configuración de la malla que son los siguientes:

- Tamaño medio del elemento: 0,1
- Tamaño mínimo del elemento: 0,2
- Factor de modificación: 1,5
- Ángulo máximo de giro: 60°

Las condiciones de simulación estructural y según los parámetros obtenidos por los caculos de cargas máximas para el estudio estático se tomó en cuenta los siguientes valores:

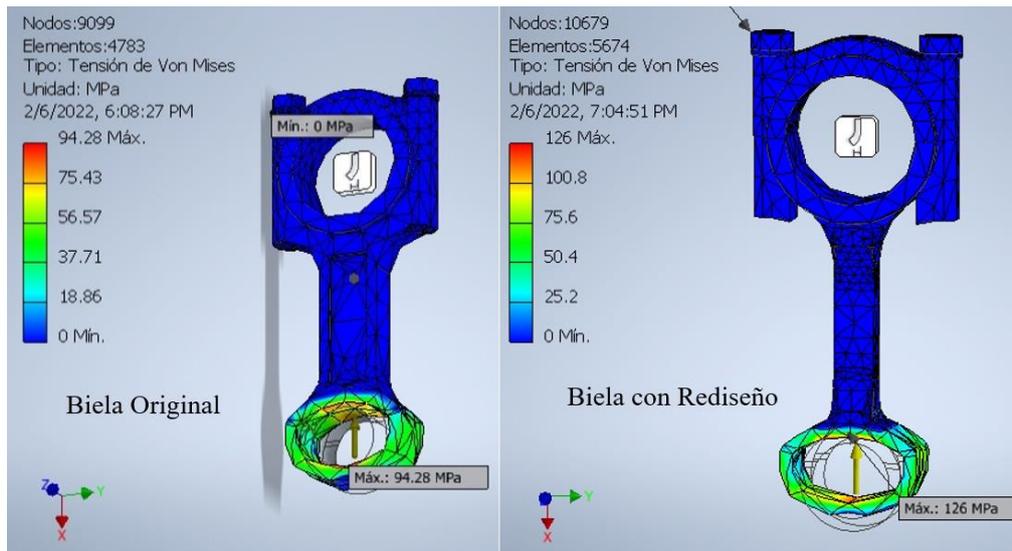
- Magnitud de la fuerza máxima generada por la combustión: 60185,95 N
- Tipos de restricción aplicados a los modelos de las bielas en estudio en sus caras fueron de: Restricción fija.
- Los contactos de bloqueo se aplicaron a todos los elementos que conforman la biela como lo son: Cuerpo de biela, bancada de biela y tornillería.

Bajo todos los parámetros iniciales expuestos los resultados que se obtuvieron tanto de la biela original, así como la de la biela con el rediseño respetando los resultados de la optimización topológica se pueden apreciar en la tabla 2.

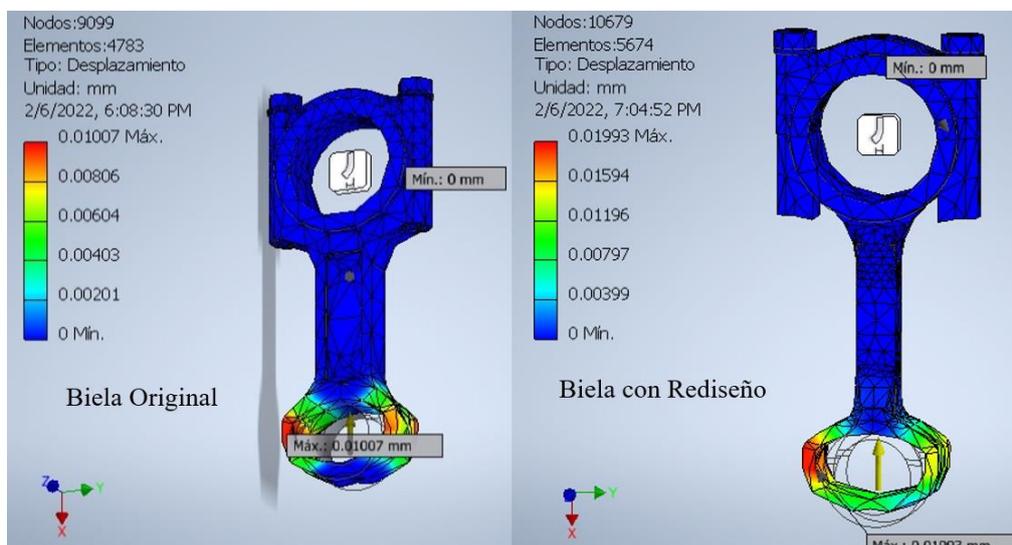
Tabla 2*Resultados comparativos de simulaciones*

Resultados generales de simulación				
Nombre	Biela original		Rediseño de biela	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Volumen	167930 mm ³		1,35557 mm ³	
Masa	1,31825 kg		1,06413 kg	
Tensión de Von Mises	0,00113 MPa	94.2845 MPa	0,000186 MPa	125,958 MPa
Primera tensión principal	-2.36093 MPa	92.8695 MPa	-4.83273 MPa	122.244 MPa
Tercera tensión principal	-27.3526 MPa	2.21038 MPa	-48.1964 MPa	4.24343 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.01007 mm	0 mm	0.0199 mm
Coefficiente de seguridad	11.688 su	15 su	8.74893 su	15 su

Para continuar con el análisis de los resultados se puede observar gráficamente en la figura 54, el valor en lo concerniente a Tensión de Von Mises que permite valorar el comportamiento de la energía de distorsión sobre la biela del motor de combustión interna al ser aplicada la fuerza o carga máxima aplicada sobre el pie de la biela a través de la convección con el bulón del motor el mismo que nos indica el comportamiento es esfuerzos sobre el elemento para lo cual en la biela original se puede ver que su valor es de 94,28 MPa y a través de colores se determina que la concentración se da en la parte inferior al pie de biela al igual que en el pie de biela del rediseño de la biela que para este caso es de 125,958 MPa y este incremento se da en un 25,2 % pero estructuralmente del esfuerzo pero no llega a ser un aspecto crítico para su desempeño, así mismo se puede observar que existe en una considerable disminución en la parte superior de la cabeza de la biela, siendo en esta sección donde la biela del motor de combustión interna presenta contacto con el muñón de la biela del cigüeñal del motor.

Figura 55*Inventor, comparativa tensión de Von Mises*

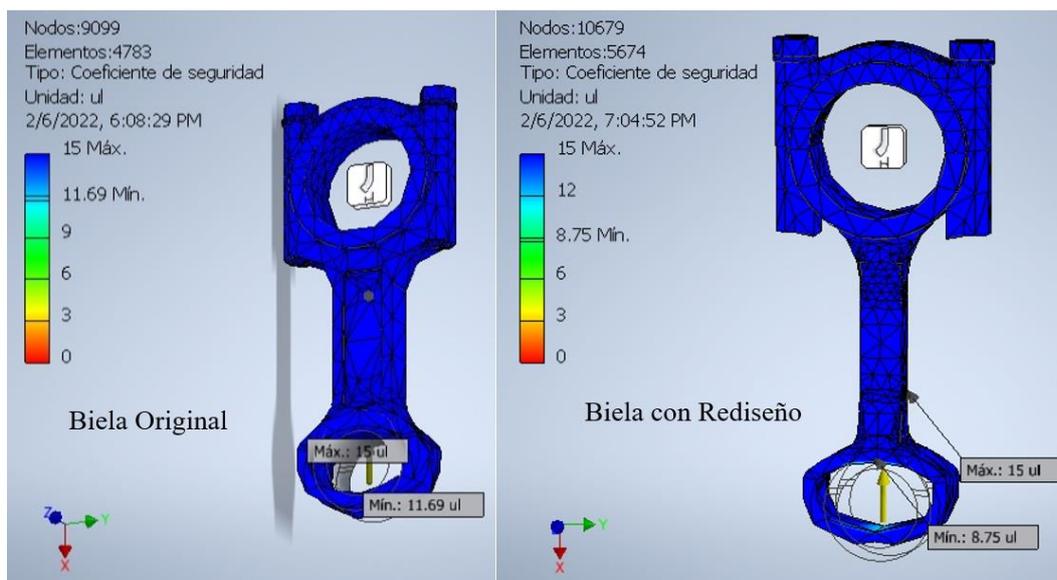
Continuando con el análisis del siguiente resultado fundamental es el del desplazamiento que soporta estructuralmente la biela al ser aplicado la carga máxima que para el caso del diseño original de la biela es de 0,01007 mm y en el estudio del rediseño de la biela su valor es de 0,0199 mm la misma que su diferencia es de 0,00983 mm sobre la parte transversal al pie de biela obteniendo una deformación de forma ovalada, siendo este valor muy bajo para el comportamiento del elemento, que se podría llegar a determinar que esa diferencia es despreciable, visualmente su comportamiento se puede apreciar en la figura 56.

