



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECÁNICA

AUTOMOTRIZ

**Optimización topológica de un brazo oscilante posterior de una
motocicleta.**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Autor:

CARLOS MIGUEL PELAEZ TELLO

Director:

ROBERT ESTEBAN ROCKWOOD IGLESIAS

CUENCA, ECUADOR

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres que con mucho esfuerzo y sacrificio me ayudaron para poder culminar con mis estudios.

A mis maestros que con sus enseñanzas aportaron un granito de arena para poder ser cada día mejor.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer este trabajo en primer lugar a Dios por permitirme cada día crecer como persona y como profesional.

A mis padres Ángel y Soledad, por ser el pilar para salir adelante, a mis hermanos Fátima, Diego y Doris por el apoyo y motivación constante.

Al Ing. Robert Rockwood por el incondicional apoyo durante la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE UN BRAZO OSCILANTE POSTERIOR DE UNA MOTOCICLETA	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	3
1.1 Generalidades.....	3
1.1.1 Objetivo General.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2 Problemática	3
1.2.1 Pregunta de investigación.....	3
1.3 Marco teórico y estado de arte	4
1.3.1 Marco teórico	4
1.3.1.1 Optimización (optimizar).....	4
1.4 Procesos de diseño tradicional y con optimización	6
1.5 Optimización estructural	6
1.5.1 Optimización de tamaño.....	6
1.5.2 Optimización de la geometría.....	7
1.5.3 Optimización topológica	7
1.6 Proceso.....	10
1.7 Estado del arte.....	12
CAPITULO 2	23
ANALISIS DE LAS CARGAS QUE SOPORTA EL BRAZO OSCILANTE PREVIO AL PROCESO DE OPTIMIZACION.....	23
2.1 Especificaciones de la motocicleta. (UDA., 2016)	23

2.2 Dimensiones generales.....	24
2.3 Centro de masa con piloto.....	24
2.4 Ejes de movimiento.....	25
2.5 Dinámica de la motocicleta.....	26
2.5.1 Ecuación a velocidad constante.....	26
2.5.1.1 Fuerzas presentes:	26
2.5.1.2 Nomenclatura	27
2.5.1.3 Ecuaciones de equilibrio	27
2.5.2 Aceleración por límite de tracción.....	29
2.5.3 Aceleración limite por “ <i>Wheeling</i> ”	30
2.5.4 Movimiento curvilíneo.....	32
2.5.4.1 Angulo ideal de inclinación.....	32
2.6 Hipótesis de carga	33
2.6.1 Cargas aplicadas sobre el brazo oscilante	34
2.6.2 Aceleración en línea recta	35
2.6.3 Aceleración lateral en curva	36
2.6.4 Diagrama de cuerpo libre para cargas laterales.....	38
CAPITULO 3	40
3. Proceso De Optimización Topológica	40
3.1 Introducción	40
3.2 Generación del mallado.....	42
3.3 Tamaño del elemento	42
3.4 Calidad de mallado.....	43
3.5 Análisis preliminar.....	45
3.5.1 Zonas de diseño y no diseño	45
3.5.2 Cargas.....	46
3.5.3 Restricciones de manufactura.....	47

3.5.4	Propiedades del material	47
3.5.4.1	Aptitudes tecnológicas	47
3.5.5	Resultados	48
3.6	Optimización con restricción de manufactura en el plano XY	48
3.7	Optimización con restricción de manufactura en el plano YZ.....	54
CAPITULO 4		58
4.	Validación	58
4.1	Esfuerzos	58
4.1.1	En la optimización en el plano YZ.....	58
4.1.1.1	En la optimización en el plano YZ en condición de curva.....	58
4.1.1.2	En la optimización en el plano YZ en condición Estática.....	59
4.1.2	En la optimización en el plano XY	60
4.1.2.1	En la optimización en el plano XY en condición de Curva	60
4.1.2.2	En la optimización en el plano XY en condición Estático	61
4.1.3	Deformación en la optimización en el plano YZ	62
4.1.3.1	Deformación en optimización del plano YZ en condición de curva.....	62
4.1.3.2	Deformación en optimización del plano YZ en condición estático	63
4.1.4	Deformación en la optimización en el plano XY.....	63
4.1.4.1	Deformación en optimización del plano XY en condición de Curva.....	63
4.1.4.2	Deformación en optimización del plano XY en condición Estático	64
4.2	RESULTADOS.....	65
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		66

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 PLANTEAMIENTO DE OPTIMIZACIÓN – LARSSON.	16
TABLA 2 PLANTEAMIENTO DE OPTIMIZACIÓN - OCHOA.....	19
TABLA 3 PLANTEAMIENTO DE OPTIMIZACION - REYES.....	22
TABLA 4 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PARA UNA MOTOCICLETA DAKAR (UDA,2016).....	23
TABLA 5 NOMENCLATURA EN ECUACIONES.	27
TABLA 6 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE MALLA MEDIANTE LOS VALORES DE PARÁMETROS.	44
TABLA 7 VALORES ACEPTABLE DE MALLA (ALTAIR, UNIVERSITY)	44
TABLA 8 PROPIEDADES DEL ALUMINIO. 6061	47
TABLA 9 PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS A TEMP. 20°C	47
TABLA 10 RESUMEN DE RESULTADOS.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 CICLO DE DISEÑO. (ALTAIR STUDY, 2014)	6
FIGURA 1.2 OPTIMIZACIÓN DE TAMAÑO (OLASON, 2010)	7
FIGURA 1.3 OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA.(OLASON, 2010).....	7
FIGURA 1.4 OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA (OLASON,2010).....	8
FIGURA 1.5 OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE UN BRAZO OSCILANTE SUPERIOR DE UN VEHÍCULO. (ALTAIR STUDY, 2014)A 5. OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE UN BRAZO OSCILANTE SUPERIOR DE UN VEHÍCULO. (ALTAIR STUDY, 2014).....	8
FIGURA 1.6 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	11
FIGURA 1.7A- 1.7B OPTIMIZACIÓN DE BISAGRA EN PUERTAS DE UN AVIÓN. (CERVELLERA, 2007).	13
FIGURA 1.8 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL COMPACTO VEHICULAR (FABB., N.D.)	13
FIGURA 1.9 OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE UN SOPORTE BASE DE MOTOR.(SCHRECK, 2014)	14
FIGURA 1.10 BRAZO OSCILANTE ORIGINAL 4.07 KG DE UN VEHÍCULO VOLVO (LARSSON ,2016).....	15
FIGURA 1.11 DISEÑO INICIAL DE VOLUMEN DE UN BRAZO OSCILANTE.(LARSSON, 2016).....	15
FIGURA 1.12 DISEÑO Y RESULTADO DEL MODIFICADO DE VOLUMEN DE UN BRAZO OSCILANTE (LARSSON, 2016)	16
FIGURA 1.13 DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL (ARRIBA) Y AXIAL (ABAJO) DEL OSCILANTE (DE & DE, 2014).	17

FIGURA 1.14 A. ZONAS DE DISEÑO Y NO DISEÑO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE UN CHASIS DE MOTOCICLETA. (OCHOA,2010)	18
FIGURA 1.14 B OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE UN CHASIS DE MOTOCICLETA. (OCHOA,2010)	19
FIGURA 1.15 MANGUETA ANTES Y DESPUÉS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN (REYES, 2016).....	21
FIGURA 2.1 DIMENSIONES GENERALES DE LA MOTOCICLETA (UDA,2016)	24
FIGURA 2.2 DISTANCIA AL CENTRO DE MASA (UDA, 2018)	25
FIGURA 2.3 EJES DE MOVIMIENTO (UDA,2016)	25
FIGURA 2.4 FUERZAS PRESENTES EN MOVIMIENTO RECTILÍNEO.	27
FIGURA 2.5 ÁNGULO DE TRANSFERENCIA DE CARGA	29
FIGURA 2.6 ACELERACIÓN LIMITADA POR TRACCIÓN.....	30
FIGURA 2.7 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE ACELERACIÓN POR WHEELING.	31
FIGURA 2.8. FUERZAS CAUSADAS POR WHEELING EN RUEDA POSTERIOR.....	32
FIGURA 2.9 ANGULO IDEAL DE INCLINACIÓN.....	33
FIGURA 2.10 FUERZAS SOBRE LA MOTOCICLETA EN LÍNEA RECTA.....	36
FIGURA 2.11 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE ACELERACION EN LINEA RECTA. 36	
FIGURA 2.12 EQUILIBRIO DURANTE TRAYECTORIA CURVA SIN ACELERACIÓN LONGITUDINAL.....	38
FIGURA 2.13 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE PARA CARGAS LATERALES.....	39
FIGURA 3.1 BRAZO OSCILANTE POSTERIOR MODELO.	40
FIGURA 3.2 VISTA SUPERIOR DEL BRAZO OSCILANTE POSTERIOR MODELO. ..	41
FIGURA 3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PLATO OSCILANTE	41
FIGURA 3.4 PLATO OSCILANTE POSTERIOR EN PROCESO DE MALLADO.	43

FIGURA 3.3 VALORES DE CRITERIO DE CALIDAD.	44
FIGURA 3.5 DEFINICIÓN DE ZONAS DE DISEÑO Y NO DISEÑO	
DEFINICIÓN DE ZONAS DE DISEÑO Y NO DISEÑO.	45
FIGURA 3.6 CARGAS APLICADAS EN EL BRAZO OSCILANTE PARA EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	46
FIGURA 3.7 CARGAS APLICADAS EN EL BRAZO OSCILANTE PARA EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	46
FIGURA 3.8 APTITUDES TECNOLÓGICAS DEL ALUMINIO 6061T (MATWEB,2020)	48
FIGURA 3.9 CONTORNO INFERIOR DE DENSIDAD DE ELEMENTOS, RESTRICCIÓN DE MANUFACTURA EN EL PLANO XY	49
FIGURA 3.10 CONTORNO SUPERIOR DE DENSIDAD DE ELEMENTOS, RESTRICCIÓN DE MANUFACTURA EN EL PLANO XY	49
FIGURA 3.11 RESULTADO DE LA OPTIMIZACIÓN EN PLANO XY	
DE LA OPTIMIZACIÓN EN PLANO XY	50
FIGURA 3.12 RESULTADO DE LA OPTIMIZACIÓN EN PLANO XY	50
FIGURA 3.13 MODELADO DEL BRAZO OSCILANTE OPTIMIZADO EN EL PLANO XY.	51
GRÁFICO 3.14 MODELADO A PRETENDER DEL BRAZO OSCILANTE OPTIMIZADO EN EL PLANO XY.....	52
FIGURA 3.15 RESULTADO BRAZO OSCILANTE OPTIMIZADO EN EL PLANO XY.	52
FIGURA 3.16 PROPIEDADES FÍSICAS DEL BRAZO OSCILANTE OPTIMIZADO EN EL PLANO XY.	53
FIGURA 3.17 CONTORNO LATERAL DE DENSIDAD DE ELEMENTOS, RESTRICCIÓN DE MANUFACTURA EN EL PLANO YZ.....	54

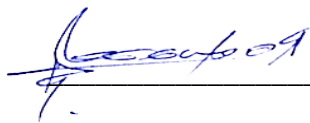
FIGURA 3.18 CONTORNO LATERAL DE DENSIDAD DE ELEMENTOS, RESTRICCIÓN DE MANUFACTURA EN EL PLANO YZ.....	55
FIGURA 3.19 RESULTADO DE LA OPTIMIZACIÓN CON RESTRICCIÓN DE MANUFACTURA EN EL PLANO YZ	55
FIGURA 3.20 RESULTADO DE LA OPTIMIZACIÓN CON RESTRICCIÓN DE MANUFACTURA EN EL PLANO YZ	56
FIGURA 3.21 RESULTADO DE LA OPTIMIZACIÓN DEL BRAZO OSCILANTE CON RESTRICCIÓN DE MANUFACTURA EN EL PLANO YZ.....	56
FIGURA 3.22 PROPIEDADES FÍSICAS DEL BRAZO OSCILANTE RESULTANTE EN EL PLANO YZ	57
FIGURA 4.1 ESFUERZOS DEL PLATO OPTIMIZADO EN YZ SOMETIDO A LAS CARGAS DE UNA CURVA.....	59
FIGURA 4.2 ESFUERZOS DEL PLATO OPTIMIZADO EN X SOMETIDO A LAS CARGAS ESTÁTICAS.	59
FIGURA 4.3 ESFUERZOS DEL PLATO OPTIMIZADO EN XY SOMETIDO A LAS CARGAS ESTÁTICAS.	60
FIGURA 4.4 ESFUERZOS DEL PLATO OPTIMIZADO EN XY SOMETIDO A LAS CARGAS DE UNA CURVA.....	61
FIGURA 4.5 ESFUERZOS DEL PLATO OPTIMIZADO EN Y SOMETIDO A LAS CARGAS ESTÁTICAS.	61
FIGURA 4.6 DEFORMACIÓN DEL PLATO OPTIMIZADO EN YZ SOMETIDO A LAS CARGAS DE UNA CURVA.....	62
FIGURA 4.7 DEFORMACIÓN DEL PLATO OPTIMIZADO EN X SOMETIDO A LAS CARGAS ESTÁTICAS	63

FIGURA 4.8 DEFORMACIÓN DEL PLATO OPTIMIZADO EN Y SOMETIDO A LAS CARGAS DE UNA CURVA.....	64
FIGURA 4.9 DEFORMACIÓN DEL PLATO OPTIMIZADO EN Y SOMETIDO A LAS CARGAS ESTÁTICAS.....	64

RESUMEN

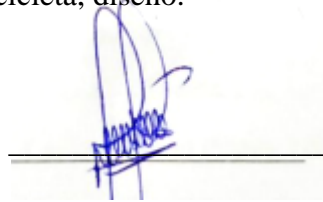
En este trabajo se realiza el diseño y la optimización de un brazo oscilante posterior de una motocicleta; Utilizando aluminio 6061, programas de ingeniería, modelación, análisis, y optimización topológica, se logró disminuir el peso en un 25,71% sin afectar su resistencia mecánica; En primer lugar, se fundamenta el proceso de optimización en diferentes elementos del vehículo, Se establece y se analiza las diferentes cargas y casos, en función de los estados de funcionamiento. Luego se esboza un brazo oscilante que cumpla con los requisitos de espacio y funcionalidad. Una vez seleccionada la geometría que tiene el brazo oscilante posterior, se procede a realizar el proceso de optimización topológica. La optimización del brazo tiene por objetivo de estudio la disminución de peso sin afectar las características mecánicas del elemento; Esta optimización se realiza en dos planos de construcción, para luego establecer cuál de los dos planos tiene mejores resultados.

Palabras clave: Optimización, brazo oscilante, motocicleta, diseño.



Robert Esteban Rockwood Iglesias

Director de Tesis

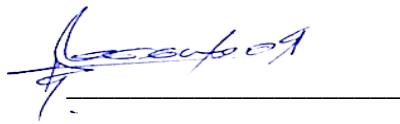


Carlos Miguel Pelález Tello

ABSTRACT

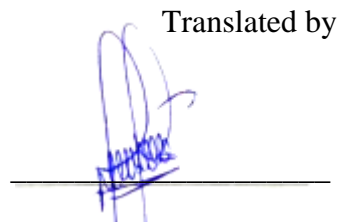
In this work the design and optimization of a rear swing arm of a motorcycle was carried out. 6061 aluminum, engineering, modeling, analysis, and topology optimization programs were used. It was possible to reduce the weight by 25.71% without affecting its mechanical resistance. In first place, the optimization process was based on different elements of the vehicle. The different loads and cases were established and analyzed, depending on the operating states. Then a swing arm was sketched which met the space and functionality requirements. Once the geometry of the rear oscillating arm had been selected, the topological optimization process was carried out. The optimization of the arm aimed to study the reduction of weight without affecting the mechanical characteristics of the element. This optimization was carried out in two construction planes, to later establish which of the two planes had better results.

Keywords: Optimization, swing arm, motorcycle, design.



Robert Esteban Rockwood Iglesias

Translated by



Carlos Miguel Pelález Tello

Carlos Miguel Peláez Tello

Trabajo de titulación

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE UN BRAZO OSCILANTE POSTERIOR DE UNA MOTOCICLETA

INTRODUCCIÓN

En la industria todas las máquinas son diseñadas para cumplir una función o un trabajo específico; con el pasar de los años, la industria avanza y con ello va encontrando maneras de mejorar o corregir errores presentes en las mismas, para hacerlas más eficientes y que su producción sea de menor costo.

Es por ello que se han desarrollado programas de diseño y optimización que nos ayudan a generar objetos en tres dimensiones para poder visualizarlos y a su vez poder apreciar el comportamiento de estos elementos cuando son sometido a las simulaciones en el ordenador.

El presente trabajo está enfocado en desarrollar el diseño de un brazo oscilante de suspensión de una motocicleta, que es el elemento que soporta la rueda posterior de una motocicleta, el sistema de frenos posterior y el amortiguador posterior.

El brazo oscilante de la motocicleta por lo tanto es un elemento rígido y de un volumen considerable lo que genera un gasto energético en funcionamiento y de recursos durante su proceso de fabricación.

Para el diseño se debe considerar las fuerzas que soporta y momentos presentes en el brazo oscilante durante diversas fases del funcionamiento de la motocicleta, como: en carga estática, en curva, frenado, etc.