Figura 56*Inventor, comparativa de desplazamiento por carga máxima*

Para finalizar con uno de los valores fundamentales es el de coeficiente de seguridad el mismo que es el mismo para los dos modelos tanto para la biela original como para el rediseño de la biela siendo este valor máximo de 15 su, y como valores mínimos de 11,688 su y 8,75 su, como se muestra en la figura 57, estos valor nos indica que el elemento presenta un muy buen aspecto de seguridad ya que son valores superior a 1 y esto nos indica seguridad ante el fallo del elemento que es un aspecto muy importante en aspectos de diseño dándonos seguridad.

Figura 57

Inventor, comparativa de coeficiente de seguridad



Conclusiones

Con el presente estudio investigativo permitió llegar a la conclusión que al aplicar la optimización topológica direccionada a una biela del motor de combustión interna del vehículo Mazda BT-50 alimentada con combustible Diésel se disminuyó su peso en un 25,2 % por medio de un rediseño y aplicación de un análisis de elementos finitos a través del software Inventor, así mismo al ser aplicada su carga máxima generada por la combustión en la fase de trabajo del motor de 60185,95 N, el rediseño apenas adquiere una deformación de 0,00983 mm en las partes laterales del pie de biela, por lo que se determina que al ser aplicada esa carga no afecta al funcionamiento del elemento cuanto este se encuentre en modo operativo.

Otro valor importante que se percibe sobre la seguridad estructural del elemento ante cualquier falla fue el valor obtenido de coeficiente de seguridad que se presento en un rango mínimo de 8,75 y máximo de 15, el mismo que es mayor a 1, lo que permite establecer que el rediseño de biela es confiable, ante cualquier condición de trabajo.

Finalmente se puede concluir sin duda alguna que este método es muy importante al momento de rediseñar cualquier elemento en la industria automotriz logrando que sus autopartes sean mas ligeras y por ende la eficiencia del motor mejore.

Recomendaciones

Como recomendación principal es que para este tipo de trabajos se requiere de computadoras con muy buenas características como lo es su procesador, memoria, tarjeta gráfica, entre otras características ya que las interacciones o procesos demanda altos recursos del equipo según el tipo de análisis, así mismo que el software brinde las mejores herramientas para alcanzar el objetivo, siendo este determinado de acuerdo al algoritmo con el que se trabaje y el alto conocimiento del programa por parte del diseñador, lo que permitirá un correcto rediseño así con un análisis óptimo del estudio.

También se recomienda que el rediseño sea aplicable a los procesos de manufactura esto quiere decir que no debe ser demasiado orgánico o complejo.

Bibliografía

- Appol, H. (1984). *Tecnología de los metales para profesiones técnico mecánicas*. Barcelona : REVERTÉ.
- BOSCH. (1999). *Manual de la técnica del automóvil*. Barcelona: REVERTÉ.
- Callister, W. (2007). *Introducción a la ciencia de los materiales I*. Barcelona: REVERTÉ.
- Cerrolaza, M. (2007). *El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- González, A. (2016). *Diseño de una biela para un motor de combustión*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Lozano, D., Velázquez, F., & Zepeda, A. (2010). Optimización estructural de forma en el diseño de cavidades en elementos planos mediante algoritmos evolutivos. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional.*, 1143-1159.
- Mena, E. (2017). *Optimización estructural topológica de las manguetas delanteras para un vehículo prototipo Formula Student mediante el análisis de elementos finitos* . Quito: UISEK.
- Meza, C. (2012). *Optimización topológica en el diseño de elementos estructurales mecánicos*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Meza, C. A., Tamayo, F., & Franco, E. E. (2015). El Hombre y la Máquina. *Redalyc*, 72-79.
- Montes, M., Cintas, J. M., & Cueva, J. (2014). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Madrid: Paraninfo.
- Morillo, V. (2017). *Determinación de la carga mecánica máxima que soportan las bielas del motor de una camioneta Mazda BT-50 diésel mediante ensallos*

estáticos de esfuerzo experimental y por elementos finitos. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.

Reyes, G., Cañizares, F., Villacres, A., & Noroña, M. (2017). Análisis mecánico del brazo de biela mediante norma ASTM e8. *INNOVA Research Journal*, 190-204.

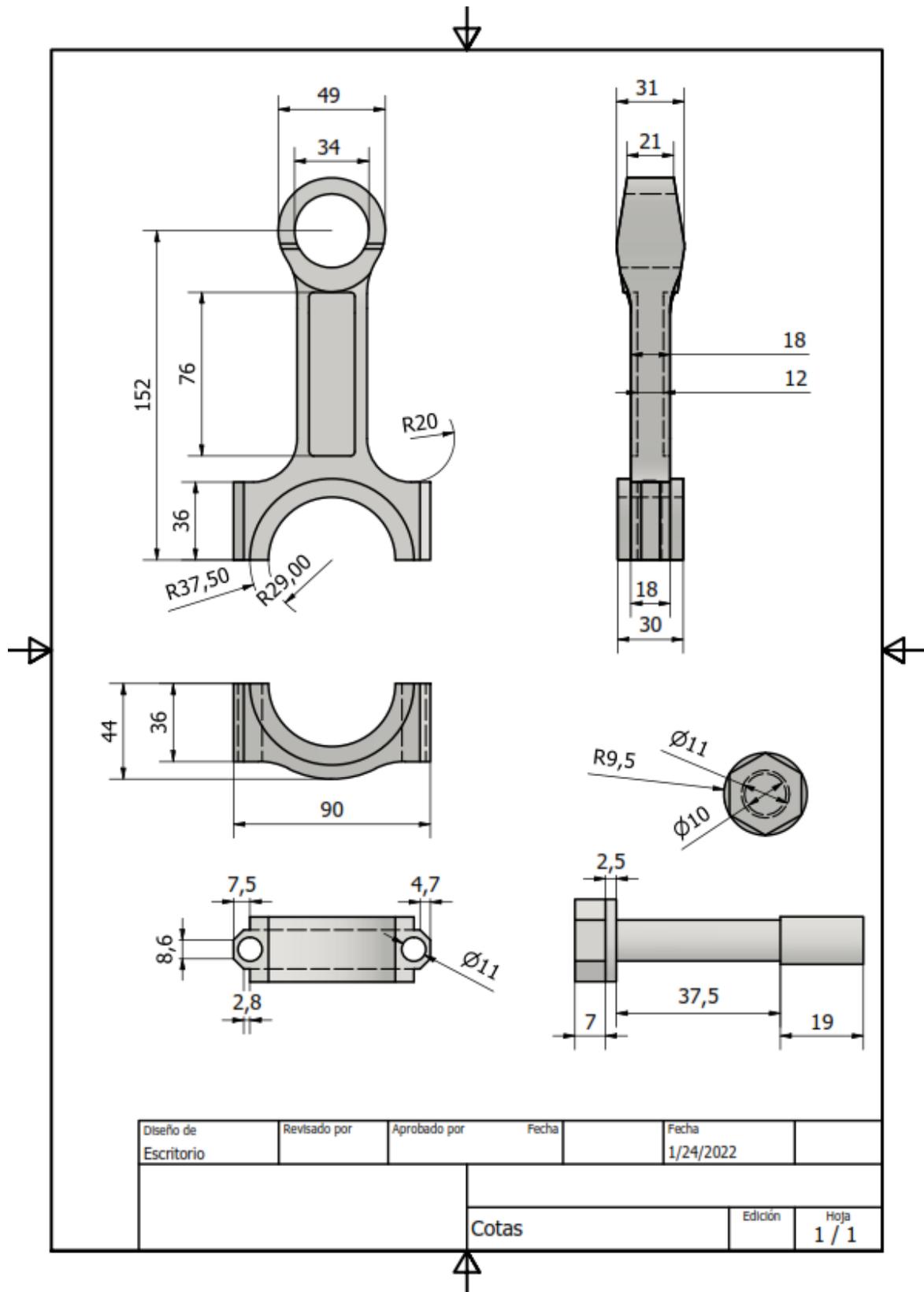
Román, A. (2018). *Implementación en Matlab de un procedimiento de optimización topológica para estructuras con cargas térmicas*. Bilbao: Escuela de ingeniería de Bilbao.

Salazar, T. (2007). *Resistencia de Materiales Básica para Estudiantes de Ingeniería*. Manizales: Universal Nacional de Colombia.