Luego del proceso de diseño y habiendo revisado las cargas se procede a realizar la optimización del elemento; el cual busca utilizar la menor cantidad de material para hacerlo económico y con una rigidez adecuada que soporte las cargas planteadas.

Se ha planteado dos resultados de optimización por manufactura, uno por el plano XY y otro por el plano YZ, con lo cual obtendremos dos brazos resultantes optimizados pero cada uno con diferente comportamiento.

Finalmente, con los resultados de optimización y las respectivas simulaciones se obtiene un elemento que soportará las cargas impuestas en el diseño del brazo oscilante.

CAPITULO 1

1.1 Generalidades

1.1.1 Objetivo General

- Optimizar topológicamente un brazo oscilante posterior de una motocicleta.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las técnicas de optimización que se emplean para diseñar el brazo oscilante de una motocicleta.
- Determinar las cargas que soporta un brazo oscilante posterior de una motocicleta.
- Proponer el modelo optimizado.
- Validar la propuesta de diseño a través de la simulación de desempeño del brazo oscilante posterior de la motocicleta.

1.2 Problemática

En la actualidad la industria automotriz busca la manera de optimizar los componentes mecánicos de sus sistemas, con el fin de lograr vehículos más eficientes, además, al reducir el peso y la masa de los componentes se disminuyen costos de producción.

Este estudio se enfocará en reducir el peso del brazo oscilante posterior de una moto eléctrica, manteniendo su desempeño estructural.

1.2.1 Pregunta de investigación

¿Qué porcentaje de masa se puede disminuir del brazo oscilante posterior de una motocicleta luego del proceso de optimización topológica, sin disminuir sus prestaciones?

1.3 Marco teórico y estado de arte

1.3.1 Marco teórico

Actualmente la mayoría de los elementos presentes en todo conjunto mecánico pasan por el estudio de diseño y optimización, pero para entender estos conceptos primero se debe definir su significado.

1.3.1.1 Optimización (optimizar).

- *Acción y efecto de optimizar.*
- *tr. Buscar la mejor manera de realizar una actividad (RAE, 2019).*

Optimizar es un verbo que designa la acción de buscar la mejor forma de hacer algo. Como tal, es un verbo transitivo que se conjuga como “realizar”. La palabra optimizar se compone del vocablo “óptimo”, superlativo de ‘bueno’, que proviene del latín optĭmus, y del sufijo “-izar”, del latín -izāre.

Optimizar quiere decir buscar mejores resultados, más eficacia o mayor eficiencia en el desempeño de alguna tarea. (Significados, 2016).

Entre los objetivos de la optimización en el diseño de elementos están: disminuir la masa, disminuir costos, hacer elementos más eficientes, más fáciles de construir, mejorar tiempos de producción entre otros.

‘El objetivo de la optimización topología es encontrar una distribución óptima del material dentro de un espacio de diseño dado para una carga definida’.(Schreck, 2014)

Las restricciones planteadas pueden estar dirigidas a conservar ciertas condiciones de diseño, estas pueden ser:

- Rigidez del elemento
- Simetría
- La funcionalidad
- La facilidad de manufactura.

Todas ellas dependiendo de la geometría de los elementos y su función.

El diseñador describe las restricciones, establece los objetivos, y deja a que la herramienta de optimización las analice antes de presentar sus propuestas. (Altaír Study, 2014).

En el diseño de elementos mecánicos, existe diversos software que nos brinda la facilidad de probar varios modelos de diseño y optimizarlos sin la necesidad de construirlos, como en el proceso de diseño convencional en el cual el diseñador tendría que confiar en la experiencia para seleccionar las propuestas.

La utilización de un software de diseño, ha permitido generar de forma rápida, diseños novedosos que cumplen con los requerimientos funcionales en condiciones de operación; disminuyendo con el ello los procesos de rediseño.

La implementación del proceso de optimización CAE en el diagrama de procesos evita el ciclo repetitivo de prueba y error comúnmente utilizado en el proceso de diseño tradicional que involucra la construcción de diversos prototipos para su evaluación, lo que se traduce en un aumento significativo en el costo y tiempo de desarrollo.

La ventaja de la optimización en el diseño de elementos mecánicos en relación al tradicional, parte del análisis computarizado, esto a que el diseño realizado y el análisis se lo puede hacer simultáneamente, en lugar de hacer uno después del otro.

En la figura 1.1 se aprecia la diferencia entre el diseño convencional y el diseño con optimización topológica.

1.4 Procesos de diseño tradicional y con optimización

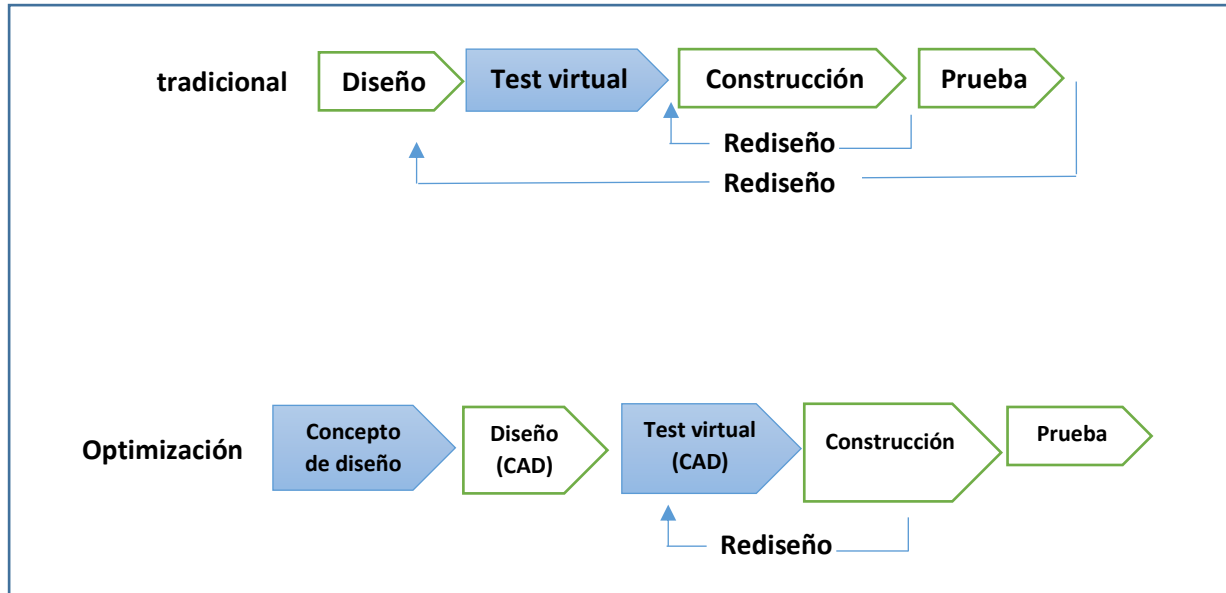


Figura 1.1 Ciclo de Diseño. (Altair Study, 2014)

‘Las Herramientas de análisis son utilizadas para evaluar cada propuesta, y es el diseñador, el cual, utilizando estos resultados de análisis, lo selecciona o diseña "uno mejor".’(Altair Study, 2014)

“El proceso de optimización utiliza las herramienta de análisis para decidir cómo cambiar el diseño inicial para llegar a uno mejor.”(Johnsen, 2013)

1.5 Optimización estructural

1.5.1 Optimización de tamaño

La forma de la estructura es conocida, el objetivo es la reducción de peso mediante la modificación de las secciones rectas, manteniendo fijas las coordenadas nodales y la conectividad entre elementos.

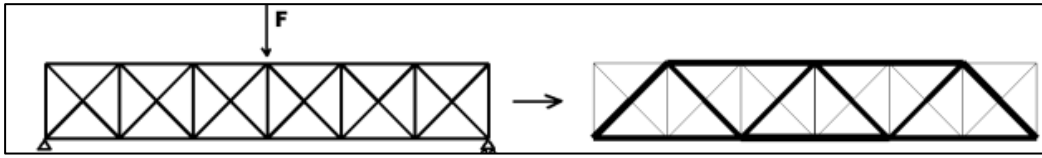


Figura 2.2 optimización de tamaño (Olason, 2010)

1.5.2 Optimización de la geometría

En la optimización de forma se modifican las fronteras predeterminadas para lograr un diseño óptimo, las variables de diseño pueden ser por ejemplo, la distribución del espesor, el diámetro de orificios, radios, tamaño de agujeros, entre otros.(Vázquez, 2014)

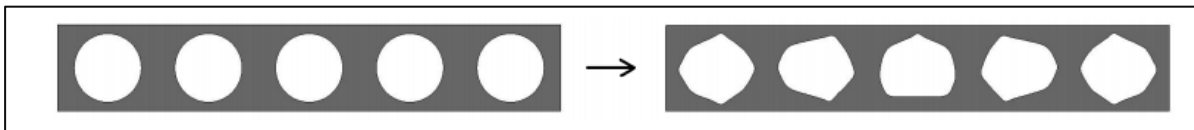


Figura 1.3 Optimización de la geometría.(Olason, 2010)

1.5.3 Optimización topológica

La optimización topológica es un proceso iterativo que distribuye sistemáticamente el material a través del dominio de diseño para obtener un rendimiento mecánico óptimo en el diseño conceptual.

La diferencia esencial entre la optimización de forma y la optimización topológica es que en la primera la mejora de la función objetivo depende exclusivamente de la forma del contorno (el número de agujeros permanece invariante) y en la optimización topológica depende de la variación del mismo (existen elementos, formas, radios y cavidades que determinan la estructura).

La optimización de la topología se refiere a la distribución del material y cómo los miembros dentro de una estructura están conectados. la "Densidad equivalente" trata de cada elemento como variable de diseño.

Una metodología para obtener el resultado es realizar el proceso de optimización topológica, en el cual el objetivo es calcular una densidad equivalente para cada elemento, donde 1 es equivalente a 100% de material, mientras que 0 es equivalente a no material en el elemento.

El algoritmo busca entonces asignar elementos que tienen un valor de tensión bajo una densidad equivalente inferior, antes analizando el efecto sobre la estructura restante.

De esta manera los elementos extraños tienden hacia una densidad de 0, con el óptimo diseño que tiende hacia 1.

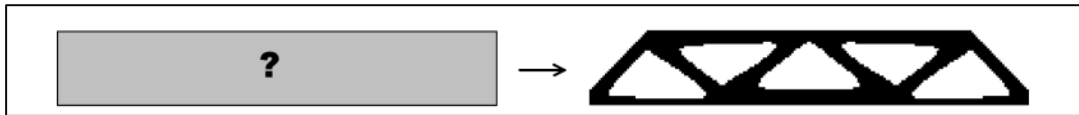


Figura 1.4 Optimización topológica (Olason,2010).

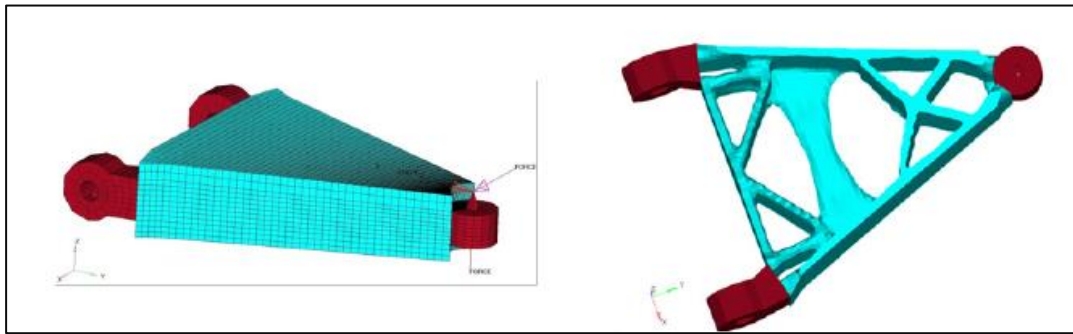


Figura 1. 5 Optimización topológica de un brazo oscilante superior de un vehículo. (Altair Study, 2014)

Como se indica en las figuras 1.4 y figura 1.5 la optimización topológica busca la forma ideal con la que un elemento pueda realizar su función sin perder rigidez, por ejemplo, en la figura 1.5 el plato oscilante superior optimizado tiene las mismas dimensiones que el original, pero su composición en elementos es mucho menor, por lo cual el peso disminuye porque hay menos material y con ello los costos de producción y el peso en general del vehículo.

Bajo estos conceptos, el análisis y la optimización son funciones complementarias, ambas son partes igualmente importantes de optimización de diseño, un modelo de diseño óptimo consiste en un modelo de análisis y un modelo de optimización.

Las dos principales estrategias para resolver el problema con una topología son el método de la densidad y el método de la homogenización.

$$\chi(x_i) \begin{cases} 0 \rightarrow \text{sinmaterial} \\ 1 \rightarrow \text{material } x_i \in \Omega \end{cases}$$

Es posible utilizar métodos de optimización basados en gradientes si se relaciona el problema a optimizar mediante la densidad del material que toma valores entre 0 y 1, es decir, 0% de densidad o 100% de densidad.

Entonces la densidad se convierte en la variable de diseño que es una función que varía sobre todo el dominio.

$$\rho_i(x_i) = x_i \rho_0 \quad (0 < x_i < 1) \quad (1)$$

Donde ρ_0 es la densidad del material base

El modelo del material asume valores intermedios de densidad mediante una interpolación. El modelo SIMP (*solid isotropic material with penalization*) es un esquema de interpolación comúnmente utilizado que relaciona la densidad relativa al módulo de elasticidad de cada elemento usando la siguiente expresión:

$$E_i(x_i) = X_i^p E_0 \quad (2)$$

Donde P es un parámetro de penalización ($P \geq 1$) y E_0 es el módulo de elasticidad del material base.

Una vez que se comprende la idea de cómo se introduce la variable de diseño en el problema de optimización resta finalizar su formulación estableciendo la función objetivo y las restricciones.

Entonces el proceso iterativo puede iniciar evaluando la estructura en cada iteración y eliminando los elementos con menor densidad, hasta cumplir con el objetivo sin violar ninguna restricción

"Es importante recordar que, la optimización es una herramienta, y por lo tanto sólo es tan buena como la persona quien lo usa. Un software de optimización sólo es capaz de trabajar con el problema que le damos; No puede diseñar la parte y no tiene juicio de ingeniería, por lo que las decisiones de diseño definitivo deben recaer en el ingeniero que utiliza el software.

Sin embargo, si se utiliza correctamente es una herramienta increíblemente potente, y su adopción y uso, en algunas de las industrias de ingeniería más exigentes del mundo demuestra cómo la

tecnología se puede utilizar en el mundo real, en problemas reales, para producir más ligeros, más fuertes, mejor diseñados y más eficientes diseños en menos tiempo".(Altair Study, 2014)

1.6 Proceso

Para el desarrollo de este tema se emplearán diferentes programas computacionales tanto de modelación de elementos mecánicos, como de ingeniería asistida por ordenador.

Básicamente el proceso a seguir esta presentado en la figura 1.6 y es el siguiente:

1. Definición de la geometría base del elemento dependiendo del espacio asignado
2. Definición de las zonas de diseño y las zonas que no serán diseñadas
3. Malla de elementos finitos
4. Asignar los materiales al brazo oscilante
5. Aplicar las cargas a las cuales estará sometido el brazo en los lugares específicos y los lugares que serán restricciones de movimiento
6. Especificar el objetivo de la optimización
7. Optimización y filtro de imagen
8. Validación del proceso, caso contrario se repite el proceso de optimización e imagen
9. Resultado final

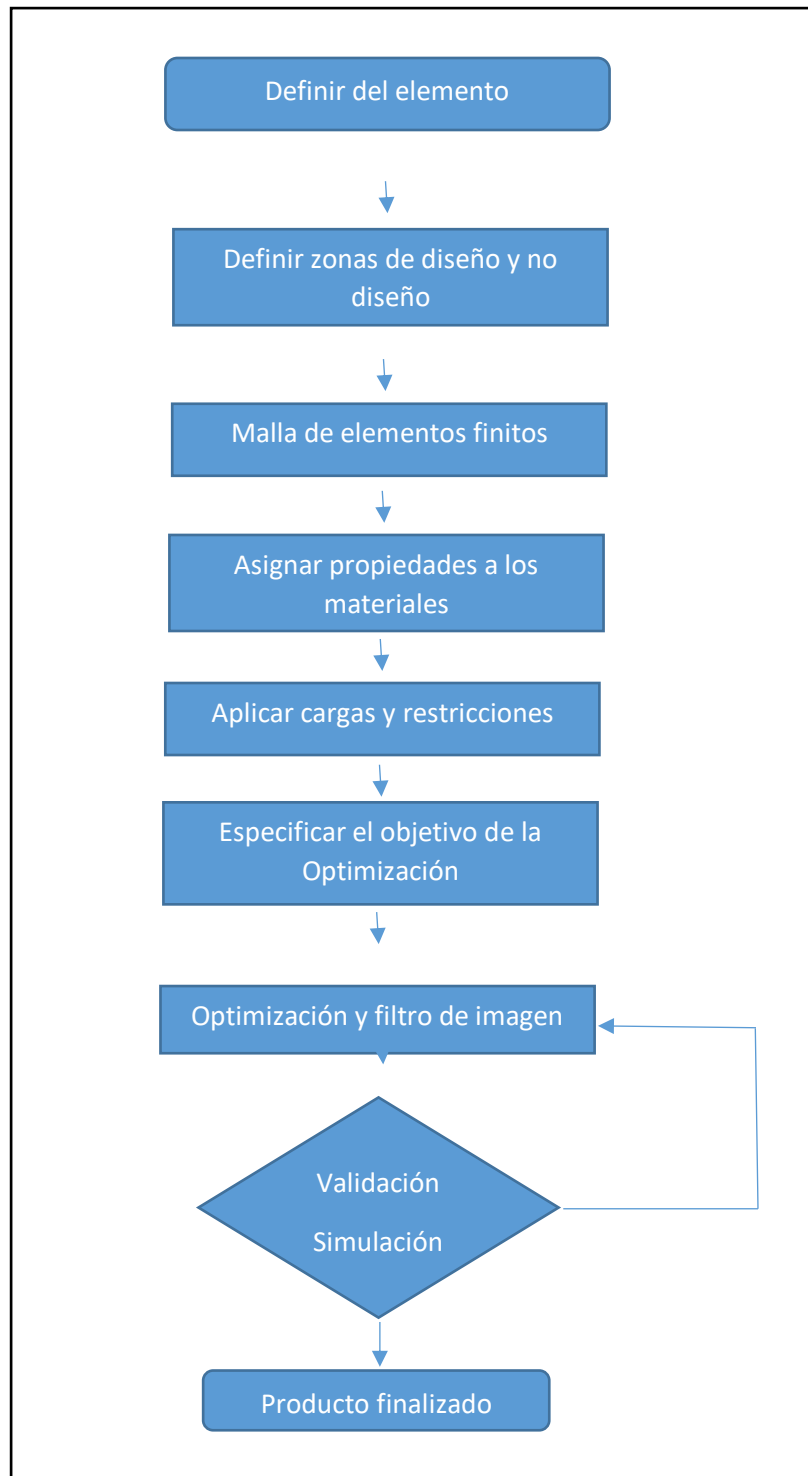


Figura 1. 6 Diagrama de flujo del proceso de optimización

1.7 Estado del arte

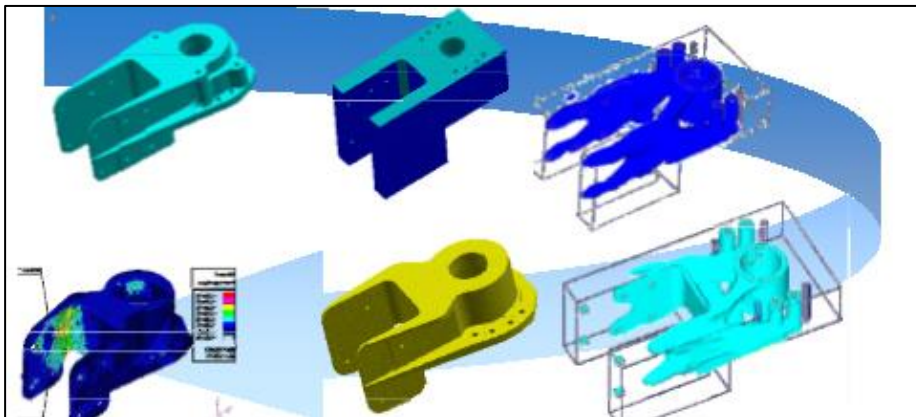
A nivel mundial las empresas dedicadas a la producción de partes mecánicas, utilizan estas herramientas computacionales para mejorar sus propuestas de diseño, y con ello evitar componentes sobredimensionados y costosos.

“Uno de los procesos de optimización estructural más conocidos es el de la disminución de peso en aeronaves, en los cuales se elimina masa de elementos como puertas, abrazaderas, bisagras, partes integrales de aluminio, fuselaje entre otras.

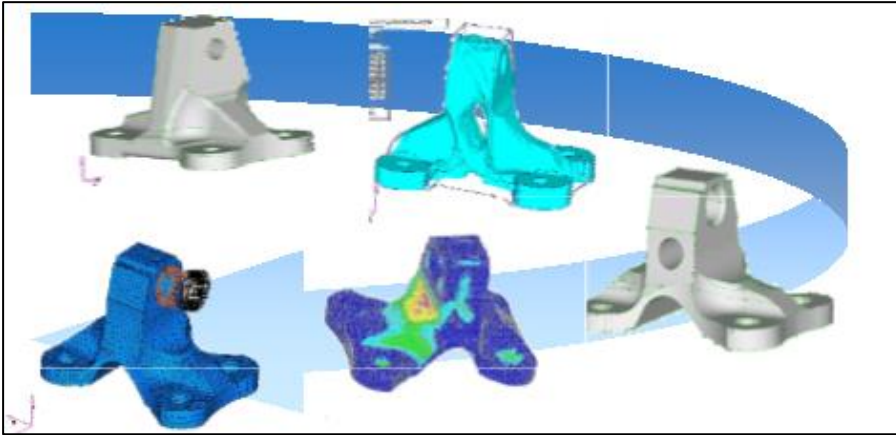
En estos elementos mediante diversos procesos, como: modelado integrado, análisis, optimización y visualización se logra disminuir el peso de un avión Boeing y verificar que sus elementos cumplen con los requerimientos para los cuales son diseñados”. (Cervellera, 2007, p. 11).

Dando como resultados reducciones de peso en sus elementos entre el 16 al 35 %.

En la figura 1.7a y 1.7b se indica el proceso de optimización topológica de una bisagra y el soporte de una puerta, respectivamente, de un avión Boeing, en el cual luego del proceso de optimización, se reduce un 35% del peso inicial del elemento para la bisagra y un 16% de peso para el soporte.



Masa = -16%



Masa = -35%

Figura 1.7a- 1.7b Optimización de bisagra en puertas de un avión. (Cervellera, 2007,p.12).

Otros de los elementos en el cual la optimización es esencial, es en el monocasco del vehículo, los bastidores de automóviles, para disminuir el peso de los elementos sin comprometer las prestaciones mecánicas.

En la figura 1.8 Se indica un monocasco vehicular en el cual se aprecia las diferentes zonas de la estructura que han sido optimizadas.

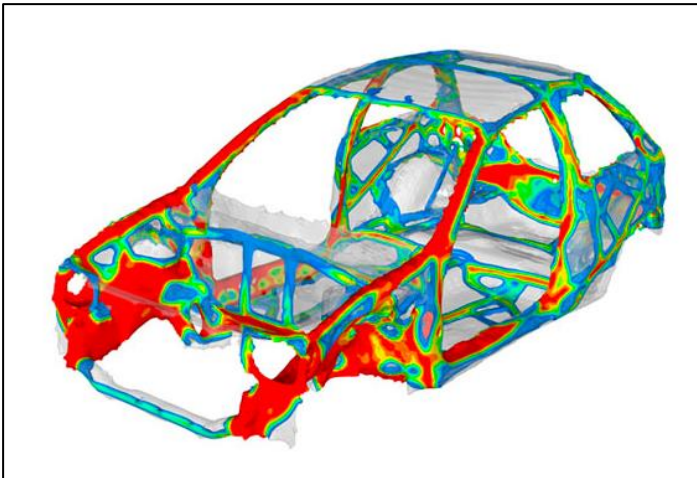


Figura 1.8 Análisis estructural del compacto vehicular (Fabb., n.d.)

“Es importante darse cuenta que no todos los diseños se hacen desde cero. En varios casos, tenemos que partir de los diseños existentes y mejorarlos en la medida de lo posible, esto podría ser por varias razones, por ejemplo, un diseño fabricado que ha fallado, una prueba necesita ser modificada. Si comienzas desde cero, puedes enumerar los objetivos y las restricciones y buscar la mejor solución. Si estás trabajando en la modificación de un diseño existente las cosas suelen ser un poco más difícil ya que tiene menos flexibilidad para cambiar las cosas.”(Altaír Study, 2014,p18.).

Es por ello que muchas veces se debe realizar modificaciones en ciertos elementos ya existentes para hacerlos más eficientes, disminuir costos o simplemente corregir errores.

En la figura 1.9 se indica el proceso de optimización de una estructura de soporte de un motor, partiendo de un componente entero bruto, hasta un soporte motor ligero que cumpla con los requerimientos mecánicos de rigidez.

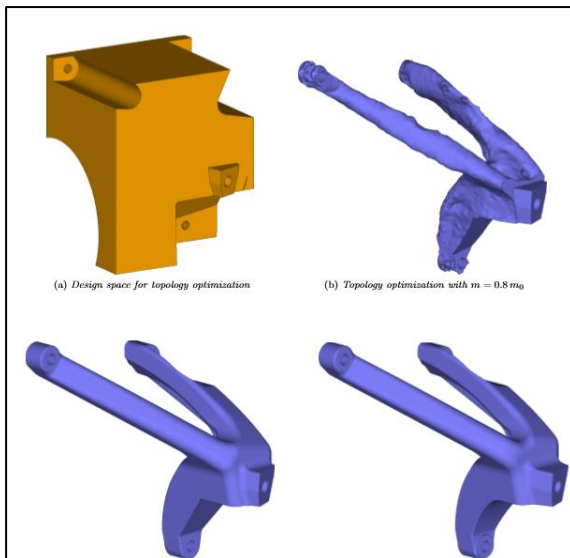


Figura 1. 9 Optimización topológica de un soporte base de motor.(Schreck, 2014)

Otro de los elementos de estudio es un brazo de suspensión (figura 1.10) para un vehículo volvo, en el cual el peso original era de 4.07 kg.

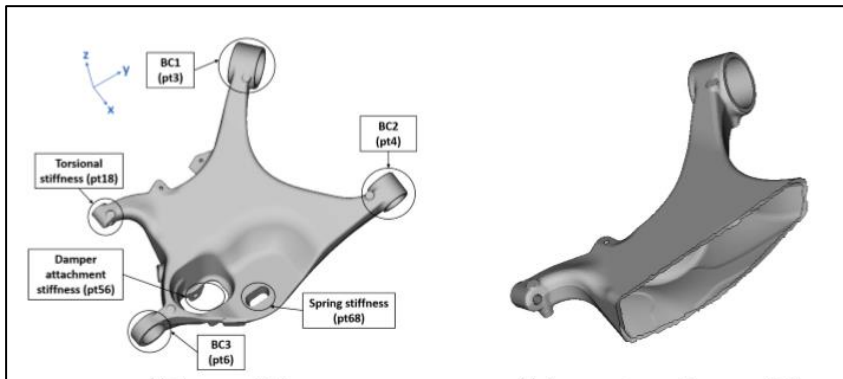


Figura 1.10 brazo oscilante original 4.07 kg de un vehículo volvo (Larsson ,2016)

En este estudio se ha realizado un caso de carga que da como resultado:

“Que al incluir las cargas máximas (comprobación de la robustez) en la tarea de optimización topológica, es posible no sólo mejorar la vida útil a fatiga sino también reducir el esfuerzo último en el proceso de optimización topológica.

Luego del proceso de optimización el peso es de 3,15 kg con una reducción de 0,97 kg lo que representa el 22%”. (Larsson, 2016).

En la figura 1.11 se aprecia el estado original del brazo oscilante antes del proceso de optimización.

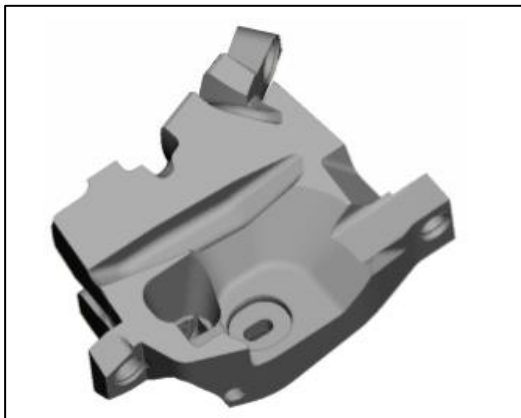


Figura 1.11 Diseño inicial de volumen de un brazo oscilante.(Larsson, 2016)

El resultado de este análisis es un brazo oscilante modificado, indicado en la figura 1.12, luego del proceso de optimización en cual se aprecia la reducción de peso.

En la figura 1.12b se aprecia el brazo oscilante modificado sometido a un análisis estructural para comprobar su resistencia ante los esfuerzos existentes.

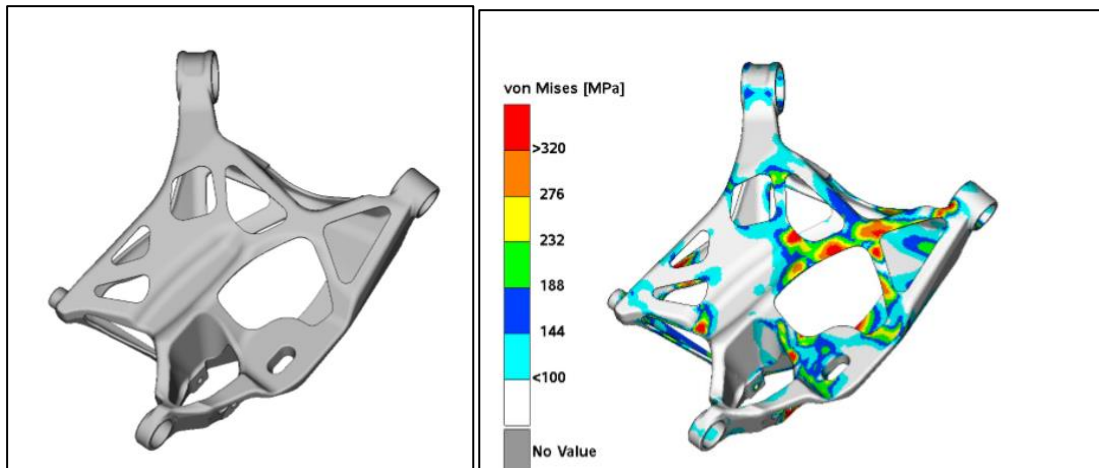


Figura 1.12 Diseño y resultado del modificado de volumen de un brazo oscilante (Larsson, 2016)

Tabla 1 Planteamiento de optimización – Larsson.

OBJETIVOS DE ESTUDIO	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar el requerimiento de material sin afectar los esfuerzos
RESTRICCIONES	<ul style="list-style-type: none"> • Zonas de no diseño como bocines y soportes de amortiguación • Mallado de 6mm.
MANUFACTURA	<ul style="list-style-type: none"> • Fundición aluminio
SIMETRIA	<ul style="list-style-type: none"> • Asimétrico
RESULTADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la vida útil de la fatiga sino también reducir el esfuerzo útil • Reducción del peso de 4,07 kg a 3,15 kg con una reducción de 0,97 kg lo que representa el 22%

En el 2014 (De & De, 2014) se realiza el estudio de una suspensión posterior regulable de una motocicleta de competición en el cual se plantea el diseño de un elemento rígido que nos brinde las características solicitadas en el diseño. El peso inicial del brazo oscilante es de 6kg, que luego del proceso de optimización es 5,26kg con una reducción de 0,74 kg lo que equivale al 12,33%.

En la figura 1.13 se puede apreciar el brazo oscilante de la motocicleta sometido a esfuerzos para apreciar los desplazamientos tanto longitudinales como axiales.

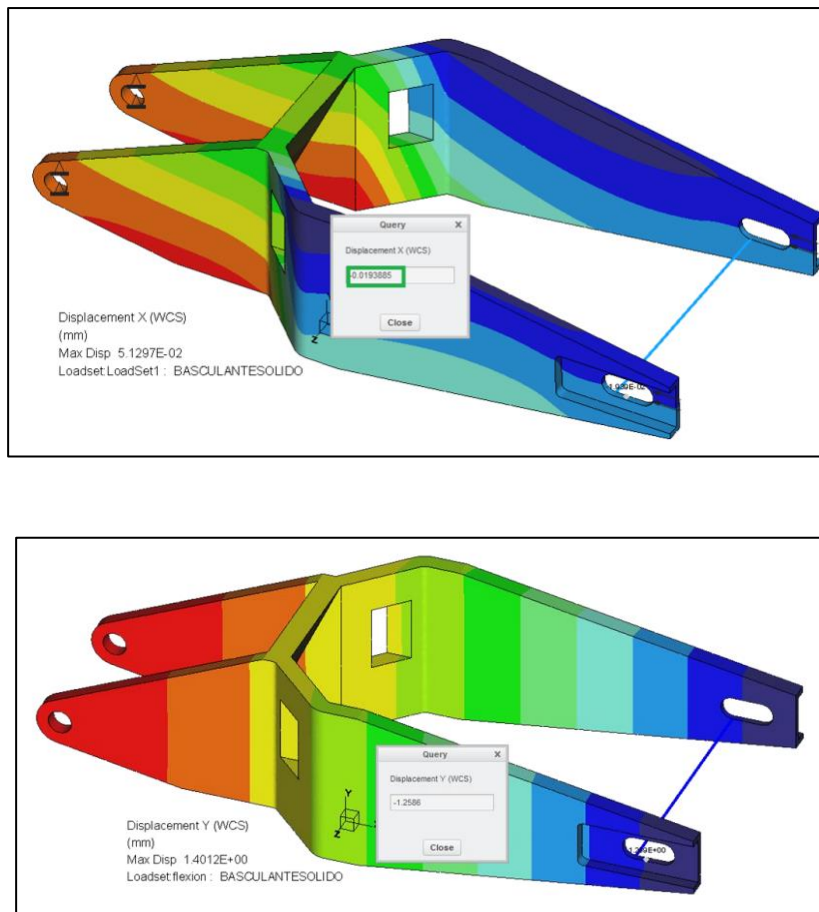


Figura 1.13 Desplazamiento longitudinal (arriba) y axial (abajo) del oscilante (De & De, 2014).