UNLP. (2015). Tipos de acero según su composición de carbono. *Clase 8 / Soldadura*, 1-12.

Anexos

Anexo 1: Plano con Forma y Dimensión de Biela de Motor Mazda BT-50



Diseño de Escritorio	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
				1/24/2022	
			Cotas	Edición	Hoja
					1 / 1

Anexo 2: Informe Completo Análisis Estructural Biela Original

Informe de análisis de tensión



Archivo analizado:	Analisis.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2022 (Build 260153000, 153)
Fecha de creación:	2/6/2022, 6:08 PM
Autor del estudio:	Stalin Beltrán
Resumen:	Biela Mazda BT-50

Análisis estático:1

Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	2/6/2022, 6:07 PM
Estado de modelo	Principal
Vista de diseño	Por defecto
Posicional	Principal
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

Propiedades

Resumen

Autor	Dns
-------	-----

Proyecto

Nº de pieza	Ensamblaje1
Diseñador	Dns
Coste	\$0.00
Fecha de creación	1/20/2022

Estado

Estado del diseño	Trabajo en curso
-------------------	------------------

Propiedades físicas

Masa	1.31824 kg
Área	51517.7 mm ²
Volumen	167929 mm ³
Centro de gravedad	x=-16.5197 mm y=-2.52278 mm z=-0.0203607 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

Material(es)

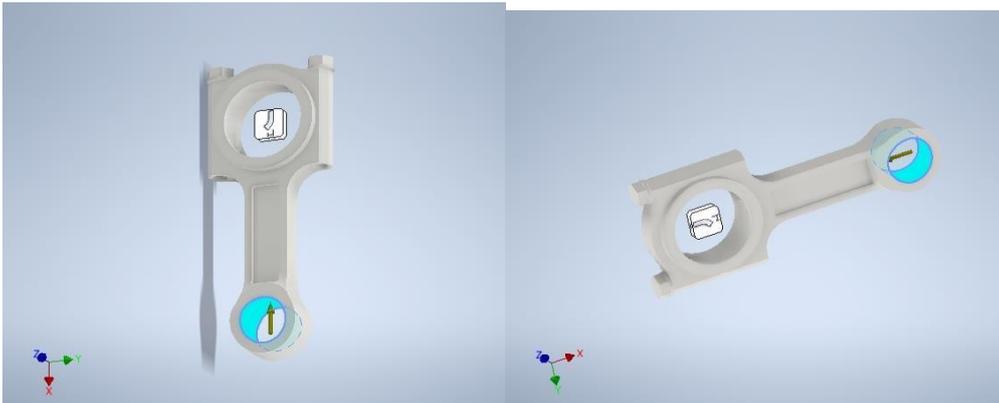
Nombre	Acero AISI 4340 350A RT	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	1102 MPa
	Resistencia máxima a tracción	1171 MPa
Tensión	Módulo de Young	207 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.33 su
	Módulo cortante	77.8195 GPa
Nombre(s) de pieza	perno.ipt, sombrerete.ipt alterna.ipt	

Condiciones de funcionamiento

Fuerza:1

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	60185.950 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	0.000 N
Vector Z	60185.950 N

Cara(s) seleccionada(s)



Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija

Cara(s) seleccionada(s)



Contactos (Bloqueado)

Nombre	Nombre(s) de pieza
Bloqueado:1	alterna:1 sombrerete:1
Bloqueado:2	alterna:1 perno:1
Bloqueado:3	alterna:1 perno:2
Bloqueado:4	alterna:1 sombrerete:1
Bloqueado:5	sombrerete:1 perno:2
Bloqueado:6	perno:1 sombrerete:1

Resultados**Fuerza y pares de reacción en restricciones**

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	2644.62 N	2644.62 N	0.288489 N m	0 N m
		0 N		0 N m
		0 N		0.288489 N m

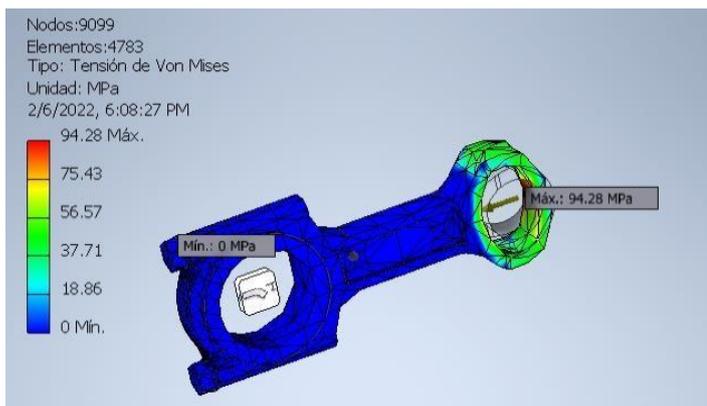
Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	167930 mm ³	
Masa	1.31825 kg	
Tensión de Von Mises	0.00113217 MPa	94.2845 MPa
Primera tensión principal	-2.36093 MPa	92.8695 MPa
Tercera tensión principal	-27.3526 MPa	2.21038 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.0100718 mm
Coefficiente de seguridad	11.688 su	15 su
Tensión XX	-23.9881 MPa	56.245 MPa

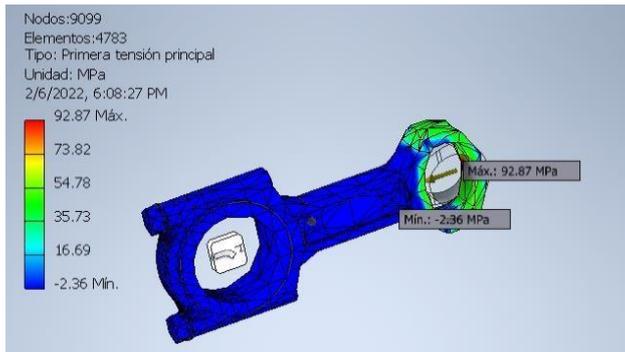
Tensión XY	-40.5993 MPa	42.3232 MPa
Tensión XZ	-9.22459 MPa	8.98076 MPa
Tensión YY	-25.9358 MPa	92.8665 MPa
Tensión YZ	-8.03963 MPa	6.19845 MPa
Tensión ZZ	-6.55428 MPa	10.5548 MPa
Desplazamiento X	-0.00450095 mm	0.0004452 mm
Desplazamiento Y	-0.00994846 mm	0.00959 mm
Desplazamiento Z	-0.00137433 mm	0.0013075 mm
Deformación equivalente	0.000000004 su	0.00041028 su
Primera deformación principal	0.000000002 su	0.00044775 su
Tercera deformación principal	-0.000221615 su	-0.000000004 su
Deformación XX	-0.000220805 su	0.000274878 su
Deformación XY	-0.000260856 su	0.000271932 su
Deformación XZ	-0.000059269 su	0.000057702 su
Deformación YY	-0.000161523 su	0.000447734 su
Deformación YZ	-0.000051655 su	0.000039825 su
Deformación ZZ	-0.000100711 su	0.000025995 su
Presión de contacto	0 MPa	0.866742 MPa
Presión de contacto X	-0.557918 MPa	0.756776 MPa
Presión de contacto Y	-0.429604 MPa	0.388313 MPa
Presión de contacto Z	-0.0600952 MPa	0.166567 MPa