Según (Ochoa y Salamea, 2014), utilizando el proceso de optimización topológica para el rediseño de un chasis de una motocicleta, se logró reducir su peso en un “17.3%; con lo cual se obtuvo

reducciones del 5.4% para el tiempo de aceleración de 0 a 50km/h, y del 10.04% en la distancia de frenado de 50 a 0km/h.”

Con ello podemos apreciar que la optimización topológica no solo interfiere en la disminución de peso en los elementos, sino que con ello también cambia los resultados de otros sistemas como lo es la aceleración y el frenado, ya que, con el peso del chasis menor, el tiempo de frenado es corto y la respuesta a la aceleración es más eficiente.

En la figura 1.14a. se aprecia el chasis de la motocicleta, las zonas destinadas a la optimización topológica, así como las zonas en las cuales no se realizará ningún proceso de optimización estructural.

En la figura 1.14b. se observa el chasis luego de la optimización topológica y el análisis de esfuerzos.

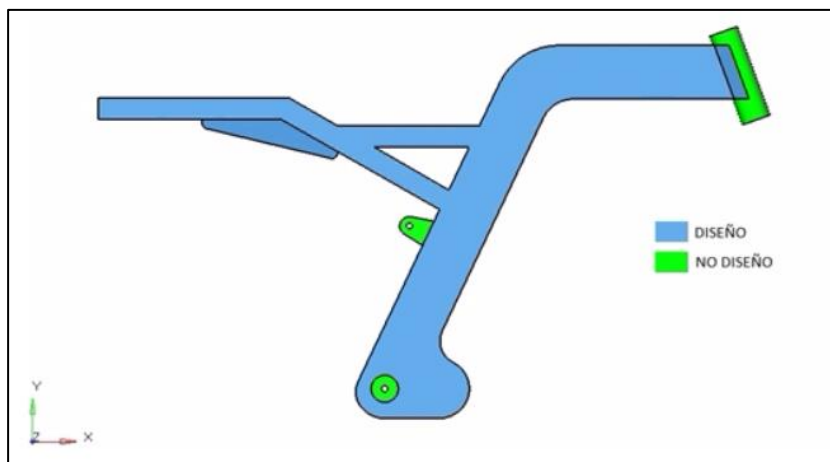


Figura 14 a. zonas de diseño y no diseño para la optimización de un chasis de motocicleta. (Ochoa,2010)

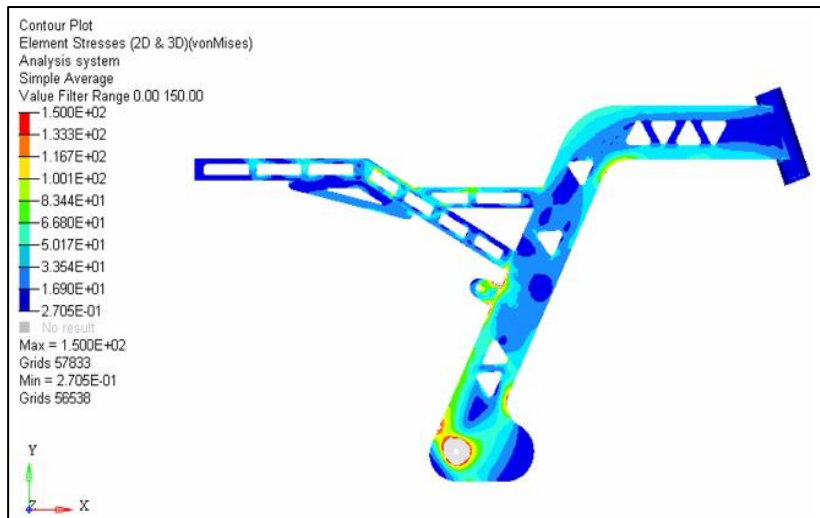


Figura 15 b Optimización estructural de un chasis de motocicleta. (Ochoa,2010)

En el estudio de optimización estructural el objetivo es mantener el desempeño estructural esto se logra definiendo correctamente las restricciones de diseño como: cantidad de material esfuerzo máximo permisible, desplazamientos permisibles entre otros.

Tabla 2 Planteamiento de optimización - Ochoa

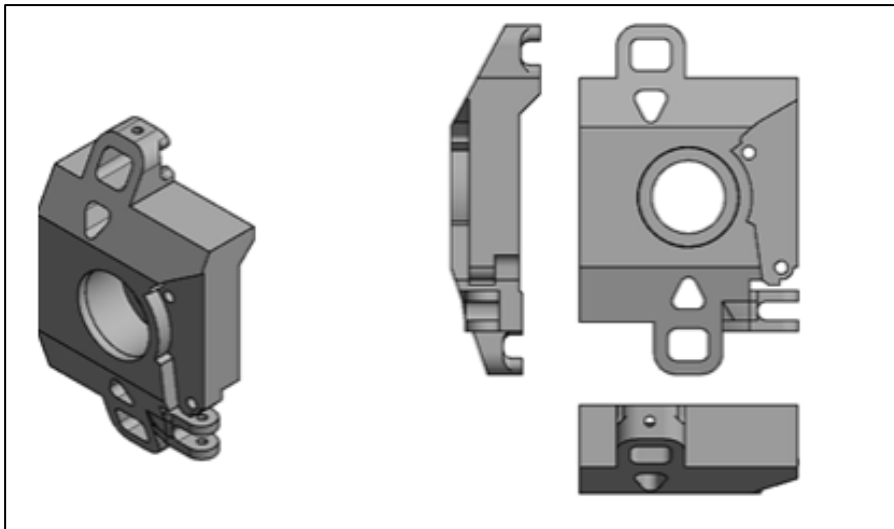
Objetivos de estudio	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener el diseño estructural • Soportar las cargas
Restricciones	Zonas de no diseño como: <ul style="list-style-type: none"> • Soporte de horquilla, • Soporte de monoshock, • Alojamiento del eje oscilante.
Manufactura	<ul style="list-style-type: none"> • Acero ASTM A-36 de 2 y 3mm de espesor • Soldadura eléctrica E6013 de 3/32"
simetría	Simetría plano Y-Z
resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de peso en un 17.3% • Reducción del 5.4% para el tiempo de aceleración de 0 a 50km/h. • Reducción del 10.04% en la distancia de frenado de 50 a 0km/h.

Según (Reyes, 2016) el primer paso para realizar un estudio de optimización es definir el modelo “tosco” del componente a optimizar. el mismo autor presenta en su estudio de optimización topológica de las manguetas de un vehículo para la formula SAE, logrando disminuir el peso de las manguetas sin afectar el funcionamiento y la capacidad de resistencia.

Mediante el proceso de optimización topológica, el autor logra una reducción de masa del 40% de peso en las manguetas delanteras y un 49% en las manguetas posteriores.

En la figura 15a se aprecia las manguetas delanteras antes del proceso de optimización, como un componente entero.

En la figura 1.15b se aprecia la mangueta delantera luego del proceso de optimización y su reducción del 40% de peso.



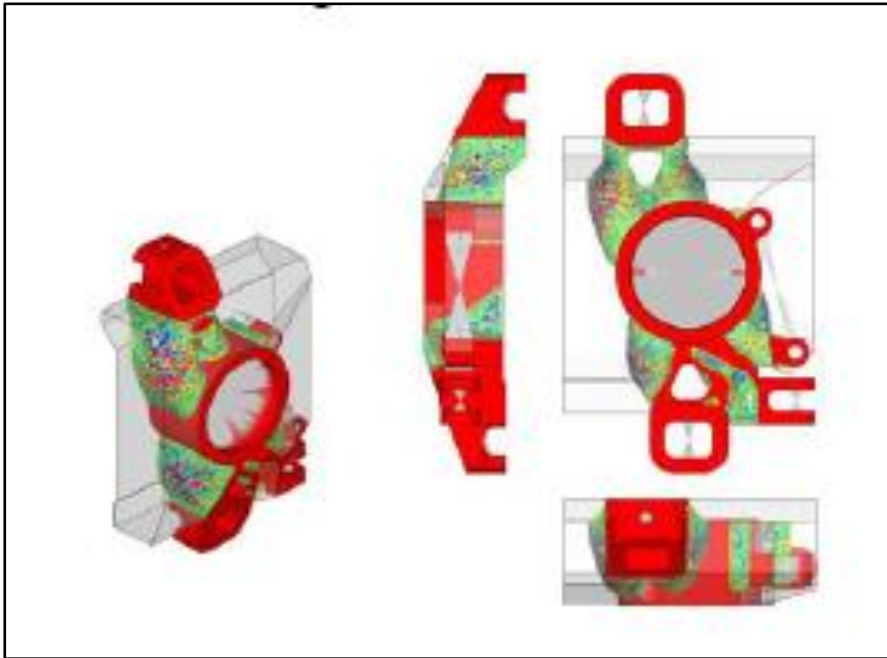


Figura 1.16 Mangueta antes y después del proceso de optimización (Reyes, 2016)

Los diversos estudios de optimización realizados en la industria mecánica han revolucionado la manera de construir los elementos, dando lugar a nuevos objetos más sencillos, de tamaño más reducido, económicos, pero lo suficientemente robustos para poder realizar su función, aplicando métodos de varios elementos rígidos pequeños en lugar de grandes sólidos robustos, nuevos materiales y con ello disminuyendo costos de fabricación, y gastos generales en el vehículo.

Adicionalmente con la simulación de esfuerzos se tiene una apreciación bastante acercada a la realidad de los esfuerzos y la deformación de los diversos elementos y con ello se puede corregir ciertos errores que puedan aparecer durante el estudio.

La información presentada de los diferentes estudios en el estado de arte es de vital importancia porque es la base en la cual iniciamos nuestro trabajo de la optimización topológica de un brazo oscilante de una motocicleta; Esta nos permite conocer la realidad del proceso de optimización y sus diferentes metodologías.

El presente trabajo se enfoca en la aplicación de la optimización topológica para desarrollar el diseño a nivel conceptual de brazo oscilante posterior de una motocicleta.

Tabla 3 Planteamiento de optimización - Reyes

OBJETIVOS DE ESTUDIO	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir el peso de las manguetas sin afectar el funcionamiento y la capacidad de resistencia.
RESTRICCIONES	<ul style="list-style-type: none"> • Restricciones de manufactura, dirección de desmolde. Fracción de volumen 0.4 • Tamaño mínimo de miembros 2mm • Dirección de extracción (P1-P2).
MANUFACTURA	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminio T7075 T6 • Procesos CNC
CARGAS Y CONDICIONES DE FRONTERA	<ul style="list-style-type: none"> • Tres casos de cargas combinadas: curva, frenado, paso por obstáculo.
RESULTADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de masa del 40% de peso en las manguetas delanteras • Reducción de masa del 49% en las manguetas posteriores.

CAPITULO 2

ANALISIS DE LAS CARGAS QUE SOPORTA EL BRAZO OSCILANTE PREVIO AL PROCESO DE OPTIMIZACION.

Para poder realizar el análisis de las cargas que soporta el brazo oscilante posterior de la motocicleta, primero se debe conocer las especificaciones de diseño de la motocicleta.

2.1 Especificaciones de la motocicleta.

Tabla 4 Especificaciones de diseño para una motocicleta Dakar (UDA,2016)

Especificación	Valor
Máxima velocidad	91.26 Km/h
Máxima aceleración	1.48 m/s ²
Promedio de velocidad	54.5 km /h
Autonomía	148 km
Eficiencia	38.92 Wh/Km
Tipo de motor	Electric BL DC
Alimentación	48 v
Potencia máxima	10 Kw
Torque máximo	20 Kw
Transmisión	29.2 N.m
Embrague	Multidisco
Peso (incluido las baterías)	164kg

2.2 Dimensiones generales

En la figura 2.1 se muestran las dimensiones generales de la motocicleta (mm.)

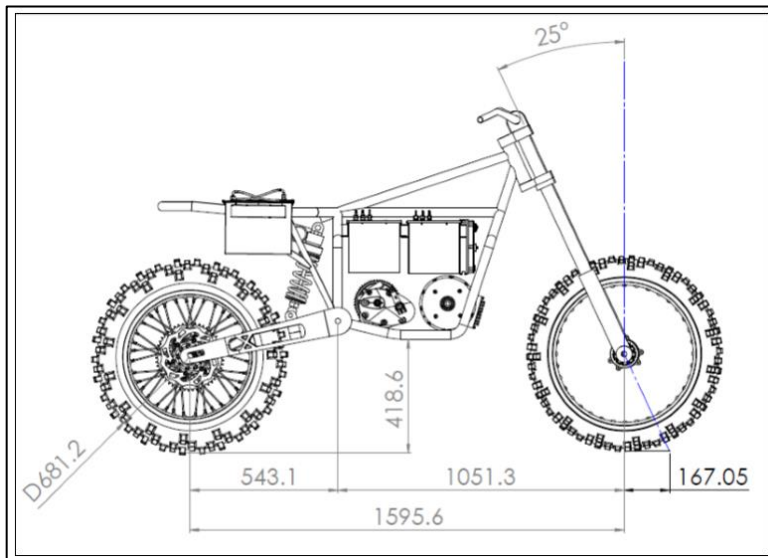


Figura 17 dimensiones generales de la motocicleta (UDA,2016) .

2.3 Centro de masa con piloto

El centro de masa de la motocicleta con piloto es localizado mediante un programa CAE previa asignación de materiales y sus respectivas densidades.

La figura 2.2 muestra la ubicación del centro de la motocicleta utilizada en este estudio:

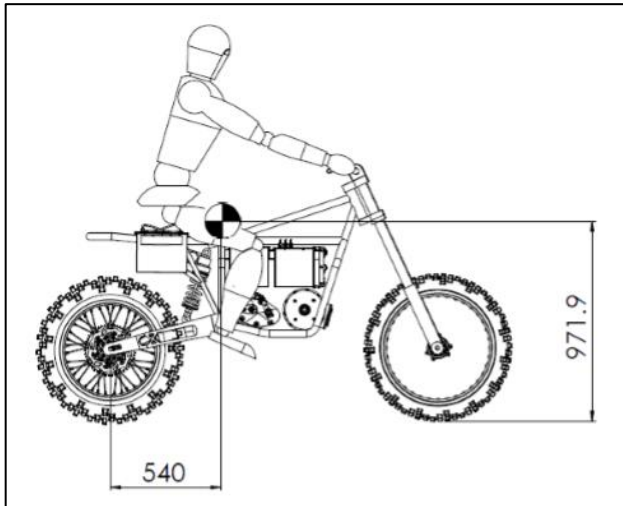


figura 18 Distancia al centro de masa (UDA, 2018)

2.4 Ejes de movimiento

Para poder desarrollar el estudio del brazo posterior se debe conocer algunos de los movimientos de la motocicleta; estos movimientos son provocados por acciones de la moto en frenado, aceleración y curvas y están indicados en la figura 2.3.

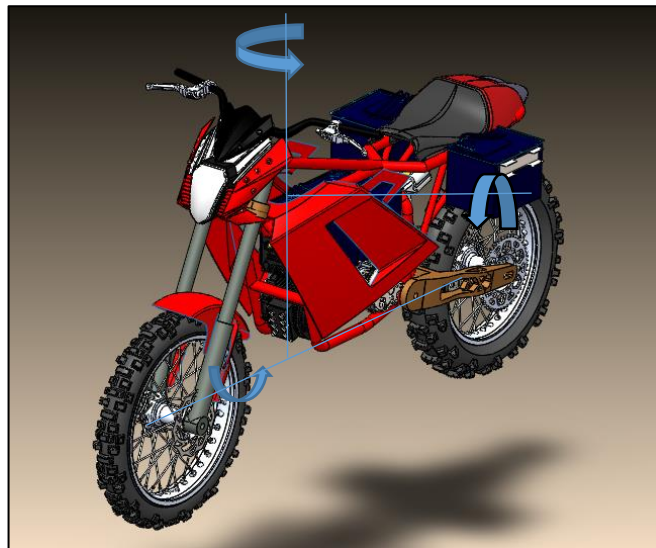


Figura 19 Ejes de movimiento (UDA,2016)

Entre los movimientos reconocidos están:

2.4.1 *“El movimiento de inclinación, el cual es probablemente el más familiar de los tres y es el que ocurre de forma más obvia cuando la moto gira para tomar una curva.*

2.4.2 *La guiñada que es el movimiento que tiene lugar alrededor de un eje vertical y ocurre cuando giramos alrededor de una curva, también puede generarse debido a algunas perturbaciones como por ejemplo un viento lateral.*

2.4.3 *El cabeceo es el movimiento alrededor de un eje horizontal que pasa de lado a lado de la moto, este movimiento tiene lugar al acelerar o al frenar, y también se produce con las irregularidades de la carretera”.*(ISSRC, 2008)

2.5 Dinámica de la motocicleta

2.5.1 Ecuación a velocidad constante

A cierta velocidad la motocicleta tiende a mantener una trayectoria rectilínea debido a los puntos de contacto de los neumáticos y el efecto de inercia que se produce por la velocidad a la cual está presente la moto.

De este modo en línea recta se puede tener estas consideraciones:

- Resistencia a la rodadura despreciable =0
- Fuerza aerodinámica de levantamiento =0
- Angulo de inclinación =0
- La única Fuerza que se opone a circular es la fuerza aerodinámica o de arrastre o "drag forcé"

2.5.1.1 Fuerzas presentes:

- Peso aplicado en el centro de masa $Cd\ g$
- Reacciones presentes en los puntos de apoyo de los neumáticos
- Fuerza de tracción S en el punto de contacto de la rueda

2.5.1.2 Nomenclatura

Tabla 5 Nomenclatura en ecuaciones.

Abreviatura	significado
Cdg	Centro de masa
h	Altura base a centro de masa
b	Distancia base a centro de masa
Nr	Normal posterior
S	Coefficiente de fricción
Nf	Normal frontal

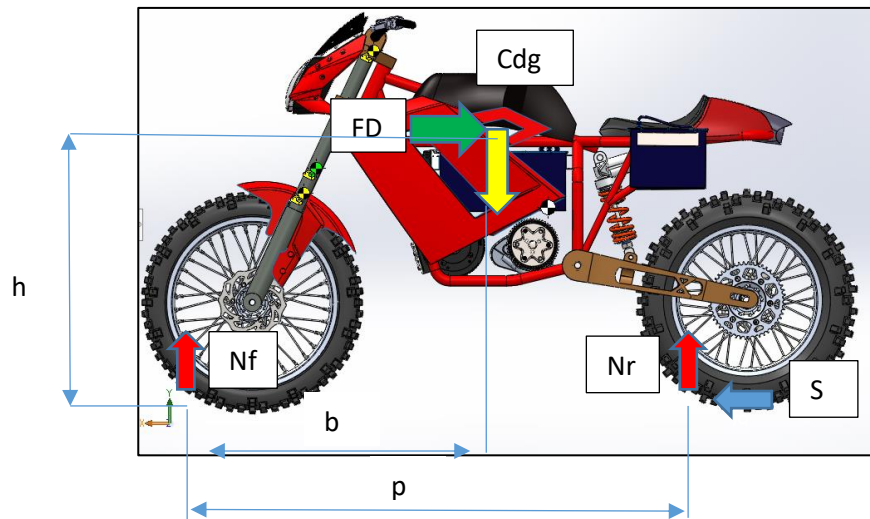


Figura 20 Fuerzas presentes en movimiento rectilíneo.

2.5.1.3 Ecuaciones de equilibrio

Las ecuaciones de equilibrio son:

Equilibrio de fuerzas horizontales: $S - F_D = 0$

[2.1]

$$\text{Equilibrio de fuerzas verticales: } Mg - N_r - N_f = \quad [2.2]$$

$$\text{equilibrio de momentos respecto al CdG: } Sh - N_r \cdot b + N_f(p - b) = 0 \quad [2.3]$$

La fuerza vertical entre el suelo y la rueda son entonces:

$$\text{Carga dinamica sobre la rueda delantera: } N_f = mg \left(\frac{b}{p} \right) - S \left(\frac{h}{p} \right) \quad [2.4]$$

$$\text{Carga dinamica sobre la rueda posterior: } N_r = mg \left(\frac{p-b}{p} \right) + S \left(\frac{h}{p} \right) \quad [2.5]$$

Otra fuerza presente en el diagrama es la fuerza de transferencia de carga y se denominará Ntr. Esta fuerza es la suma de las cargas verticales en las ruedas, la fuerza de tracción Sy Ntr están aplicadas en la rueda posterior.

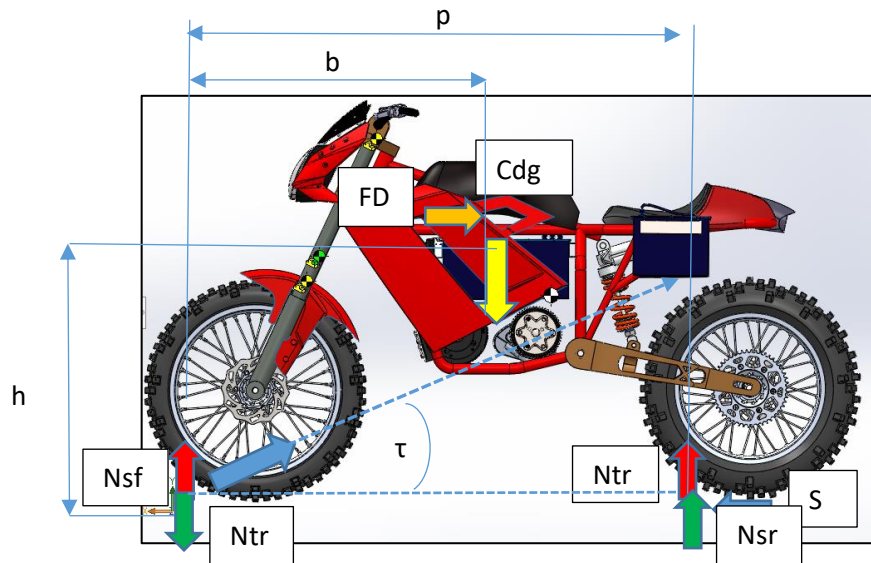


Figura 21 Ángulo de transferencia de carga

La dirección del resultante de estas dos fuerzas quedara inclinada respecto al plano de la carretera por el llamado ángulo de transferencia de carga τ .

Para que exista el equilibrio, la resultante de la fuerza de tracción y la transferencia de carga en la rueda trasera, ha de ser igual y de dirección contraria a la resultante de la transferencia de carga en la rueda delantera y la fuerza aerodinámica horizontal aplicada en el Cdg.

2.5.2 Aceleración por límite de tracción

Para la fuerza vertical y los momentos en el punto respecto a Cdg siguen siendo válidas las ecuaciones anteriores. Ahora la fuerza de tracción S viene dada por la aceleración y la fuerza F_D .

$$S = m \cdot a + F_D \quad [2.6]$$

Donde m es la masa de la motocicleta, a la aceleración horizontal, y F_D la componente horizontal de las cargas aerodinámicas.

La fuerza de empuje no puede ser mayor a la fuerza de rozamiento del neumático con la carretera, entonces:

$$S \leq \mu x.Nr \quad [2.7]$$

Donde μx y Nr son el coeficiente de tracción y la carga sobre la rueda trasera.

Entonces:

$$acc \leq \frac{up.g.\frac{p-b}{p}}{\left(1-up.\frac{h}{p}\right)} - \frac{FD}{m} \quad [2.8]$$

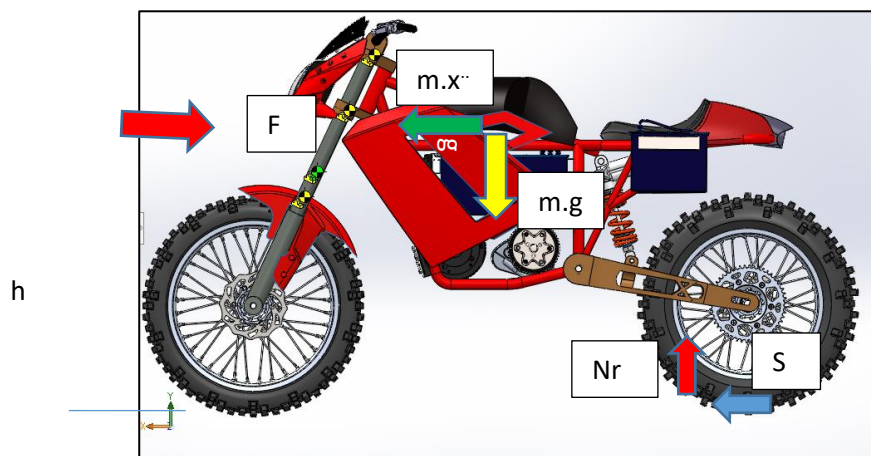


Figura 22 aceleración limitada por tracción.

2.5.3 Aceleración límite por “Wheeling”

La aceleración limitada por Wheeling, es la aceleración máxima que la motocicleta soporta antes de que se levante la rueda delantera con respecto al suelo.

Esto limita la aceleración por el peligro de volcamiento hacia atrás en la motocicleta

Para ello se tomará de referencia el momento en el cual la carga en la rueda delantera es nula (reacción normal de la rueda delantera igual a cero).

$$N_f = mg \left(\frac{b}{p} \right) - S \left(\frac{h}{p} \right) = 0 \quad [2.9]$$

Así la aceleración limitada por Wheeling es:

$$a = g \frac{b}{h} - \frac{FD}{m} \quad [2.10]$$

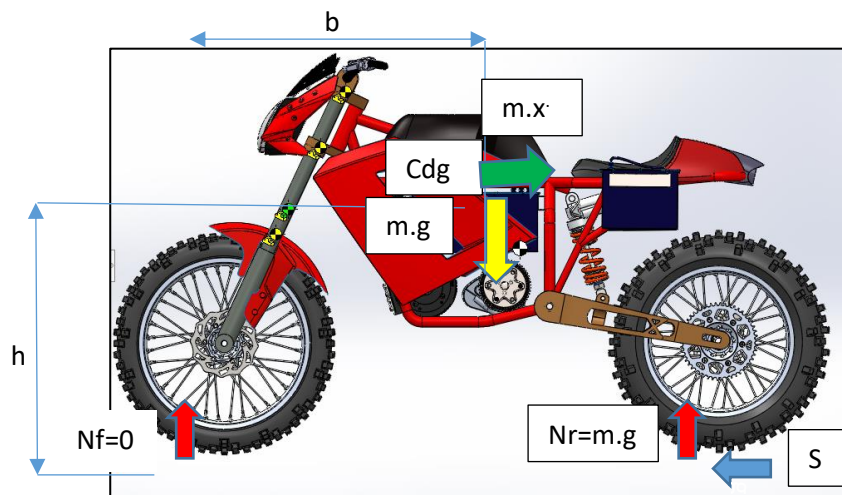


Figura 23 Diagrama de cuerpo libre de aceleración por Wheeling.

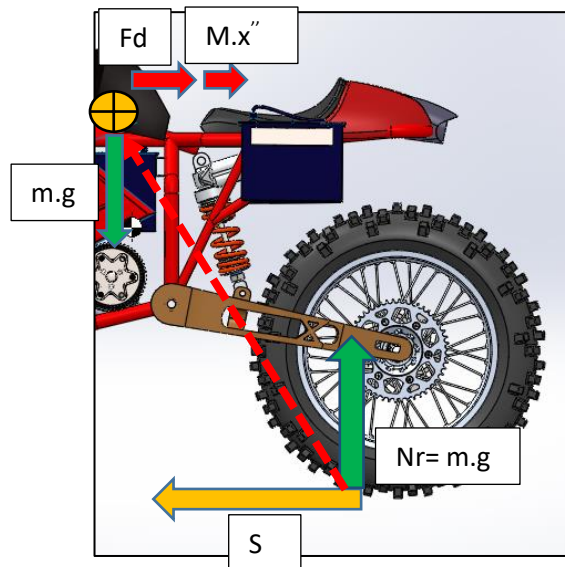


Figura 24. Fuerzas causadas por Wheeling en rueda posterior

2.5.4 Movimiento curvilíneo

2.5.4.1 Ángulo ideal de inclinación

El ángulo ideal de inclinación es el ángulo en el cual la motocicleta puede circular en una curva a velocidad constante.

Durante este instante se generan 2 momentos:

- Un momento que provoca la inclinación de la motocicleta hacia un ángulo de inclinación más pequeño, provocado por la fuerza centrífuga
- Un momento que induce a una inclinación mayor provocado por el peso de la misma.

Si la sección transversal del neumático es muy pequeña, es decir, tiende a ser nula, las ecuaciones de equilibrio de los momentos, nos permiten calcular el máximo ángulo de inclinación (ϕ_i), en función de la velocidad tangencial de la motocicleta V y del radio de la curva R_c medido desde el Cdg de la motocicleta hasta el centro de la curva:

$$\phi_i = \arctan \frac{R_c v^2}{g} = \arctan \frac{v^2}{g \cdot R_c} \quad [2.10]$$

Donde Ω significa la velocidad angular y V es la velocidad lineal de la motocicleta

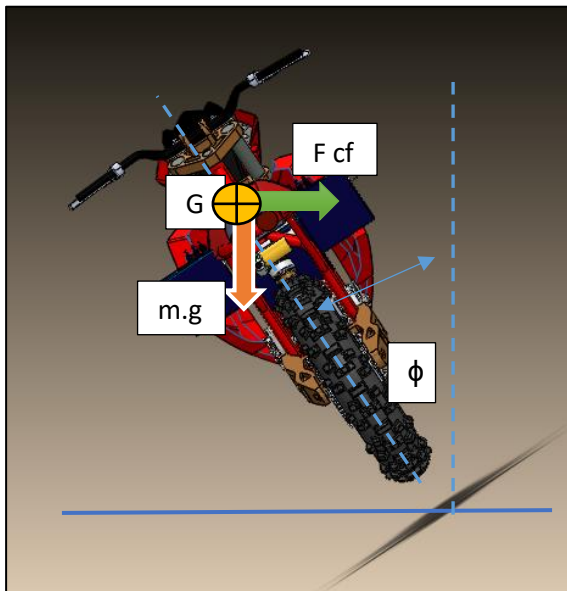


Figura 25 Ángulo ideal de inclinación

2.6 Hipótesis de carga

Durante el funcionamiento de la motocicleta, el brazo oscilante posterior estará sujeto a diversos tipos de carga y en cada una de ellas debe soportar todos los esfuerzos y deformaciones.

Es por eso que se debe identificar todas aquellas situaciones donde el oscilante posterior presente situaciones en donde pueda fracasar el elemento.

Hay que tener presente que el oscilante debe ser suficientemente rígido para que la geometría de la motocicleta no se vea alterada en parámetros básicos como la inclinación de la rueda trasera respecto a la delantera o el desplazamiento del plano longitudinal de la rueda trasera respecto al de la delantera.

Por otra parte, el oscilante es el elemento que une la rueda y el chasis de la motocicleta y debe ser capaz de transmitir todas las fuerzas que interaccionen.

El oscilante optimizado tendrá como fin la sustitución del original de la motocicleta, distinto en su concepción, y este será modelado y simulado bajo los mismos criterios.

Las simulaciones realizadas incluirán el análisis de las siguientes deformaciones típicas en el basculante de la motocicleta:

- Deformación vertical
- Deformación lateral
- deformación por torsión.

2.6.1 Cargas aplicadas sobre el brazo oscilante

En este estudio es necesario calcular las cargas más desfavorables a las cuales va a ser sometido el brazo oscilante de la motocicleta.

El peso de la motocicleta es de 164 kg.

Considerando el peso promedio de una persona como 80 kg, el total del peso de la motocicleta es 244 kg. y según (Noriega & Enrique, 2014). *En la mayoría de los vehículos de dos ruedas, la distribución del peso en el eje trasero es del 58% al 65%*

Para el modelo seleccionado, la distribución de peso se toma como 60% en el eje trasero. También 30% de peso se reduce debido a los neumáticos y ruedas y otras masas no suspendidas, Por lo tanto, la carga neta en el brazo oscilante puede ser calculado como:

$$L_s = [m_s + 2m_p] \times 0.6 \quad (1) = \mathbf{194.4 \text{ kg.}} \quad [2.11]$$

Este 194.4 kg soporta el eje posterior se distribuirá por igual en las dos vigas laterales en caso de que la motocicleta esté funcionando en trayectoria rectilínea.

La carga actuará en un ángulo de aproximadamente 53° en que el amortiguador está montado. Por lo tanto, las cargas están separadas en componentes verticales y horizontales.

$$- \text{ Carga vertical } L_{vs} = L_s \sin \theta_s = 194.4 * (\sin 53) = \mathbf{1523.04N} \quad [2.12]$$

- Carga horizontal $L_{vh} = L_s \cos \theta_s = 194.4 * (\cos 53) = \mathbf{1147.69N}$. [2.13]

En el análisis aplicando la resultante de estas fuerzas se obtienen resultados adicionales

2.6.2 Aceleración en línea recta

En esta situación la aceleración de la motocicleta es en el mismo sentido de rodaje con ciertas condiciones:

- Pendiente nula
- Sin baches e irregularidades
- Ángulo de inclinación lateral de la calzada nulo
- El peso de la motocicleta incluye al piloto
- Piloto 80 kg
- Sin movimiento entre la báscula y chasis
- No existen cargas aerodinámicas
- Fuerza de resistencia a la rodadura despreciable
- Aceleración limitada por Wheeling
- Cdg en función de modelo original y piloto en posición.