Figuras

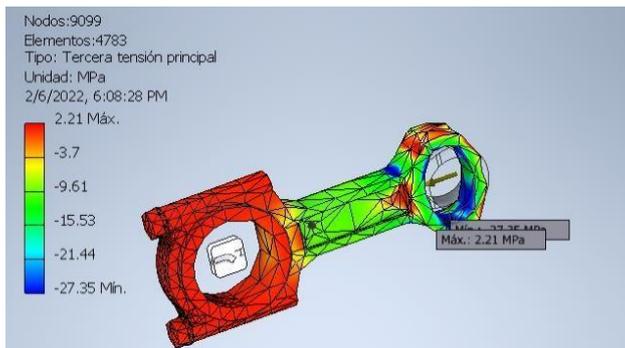
Tensión de Von Mises



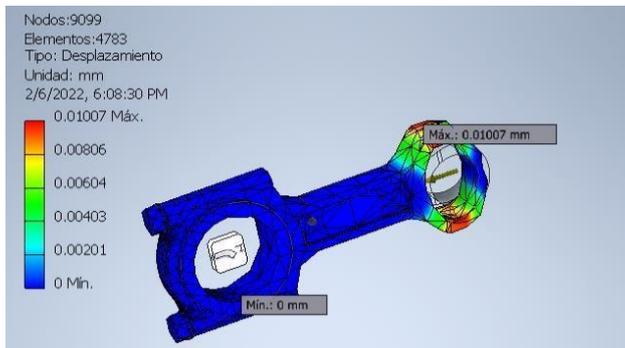
Primera tensión principal



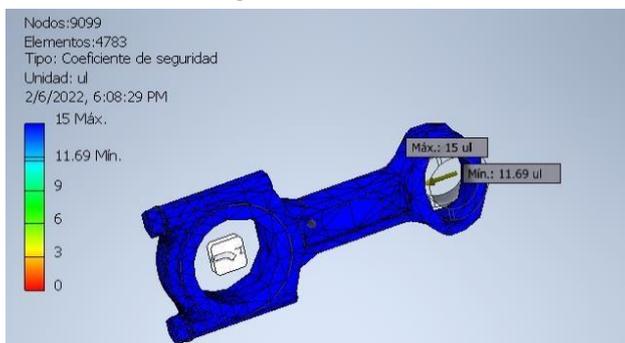
Tercera tensi3n principal



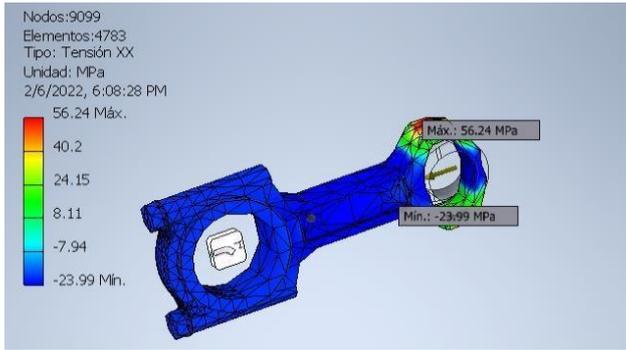
Desplazamiento



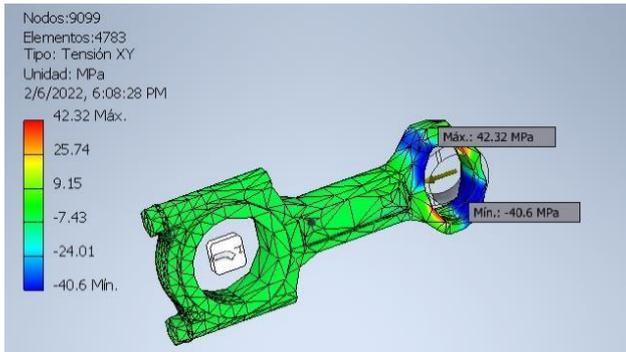
Coefficiente de seguridad



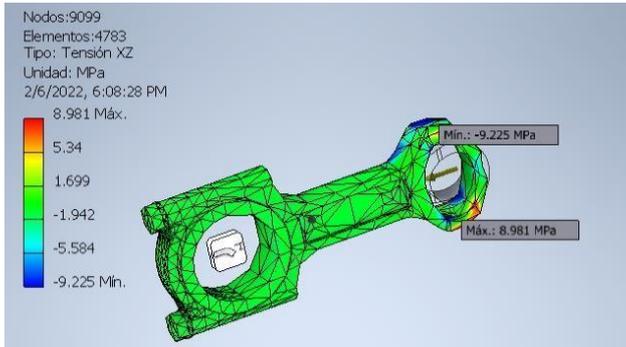
Tensión XX



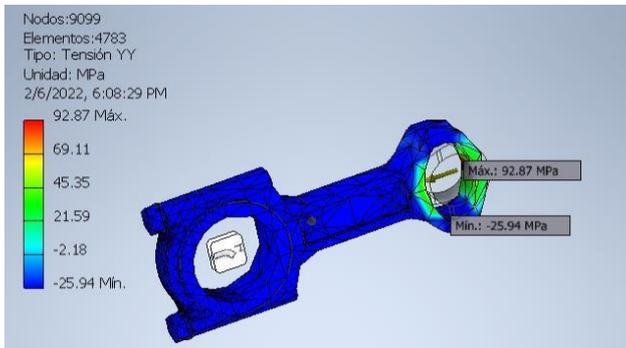
Tensión XY



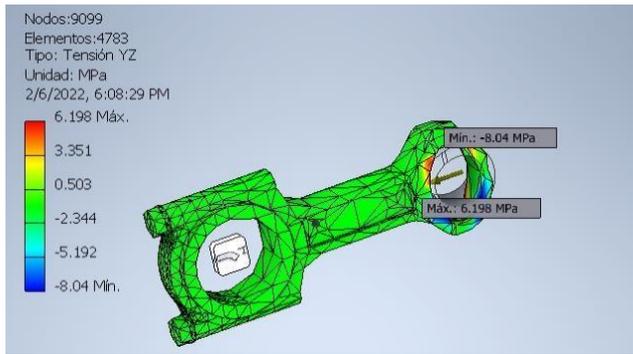
Tensión XZ



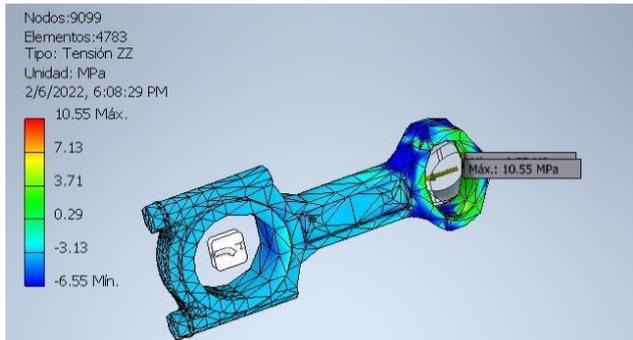
Tensión YY



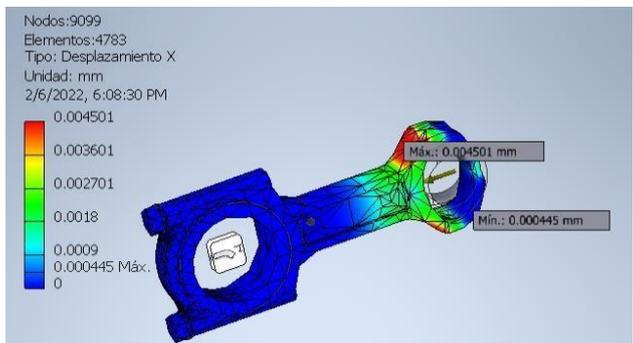
Tensión YZ



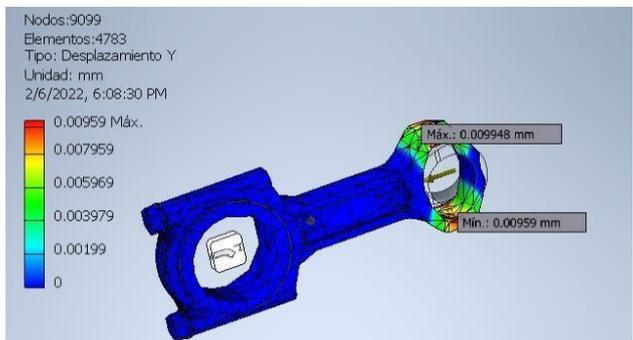
Tensión ZZ



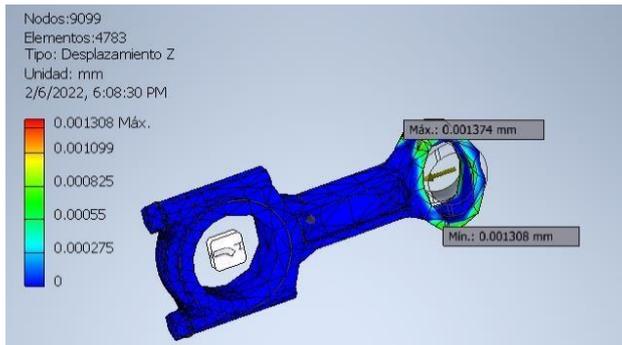
Desplazamiento X



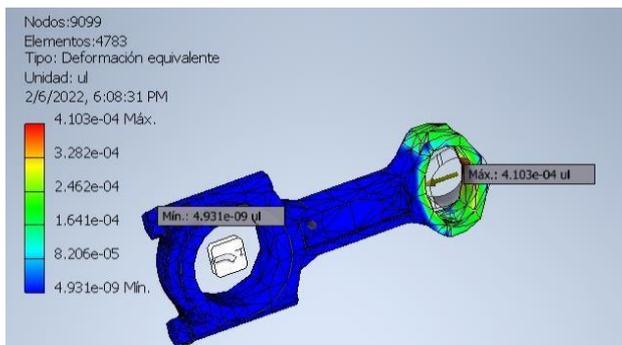
Desplazamiento Y



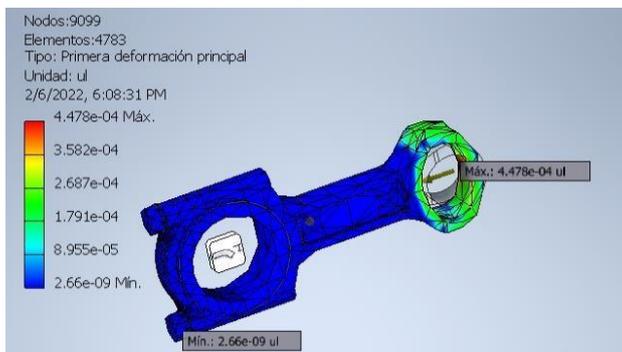
Desplazamiento Z



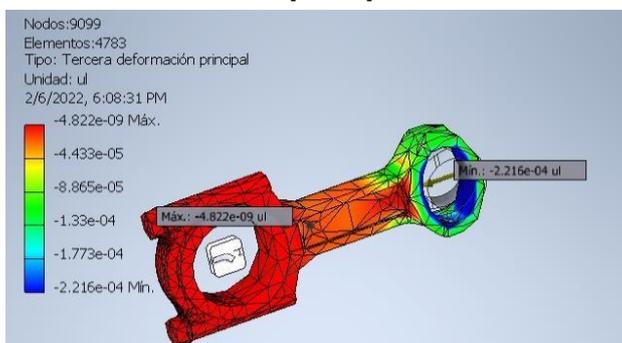
Deformación equivalente



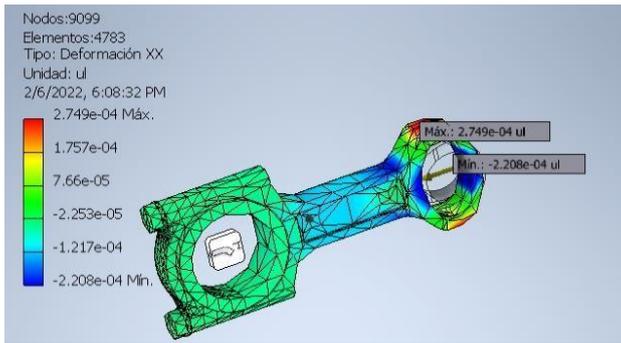