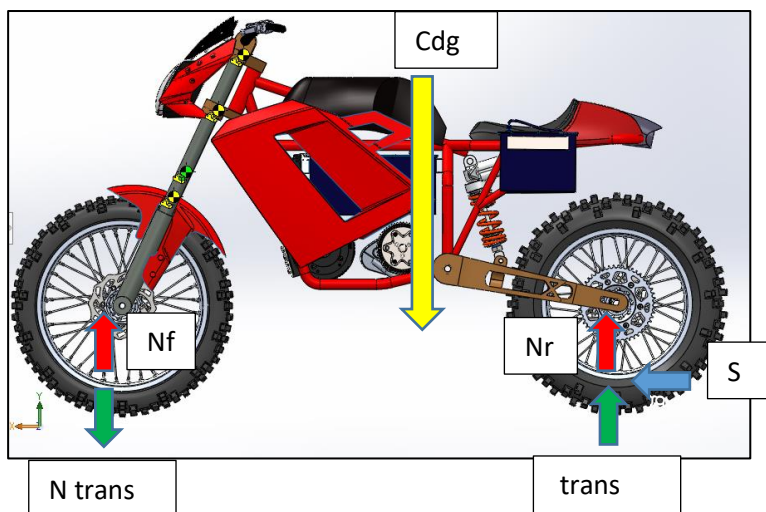


Figura 26 Fuerzas sobre la motocicleta en línea recta.

En este caso se debe encontrar cual es la aceleración máxima que podrá alcanzar la motocicleta.

Se sabe que puede venir limitada por la adherencia del neumático o por el vuelco de la motocicleta.

En caso de limitación por vuelco de motocicleta sabemos que el condicionante de la situación límite es

$$N_f = 0N. \quad [2.14]$$

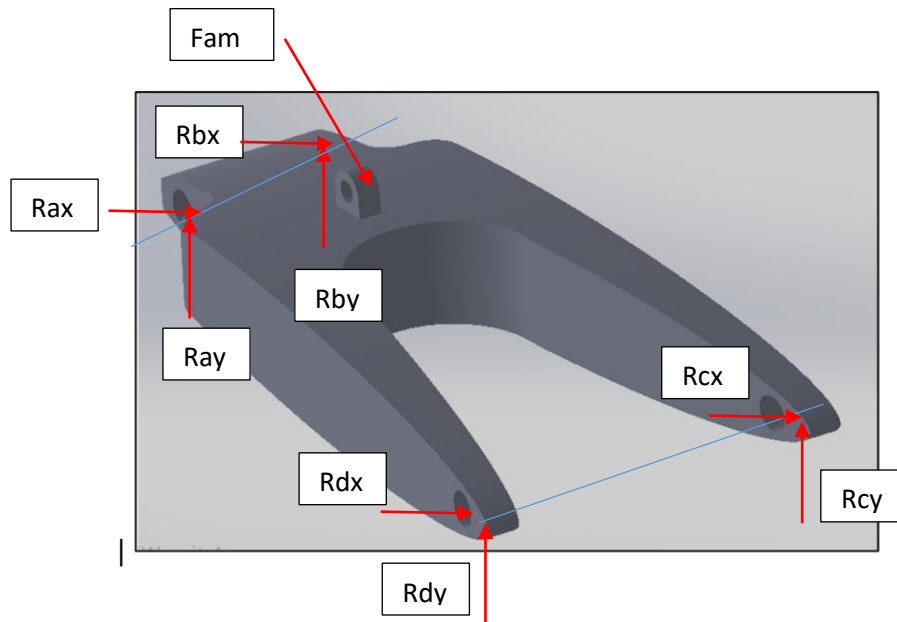


Figura 27 Diagrama de cuerpo libre aceleración en línea recta.

2.6.3 Aceleración lateral en curva

Las curvas son uno de los criterios más importantes en el diseño de componentes de la motocicleta. Durante las curvas, los diferentes componentes están sujetos a variación en cargas en magnitud como en dirección. En el brazo oscilante actúan altas fuerzas laterales en estado de desequilibrio.

La magnitud de la variación depende del ángulo de inclinación y la velocidad del vehículo.

Se calculan las cargas sobre el puente posterior de la motocicleta teniendo en cuenta el movimiento curvilíneo con velocidad tangencial respecto a su trayectoria, constante.

Para la carretera se toman las mismas consideraciones que en la hipótesis anterior:

- Pendiente nula
- No existen baches ni otras irregularidades
- Ángulo de inclinación lateral de la calzada nulo
- Radio de curvatura constante
- Se entiende como el conjunto formado por la misma y el piloto.
- Piloto de 80kg de peso.
- No existe movimiento relativo entre el basculante y el chasis.
- Neumático trasero original del modelo tomado como base de trabajo.
- No existe deformación en el neumático trasero.
- La motocicleta no está aplicando par motor.
- Velocidad limitada únicamente por ángulo de inclinación.
- Fuerza de resistencia a la rodadura nula.
- CdG en función de modelo original y piloto.

Se supone que el 20% más de carga son transferido al lado interno durante las curvas. Por lo tanto, el interior lateral tendrá el 70% del peso total y el resto 30% en el haz lateral exterior. Si consideramos un máximo ángulo de viraje de 40°, y dividamos las fuerzas en vertical y componentes horizontales, habrá desequilibrio lateral y torsión.

$$F_{\max} = 0.7 \times 209 \times 9.81 = \mathbf{1435.203 \text{ N}}$$

[2.15]

y restante 30%

$$F_{min} = 615.087 \text{ N.}$$

[2.16]

Los valores máximos, es decir, el brazo oscilante lateral interno y la parte media se analiza. El lado interno de brazo experimentaría más fuerza que la externa. El desequilibrio estará actuando en la parte media.

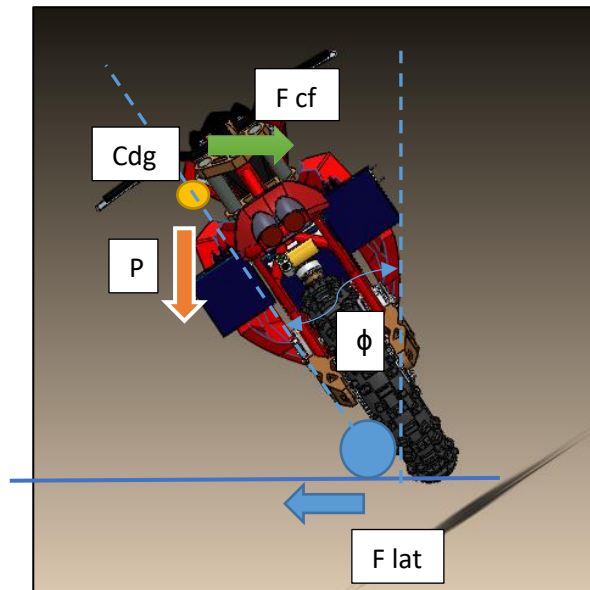


Figura 28 Equilibrio durante trayectoria curva sin aceleración longitudinal.

2.6.4 Diagrama de cuerpo libre para cargas laterales

En el diagrama de la figura 28 se puede apreciar las reacciones en el perno pasante que une el brazo oscilante con el chasis de la motocicleta, la fuerza que representa el amortiguador y en los extremos del brazo oscilante la fuerza lateral provocada por la acción de la curva.

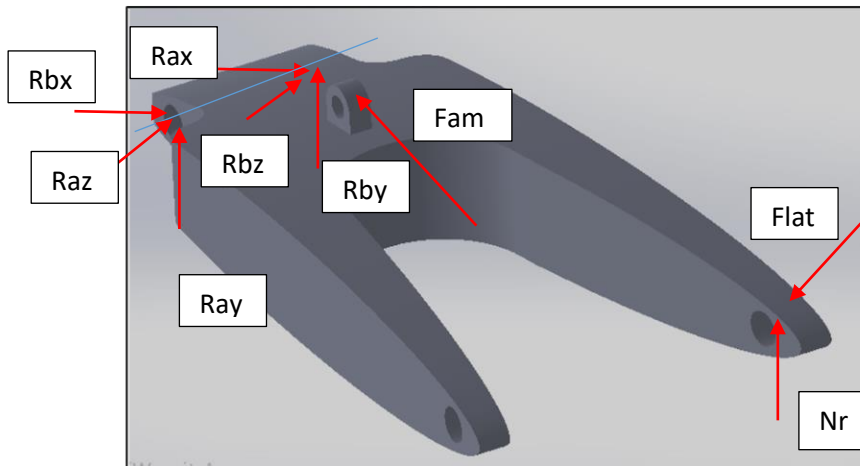


Figura 29 Diagrama de cuerpo libre para cargas laterales

CAPITULO 3

3. Proceso De Optimización Topológica

3.1 Introducción

Tomando en cuenta que la intención de la optimización topológica para este estudio, es la reducción de peso del brazo oscilante, y que este además pueda soportar las cargas planteadas en el capítulo anterior, se procede a realizar el planteamiento de la propuesta de modelo del brazo oscilante optimizado.

Definida las cargas en el capítulo anterior, y con el brazo oscilante base, el cual lo restringe únicamente la geometría del espacio del plato oscilante, se procede a realizar modelo inicial, el cual mediante la utilización de herramientas CAE será sometido al proceso de optimización con el fin de disminuir el peso del elemento y evaluar si el modelo generado cumple con los requisitos planteados al inicio de este proceso.

La geometría del brazo oscilante está limitada por la distancia entre el neumático y el soporte del cuadro del chasis, además el brazo soporte debe mantener el ángulo del amortiguador.

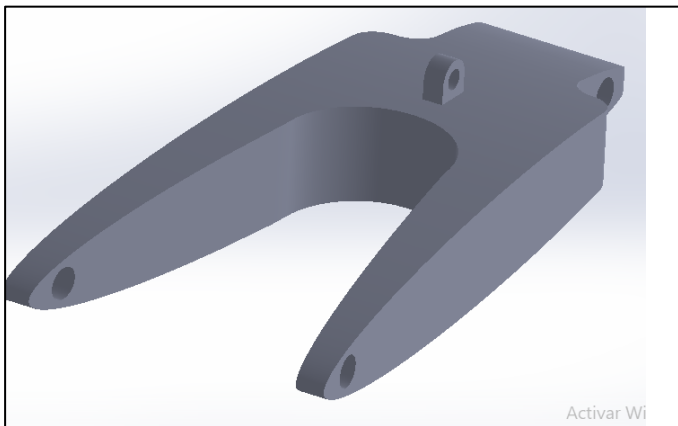


Figura 30 Brazo oscilante posterior modelo.

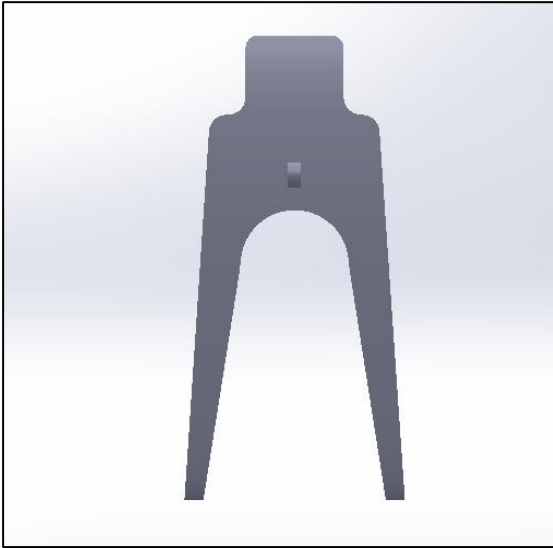


Figura 31 Vista Superior del brazo oscilante posterior modelo.

La masa inicial del brazo oscilante base es **23,396 kg**. La cual va a ser disminuida luego del proceso de optimización.

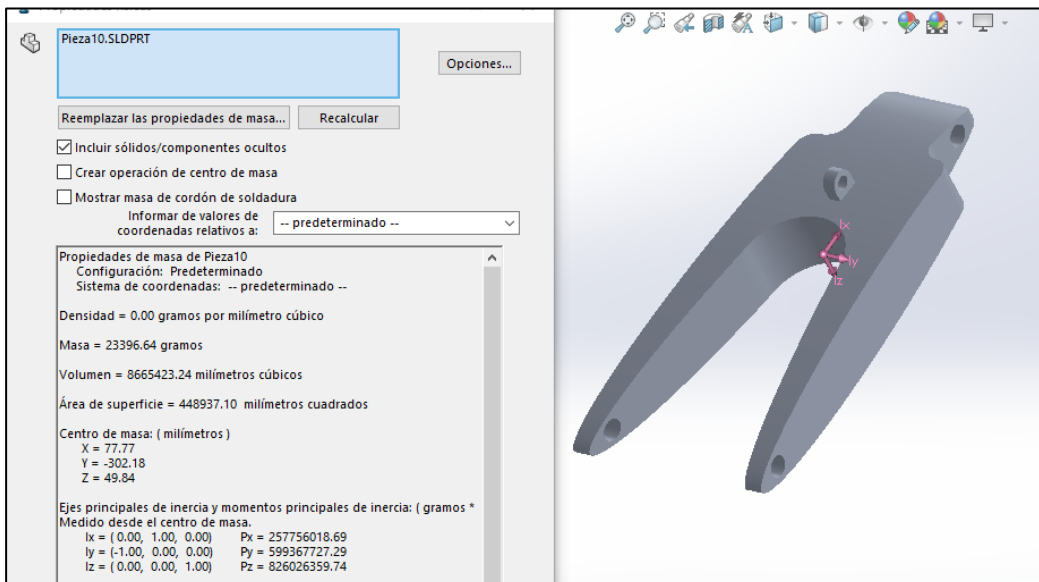


Figura 32 Propiedades físicas del plato oscilante

3.2 Generación del mallado

Para analizar el modelo es necesario crear una malla, es decir un conjunto de elementos finitos en los cuales se definen las características de los elementos a ser analizados.

Estos elementos deben partir de una geometría continua sin irregularidades en las uniones, aristas, bordes y caras; el tamaño de los elementos debe ser el adecuado, dependiendo de la geometría y tamaño del elemento.(Hypermesh, 2011)

3.3 Tamaño del elemento

La importancia del tamaño del elemento del mallado es una de las consideraciones más importantes del proceso ya que el proceso de resolución es una técnica numérica, la cual se basa en la resolución de ecuaciones diferenciales parciales mediante integración y solución de matrices.

Cuando el tamaño del elemento es relativamente pequeño o tiende a cero el porcentaje de error es menor, sin embargo, el porcentaje de error final es la sumatoria de todos esos pequeños errores de cada uno de los elementos antes indicados, es por ello que los errores presentados deben tender a ser cero.

Pero a su vez se debe indicar que a mayor número de elementos el costo computacional es mayor, ya que le tomara a la computadora mayor tiempo poder resolver la optimización.

El tamaño de cada elemento de la malla seleccionado para esta optimización es de 0,5mm.

En total se lograron 477628 elementos 3D en forma de tetraedros

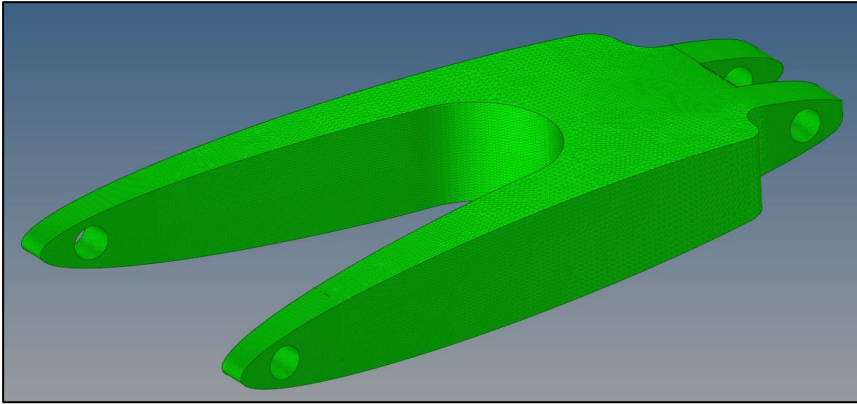


Figura 33 Plato oscilante posterior en proceso de mallado.

3.4 Calidad de mallado

Una vez mallado cada componente se inspecciona para poder localizar posibles errores presente en la misma lo que nos impedirá poder realizar el proceso.

De la calidad del mallado y los errores presentes dependerá la solución, es decir a mayor cantidad de errores por número de elementos mayor es el porcentaje de error total.

Para ello se debe corroborar el porcentaje de errores en relación al número de elementos y verificar en la tabla a continuación el criterio del diseñador, para verificar si el mallado es el adecuado para el análisis respectivo.

Valores de elementos defectuosos según el parámetro de malla		
Parámetros	Elementos defectuosos	Porcentaje de error
Relación de aspecto	5	0%
Deformación	6	0%
Relación jacobiana	0.7	0%
Angulo máximo de triángulo	20	0%
Angulo mínimo del triángulo	120	0%

Tabla 6 Análisis de la calidad de malla mediante los valores de parámetros.

<input type="radio"/> 1-d			
<input type="radio"/> 2-d	warpage	>	5 . 0 0 0
<input checked="" type="radio"/> 3-d	aspect	>	5 . 0 0 0
<input type="radio"/> time	skew	>	6 0 . 0 0 0
<input type="radio"/> user	tet collapse	<	0 . 1 0 0
<input type="radio"/> group	cell squish	>	0 . 9 0 0

length	<	1 . 5 0 0	tria faces:	min angle	<	2 0 . 0 0 0
length	>	4 . 0 0 0		max angle	>	1 2 0 . 0 0 0
jacobian	<	0 . 7 0 0	quad faces:	min angle	<	4 5 . 0 0 0
equia skew	>	0 . 9 0 0		max angle	>	1 3 5 . 0 0 0
vol skew	>	0 . 9 5 0				
vol AR	>	5 . 0 0 0				

Figura 34 Valores de criterio de Calidad.

Tabla 7 Valores aceptable de malla (Altair, university)

Valores aceptables de parámetros de malla

parámetros	valores
relación de aspecto	ideal =1 (aceptable ≤ 5)
deformación	ideal =0° (aceptable $\leq 45^\circ$)
relación jacobiana	ideal =1 (aceptable $\leq 0,6$)
Angulo máximo del triangulo	ideal =60° (aceptable $\leq 120^\circ$)
Angulo mínimo del triangulo	ideal =60° (aceptable $\leq 120^\circ$)

3.5 Análisis preliminar

3.5.1 Zonas de diseño y no diseño

Las zonas de diseño y no diseño es la manera en la cual se define cual zona va a ser sometida al proceso de optimización y cual no, por restricciones geométricas, cualquier elemento en el cual este definido una restricción o fuerza debe definirse como zona de no diseño.

Para nuestro caso de estudio, en la figura 32, se define las zonas de diseño y no diseño, toda la zona de color amarillo es la zona en la cual se realiza la optimización, zona de diseño, y la zona roja es la zona en la cual están las restricciones y las fuerzas, zona de no diseño.

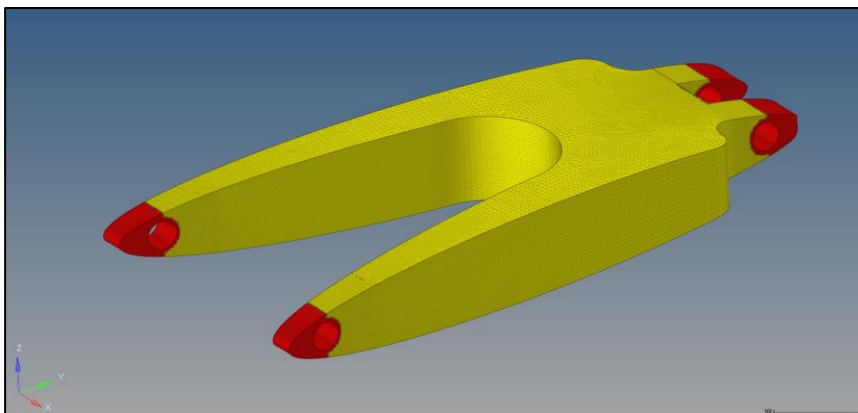


Figura 35 Definición de zonas de diseño y no diseño

3.5.2 Cargas

La aplicación de cargas definidas en el capítulo anterior se realiza en las zonas de fuerza y momento, como es el caso del soporte del amortiguador, en el cual tenemos 2 componentes, en los largueros del brazo oscilante hay un empotramiento definido por la llanta posterior y su contacto con el suelo, además una fuerza lateral de empuje definida por el instante en curva, así como en el enlace del brazo oscilante con el chasis existe un momento y un empotramiento.

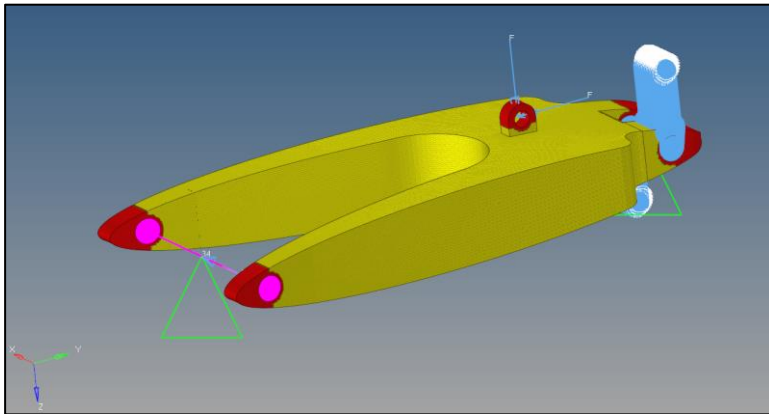


Figura 36 Cargas aplicadas en el brazo oscilante para el proceso de optimización

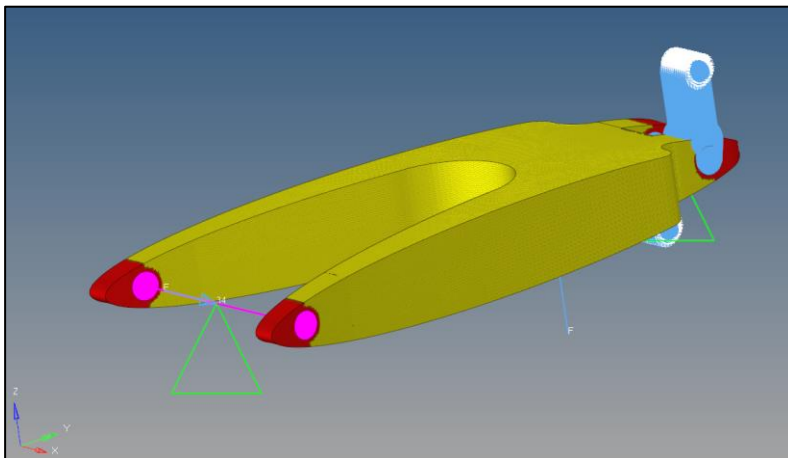


Figura 37 Cargas aplicadas en el brazo oscilante para el proceso de optimización

3.5.3 Restricciones de manufactura

Para poder hacer un análisis con restricciones de manufactura Se seleccionó la restricción por plano, el uno en el plano XY y el otro en el plano YZ.

3.5.4 Propiedades del material

El material seleccionado para la optimización es el aluminio 6061 (Sanmetals, 2010) el cual cuenta con las propiedades indicadas en la tabla 4 a continuación:

Tabla 8 Propiedades del aluminio. 6061

Aluminio 6061 (aluminio – magnesio- silicio)										
Composición Química										
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Total
Min	0,40		0,15		0,80	0,04				
Máx.	0,80	0,70	0,40	0,15	1,2	0,35	0,25	0,15	0.05	El resto

Tabla 9 Propiedades físicas típicas a temp. 20°C

Modulo elástico Young (N/mm²)	Módulo de rigidez (N/mm ²)	Peso específico densidad (g/cm ²)	Intervalo de fusión °C	Coefficiente de dilatación lineal (1/10 ⁶)	Conductividad térmica W/mK	Resistencia eléctrica a 20 °C % IACS
70000	26200	2,70	580 – 650	23,3	T4 155 T6 166	T4 -40 T6- 43

Sut = **Sy =**

3.5.4.1 Aptitudes tecnológicas

el aluminio 6061 es un elemento de gran dureza y fácil mecanizado, bajo en peso, muy bueno a la soldadura por llama y resistencia eléctrica, se comporta muy bien en ambientes rurales y al aire libre, muy bueno en procesos de embutición y forja.

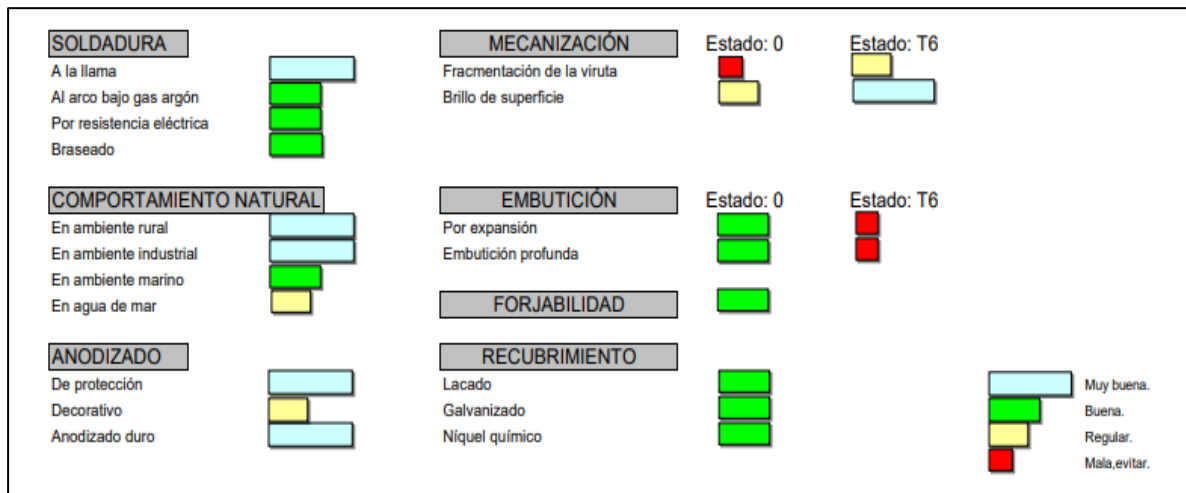


Figura 38 Aptitudes tecnológicas del aluminio 6061T (Matweb,2020)

3.5.5 Resultados

Las herramientas de optimización nos permiten obtener resultados de diseño óptimos, en este caso se realizan dos procesos de optimizaciones, una con restricción de manufactura en el plano XY y la otra con restricción de manufactura en el plano YZ, esto con el fin poder realizar dos análisis resultantes de esfuerzo y deformación, y obtener cuál de las dos presenta los mejores resultados.

3.6 Optimización con restricción de manufactura en el plano XY

En la optimización en el plano XY las zonas a ser trabajadas son los lugares inferiores al brazo oscilante a lo largo de los largueros del brazo y en la zona intermedia de lo largueros.

En la figura 38 y 39 se puede apreciar la vista externa y el contorno de la densidad de elementos en los largueros del brazo soporte, con restricción en el plano XY.

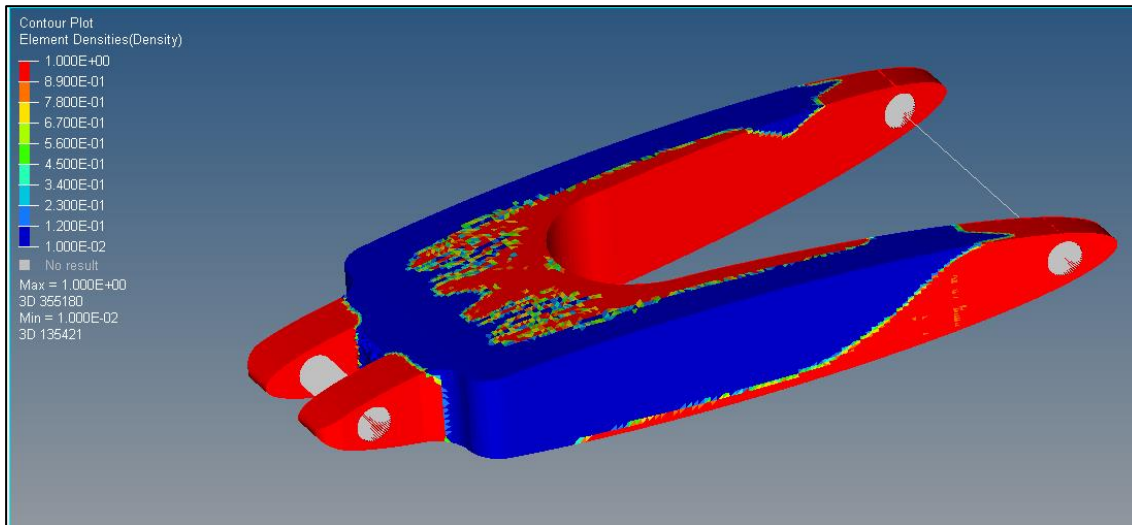


Figura 39 Contorno inferior de densidad de elementos, restricción de manufactura en el plano XY

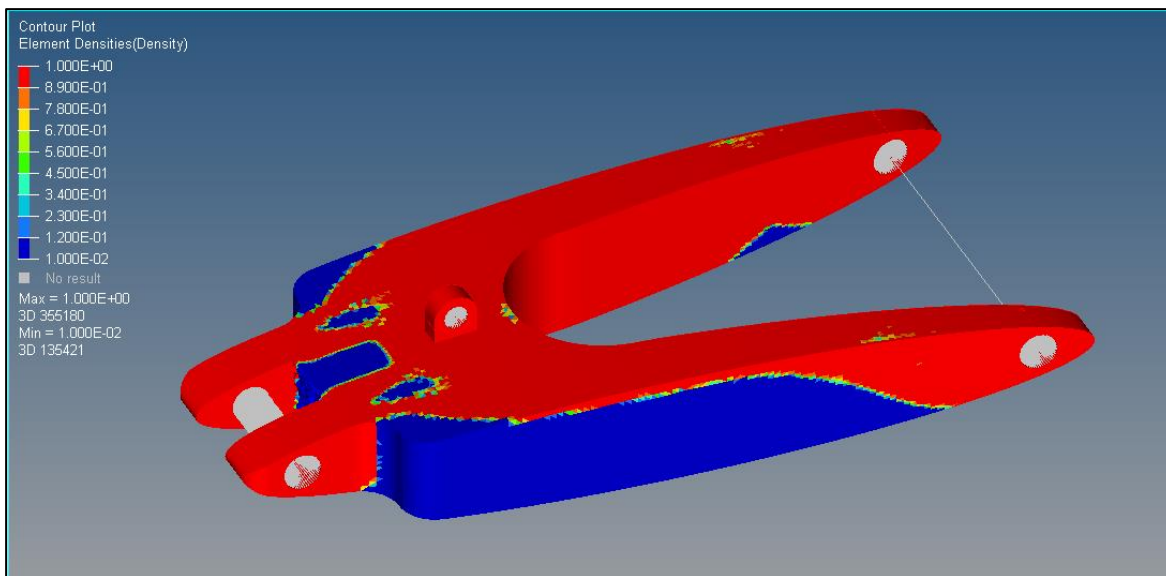


Figura 40 Contorno superior de densidad de elementos, restricción de manufactura en el plano XY

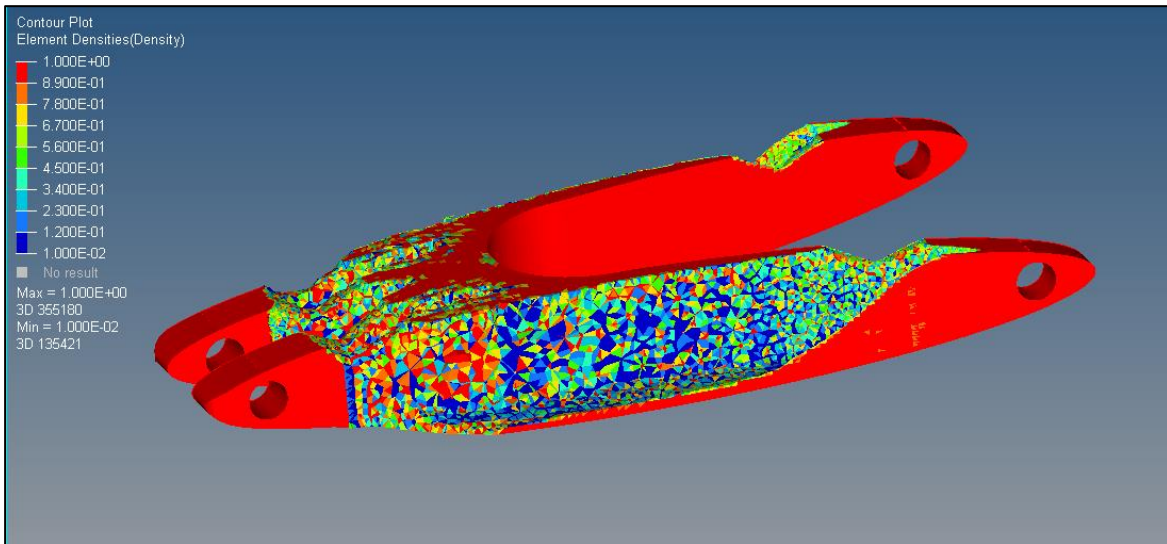


Figura 41 Resultado de la optimización en plano XY

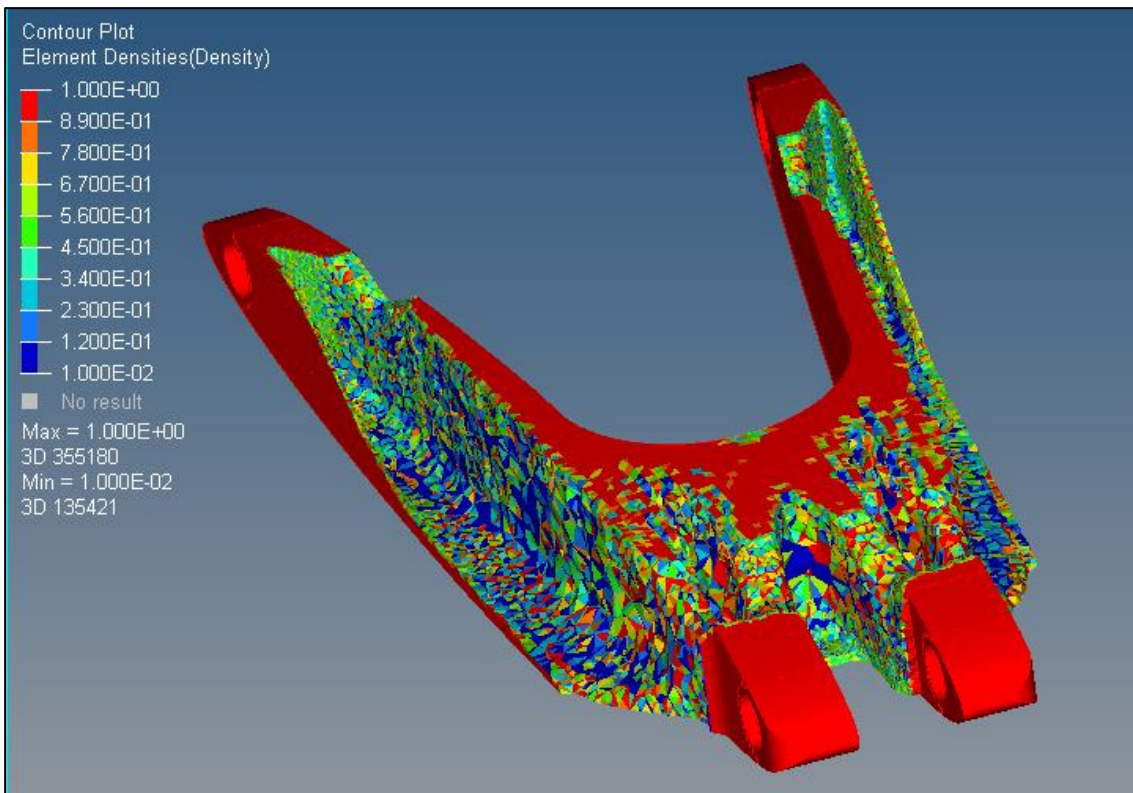


Figura 42 Resultado de la optimización en plano XY

Luego del proceso de optimización se debe generar en base al modelo optimizado el nuevo brazo soporte.