Primera deformación principal



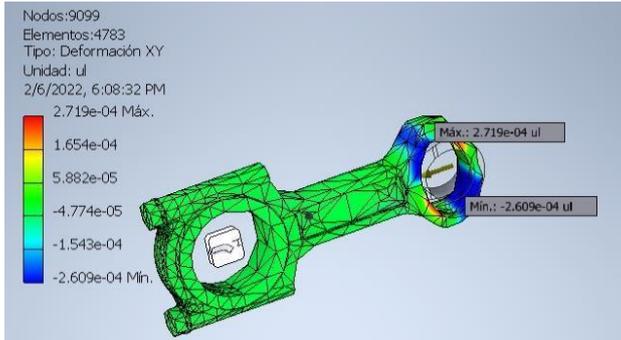
Tercera deformación principal



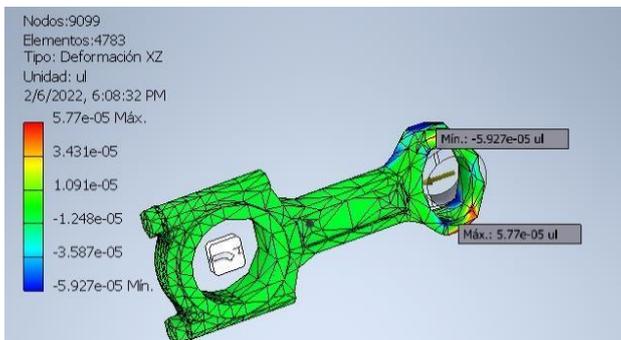
Deformación XX



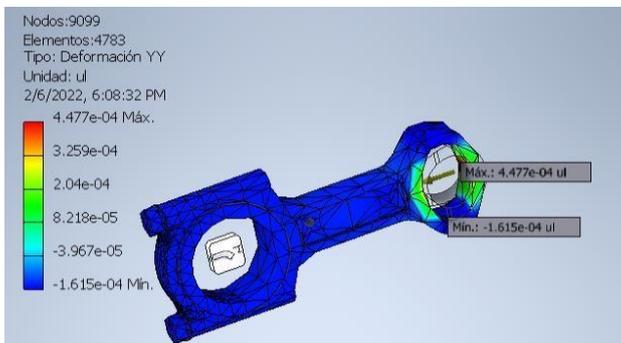
Deformación XY



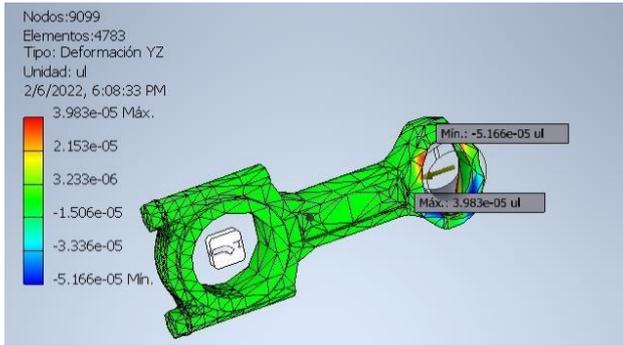
Deformación XZ



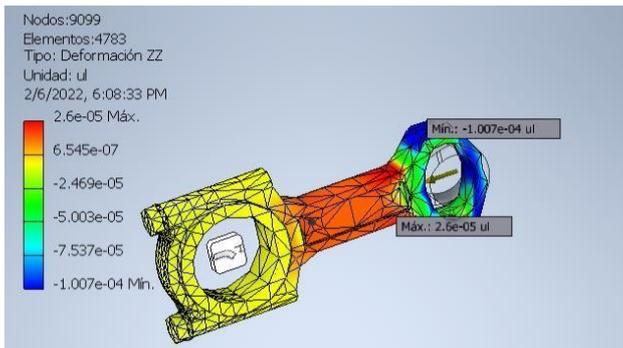
Deformación YY



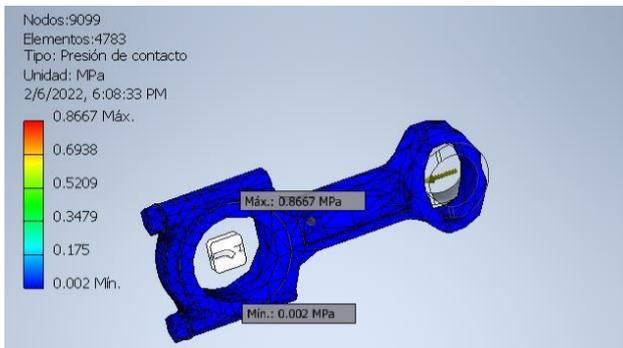
Deformación YZ



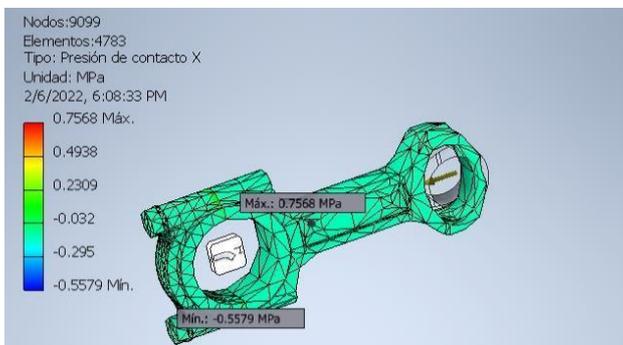
Deformación ZZ



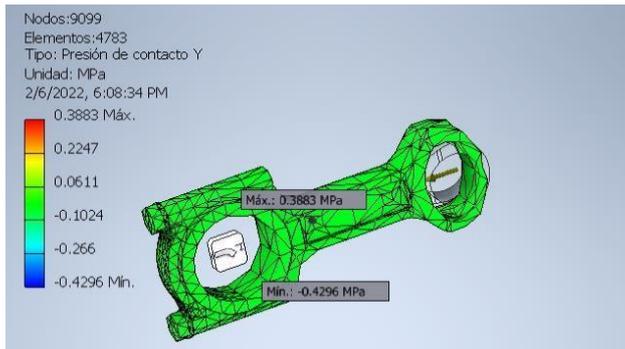
Presión de contacto



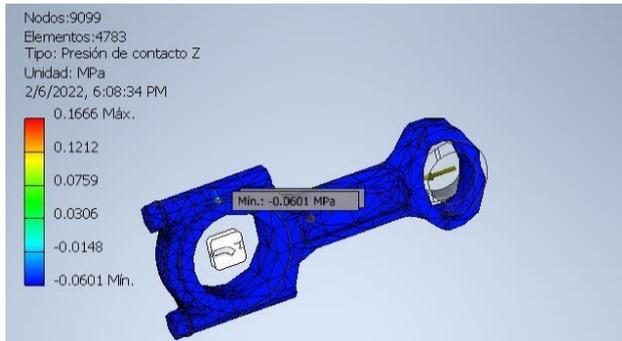
Presión de contacto X



Presión de contacto Y



Presión de contacto Z



Anexo 3: Informe Completo Análisis Estructural de Rediseño de Biela

Informe de análisis de tensión



Archivo analizado:	
Versión de Autodesk Inventor:	2022 (Build 260153000, 153)
Fecha de creación:	2/6/2022, 7:04 PM
Autor del estudio:	Stalin Beltrán
Resumen:	Optimización Topológica Biela

Análisis estático:1

Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	2/6/2022, 7:03 PM
Estado de modelo	Principal
Vista de diseño	Por defecto
Posicional	Principal
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

Propiedades Resumen

Autor	Escritorio
-------	------------

Proyecto

Diseñador	Escritorio
Coste	\$0.00
Fecha de creación	2/6/2022

Estado

Estado del diseño	Trabajo en curso
-------------------	------------------

Propiedades físicas

Masa	1.06413 kg
Área	46957.8 mm ²
Volumen	135558 mm ³
Centro de gravedad	x=-42.0085 mm y=-17.1113 mm z=-7.32722 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

Configuración de malla:

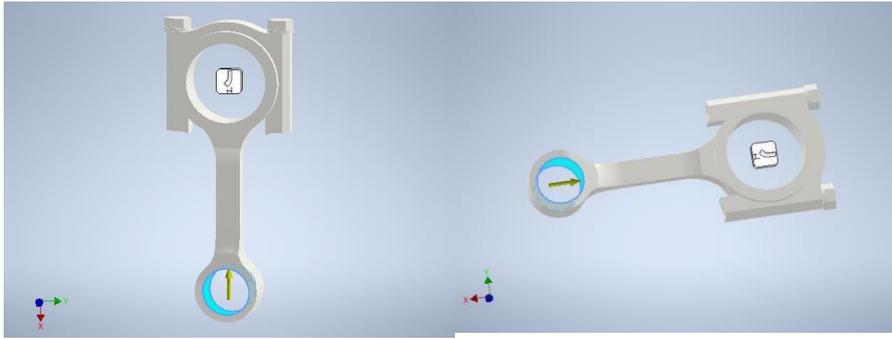
Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

Material(es)

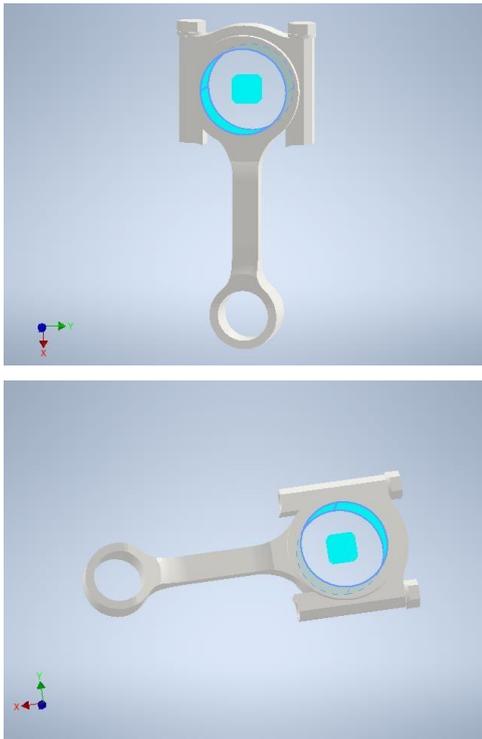
Nombre	Acero AISI 4340 350A RT	
General	Densidad de masa	7.85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	1102 MPa
	Resistencia máxima a tracción	1171 MPa
Tensión	Módulo de Young	207 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.33 su
	Módulo cortante	77.8195 GPa
Nombre(s) de pieza	perno.ipt sombrerete.ipt optimizada mejorada.ipt	

Condiciones de funcionamiento**Fuerza:1**

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	60185.950 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-4563.270 N
Vector Z	60012.708 N

Cara(s) seleccionada(s)**Restricción fija:1**

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

Cara(s) seleccionada(s)**Contactos (Bloqueado)**

Nombre	Nombre(s) de pieza
Bloqueado:1	optimizada mejorada:1 sombbrero:1
Bloqueado:2	optimizada mejorada:1 perno:2
Bloqueado:3	optimizada mejorada:1 perno:1

Bloqueado:4	optimizada mejorada:1 sombbrero:1
Bloqueado:5	sombbrero:1 perno:2
Bloqueado:6	perno:1 sombbrero:1
Bloqueado:7	perno:1 sombbrero:1

Resultados

Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	2644.62 N	2644.62 N	0.689Nm	0 Nm
		0 N		-0.663Nm
		0 N		0.189 Nm

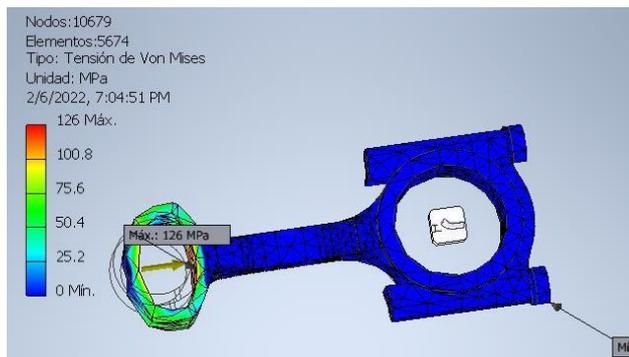
Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	135557 mm ³	
Masa	1.06413 kg	
Tensión de Von Mises	0.000186385 MPa	125.958 MPa
Primera tensión principal	-4.83273 MPa	122.244 MPa
Tercera tensión principal	-48.1964 MPa	4.24343 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.0199259 mm
Coefficiente de seguridad	8.74893 su	15 su
Tensión XX	-40.8861 MPa	90.4911 MPa
Tensión XY	-56.1701 MPa	54.1245 MPa
Tensión XZ	-12.0638 MPa	13.4449 MPa
Tensión YY	-29.2707 MPa	121.763 MPa
Tensión YZ	-11.086 MPa	14.7904 MPa
Tensión ZZ	-16.7308 MPa	18.3901 MPa
Desplazamiento X	-0.0120561 mm	0.000000110 mm
Desplazamiento Y	-0.0180414 mm	0.0142551 mm

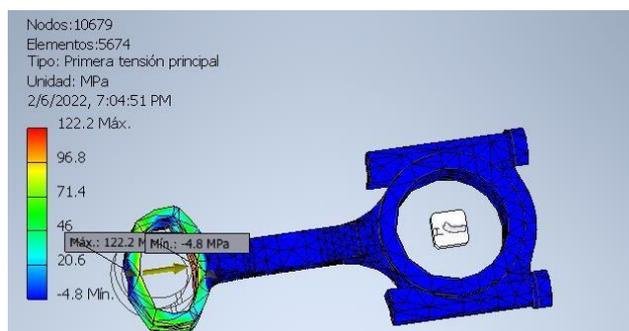
Desplazamiento Z	-0.00334902 mm	0.00324059 mm
Deformación equivalente	0.000000000798 744 su	0.000545162 su
Primera deformación principal	0.000000000398 393 su	0.000586045 su
Tercera deformación principal	-0.000293927 su	0.0000000001064 15 su
Deformación XX	-0.000265841 su	0.00043291 su
Deformación XY	-0.000360899 su	0.000347757 su
Deformación XZ	-0.0000775113 su	0.0000863848 su
Deformación YY	-0.000169634 su	0.000567272 su
Deformación YZ	-0.0000712291 su	0.0000950301 su
Deformación ZZ	-0.000150941 su	0.0000476306 su
Presión de contacto	0 MPa	0.225469 MPa
Presión de contacto X	-0.074216 MPa	0.149593 MPa
Presión de contacto Y	-0.148092 MPa	0.168682 MPa
Presión de contacto Z	-0.027462 MPa	0.0464872 MPa

Figuras

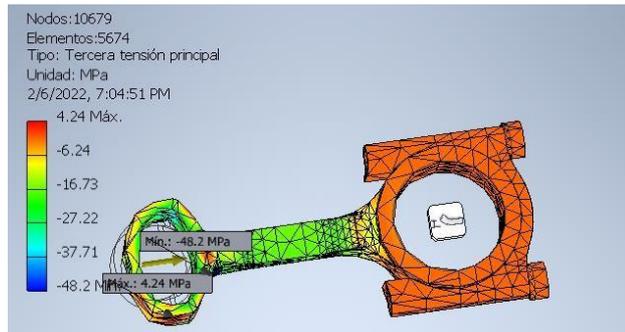
Tensión de Von Mises



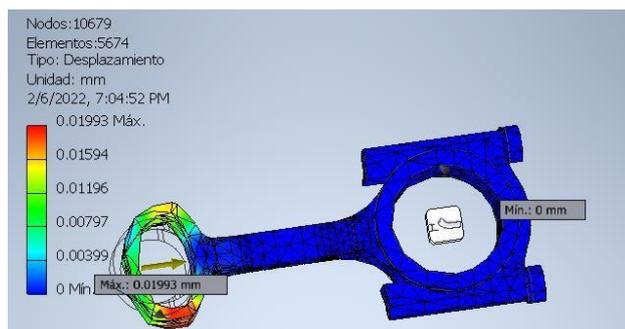
Primera tensión principal



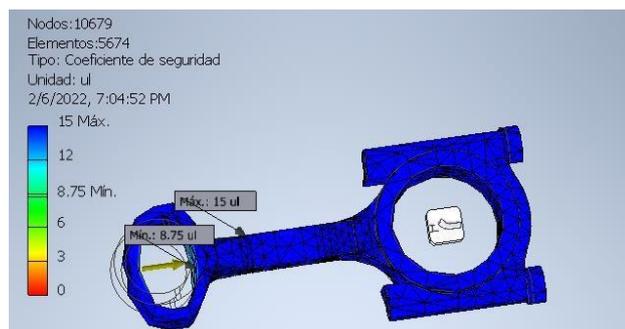
Tercera tensión principal



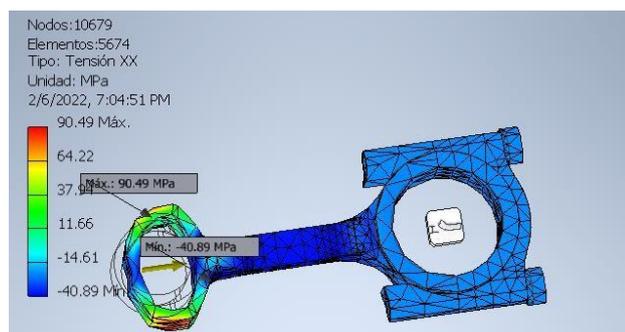
Desplazamiento



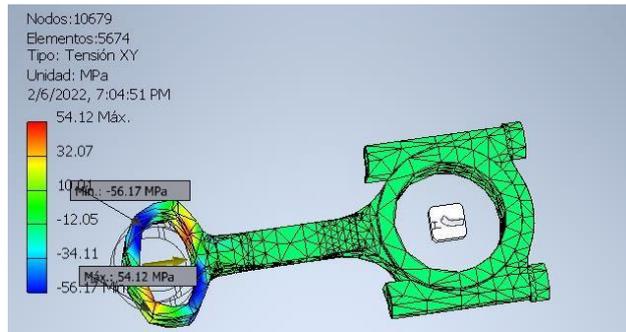
Coefficiente de seguridad



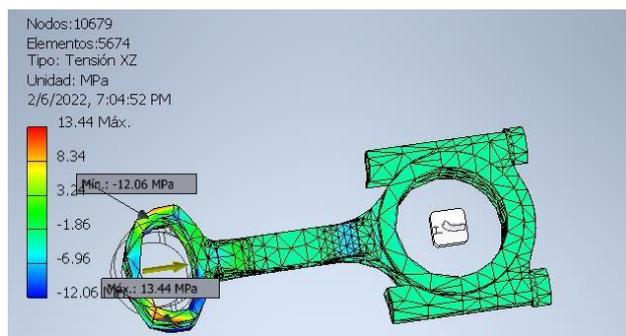
Tensión XX



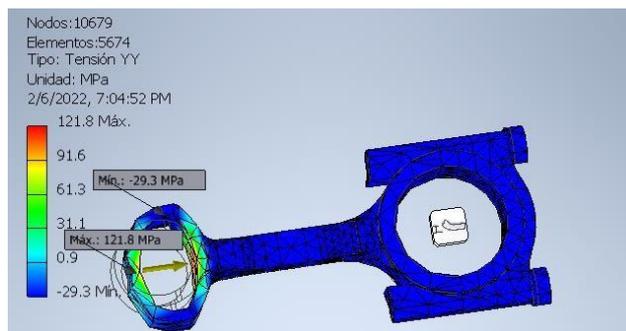
Tensión XY



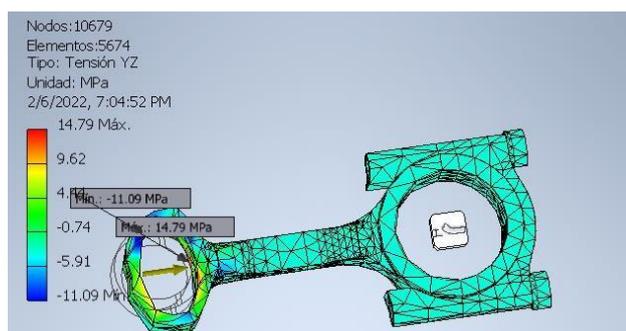
Tensión XZ



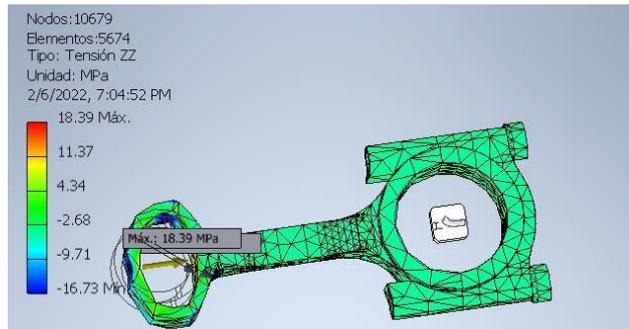
Tensión YY



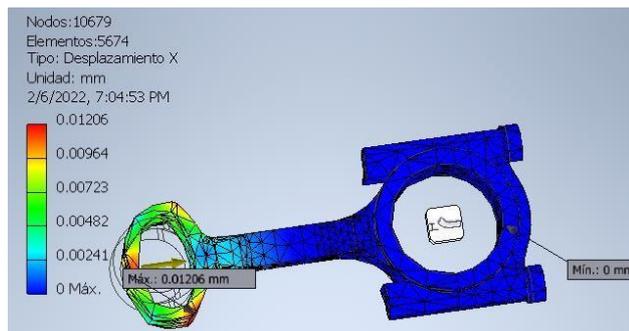
Tensión YZ



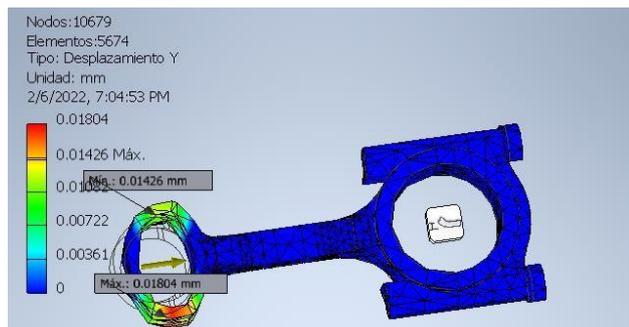
Tensión ZZ



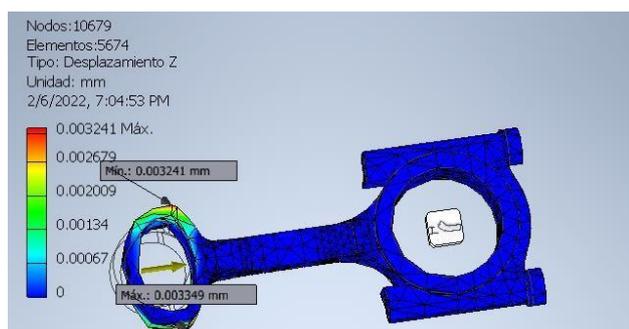
Desplazamiento X



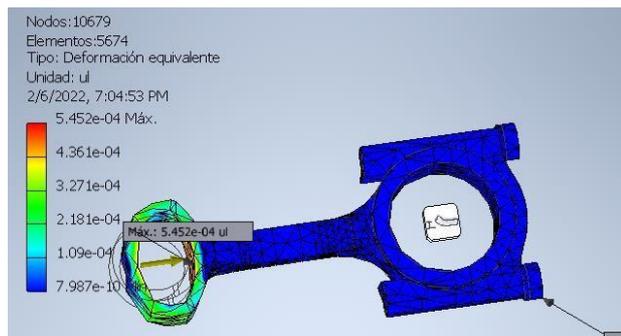
Desplazamiento Y



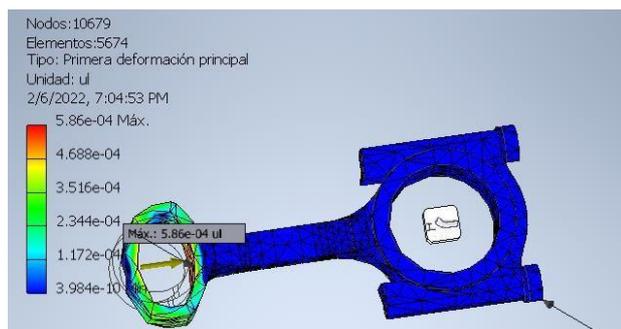
Desplazamiento Z



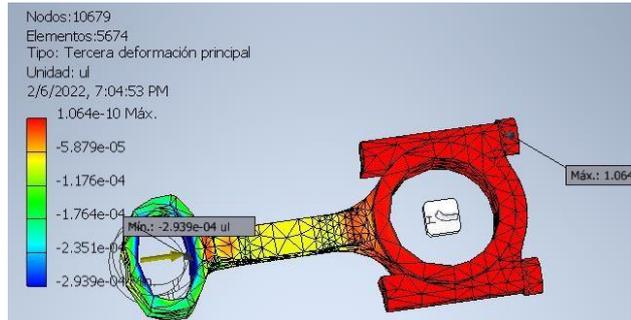
Deformación equivalente



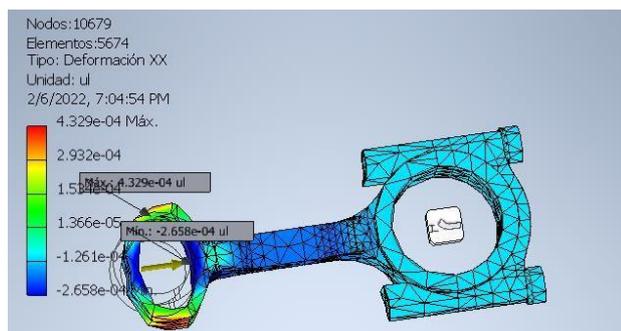
Primera deformación principal



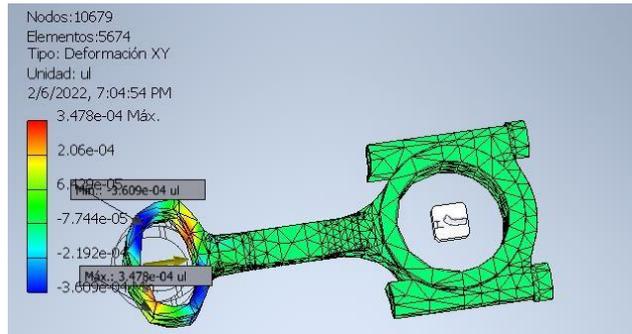
Tercera deformación principal



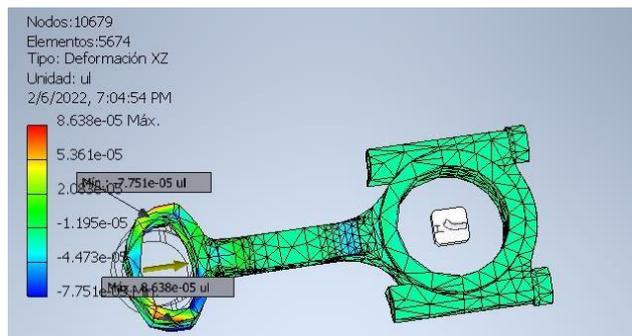
Deformación XX



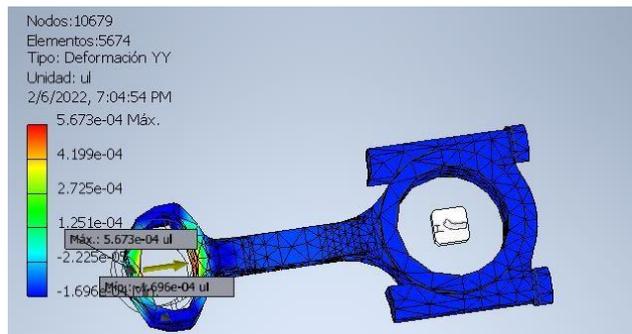
Deformación XY



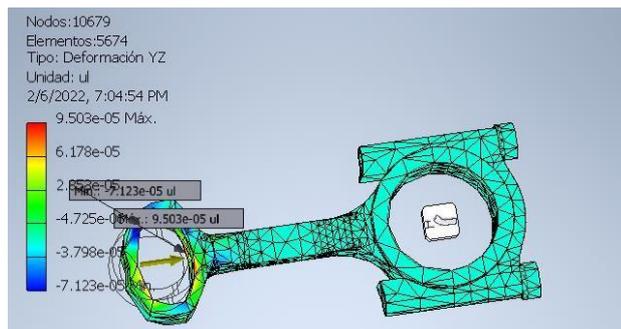
Deformación XZ



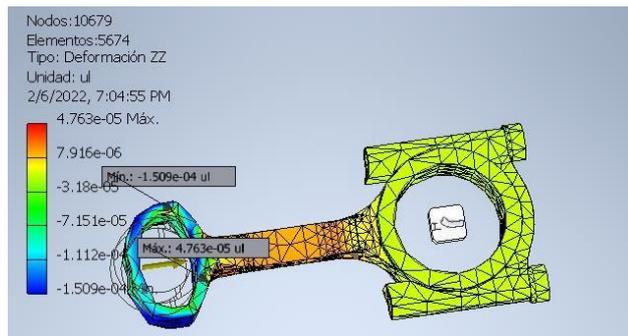
Deformación YY



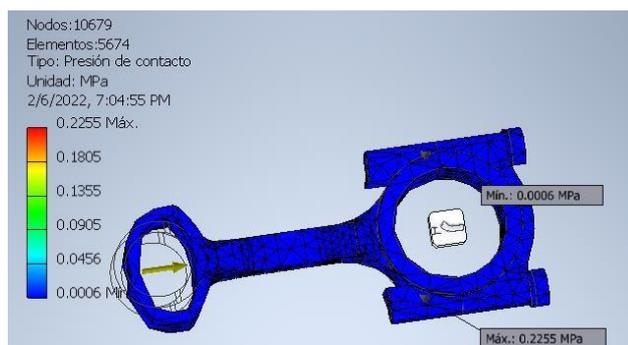
Deformación YZ



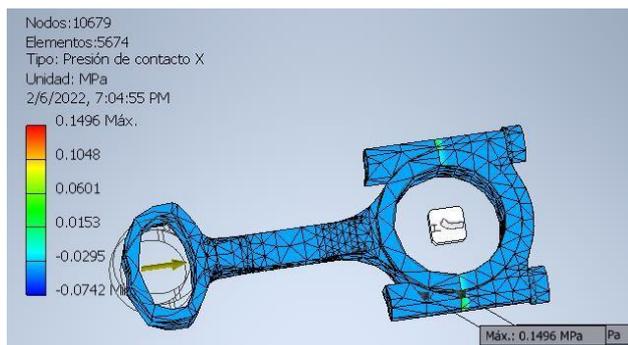
Deformación ZZ



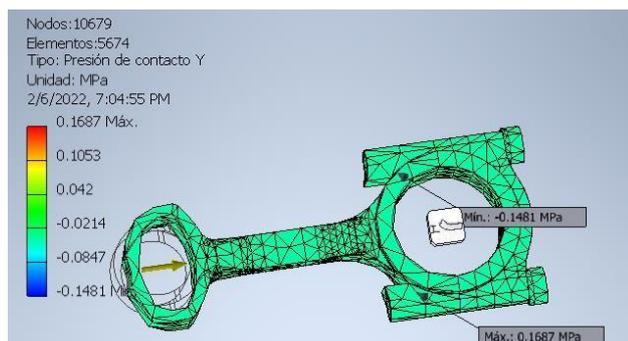
Presión de contacto



Presión de contacto X



Presión de contacto Y



Presión de contacto Z