Figura 43 modelado del brazo oscilante optimizado en el plano XY.

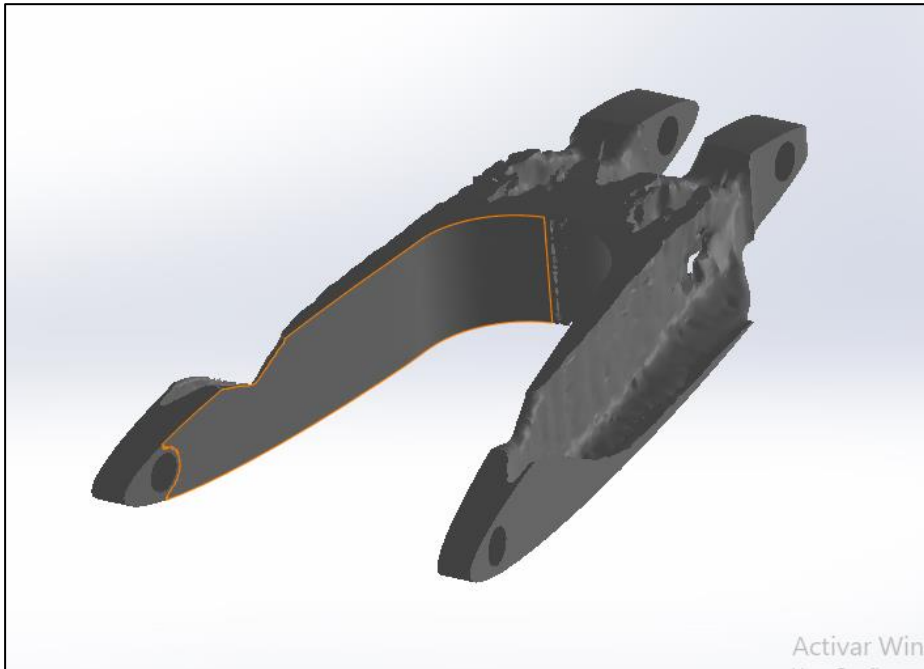


Gráfico 44 Modelado a pretender del brazo oscilante optimizado en el plano XY.

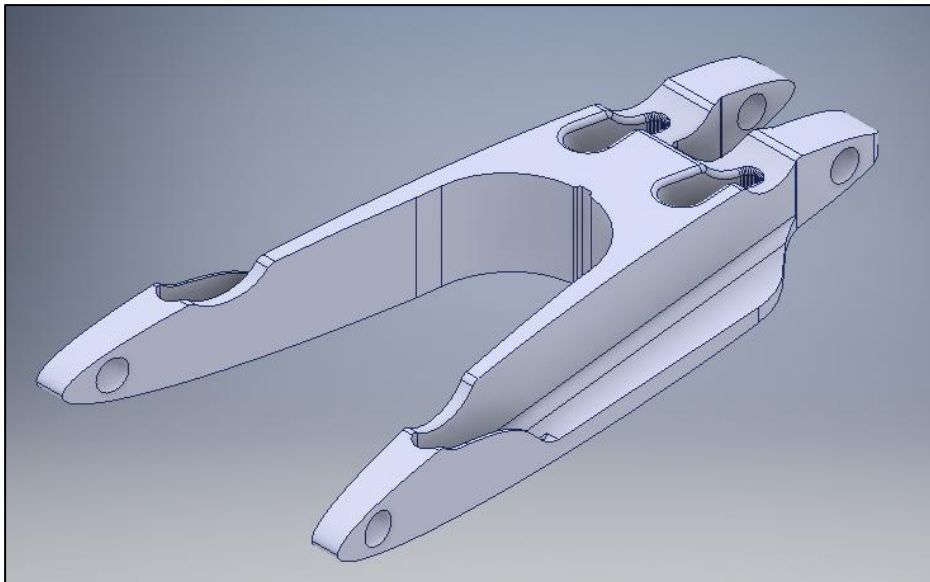


Figura 45 Resultado brazo oscilante optimizado en el plano XY.

La masa del nuevo plato oscilante es 12,653kg reduciendo 10,73kg. Lo que equivale al 45,90 %

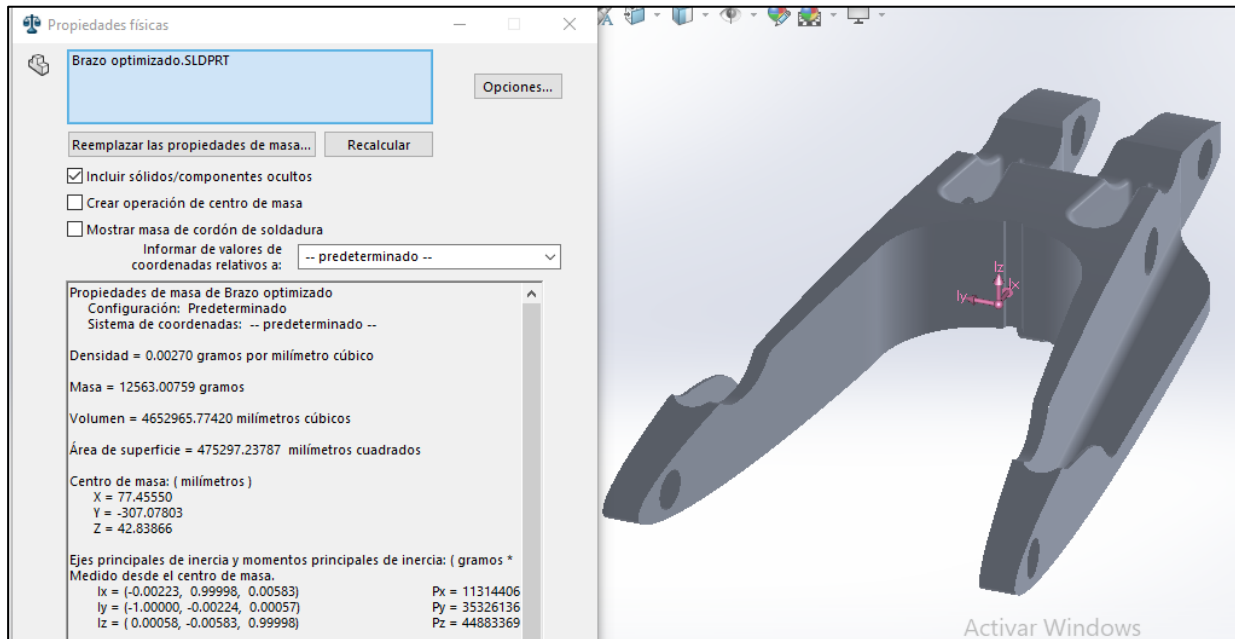


Figura 46 Propiedades físicas del brazo oscilante optimizado en el plato XY.

Plano del plato oscilante optimizado en el plano XY en el **anexo 1**

3.7 Optimización con restricción de manufactura en el plano YZ

En la optimización en el plano YZ las zonas a ser trabajadas son los lugares a través del brazo oscilante a lo largo de los largueros del brazo y en la zona intermedia de lo largueros.

En la figura 42a y 42b se puede apreciar la vista externa y el contorno de la densidad de elementos en los largueros del brazo soporte, con restricción en el plano XY.

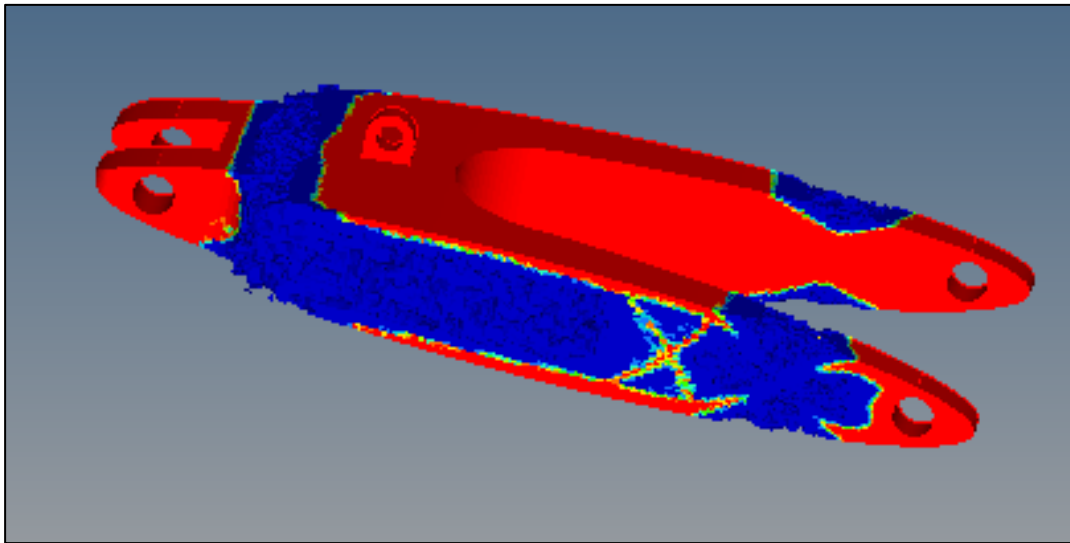


Figura 47 Contorno lateral de densidad de elementos, restricción de manufactura en el plano YZ

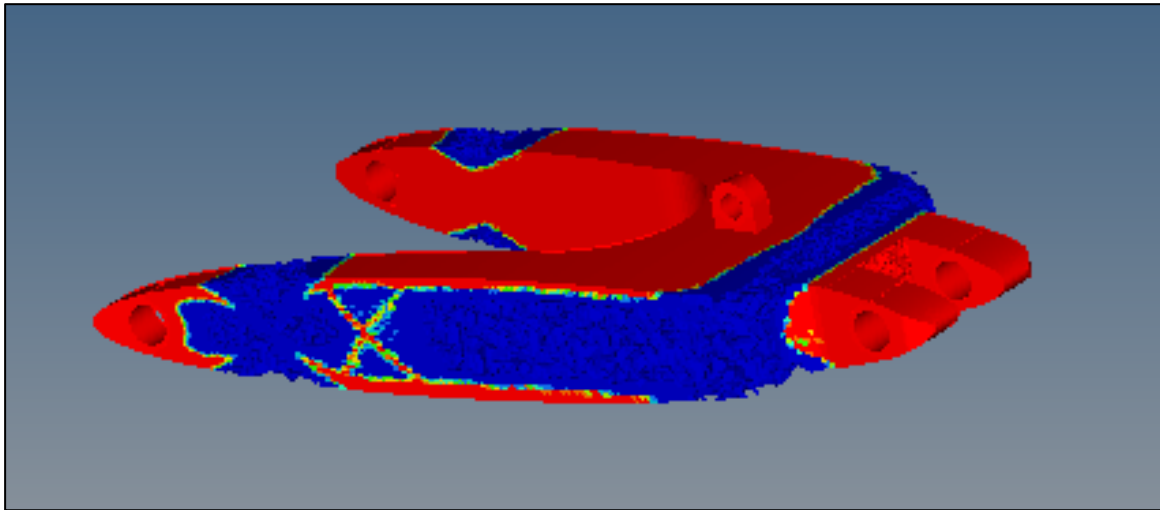


Figura 48 Contorno lateral de densidad de elementos, restricción de manufactura en el plano YZ

En la figura 43 y 44 se aprecia los resultados previos al modelamiento definitivo del brazo oscilante posterior.

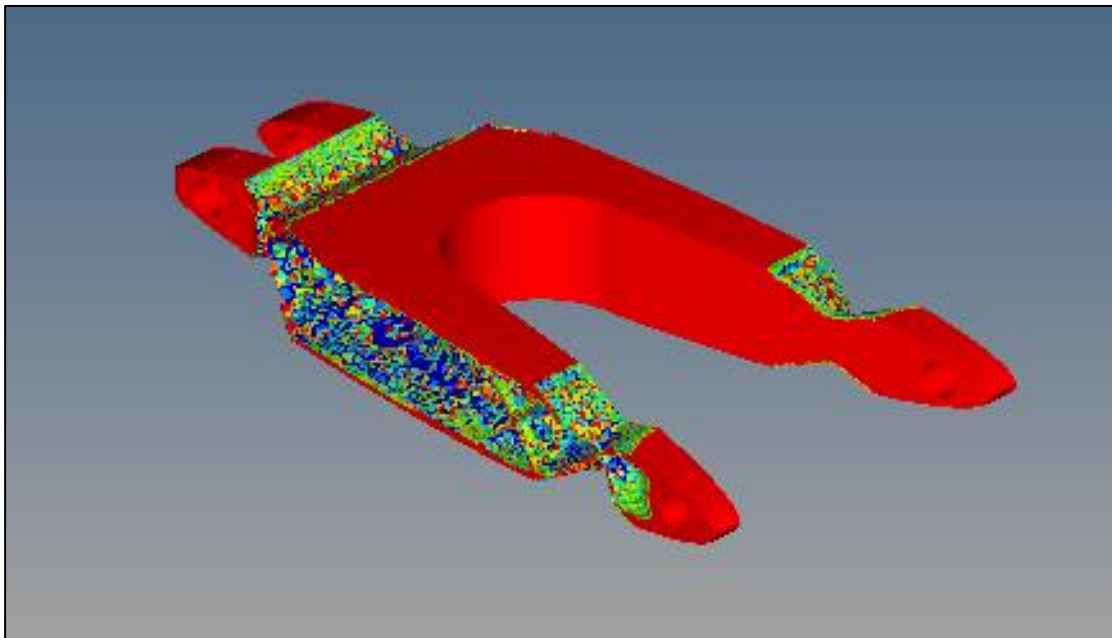


Figura 49 Resultado de la optimización con restricción de manufactura en el plano YZ

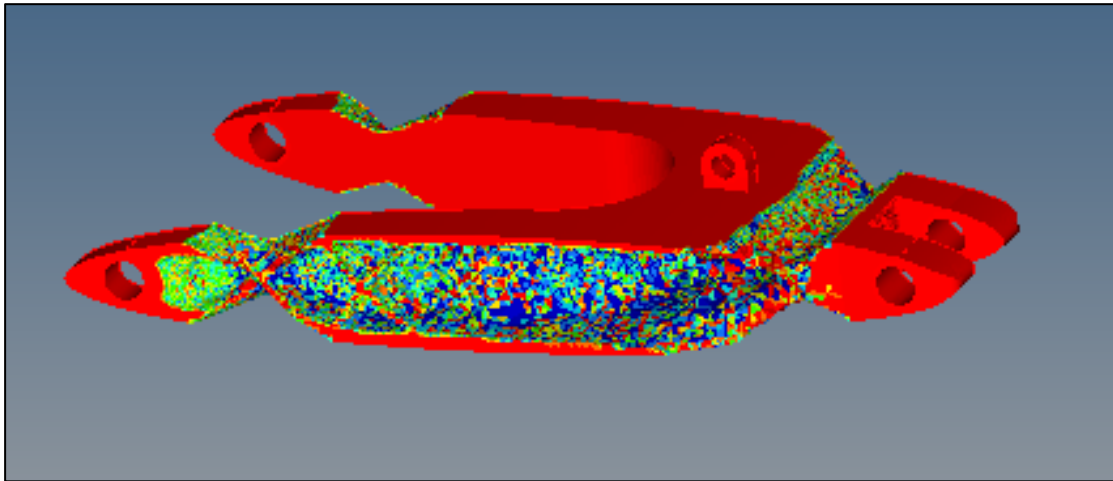


Figura 50 Resultado de la optimización con restricción de manufactura en el plano YZ

Luego se procede a realizar un modelamiento definitivo para definir la forma del brazo oscilante.

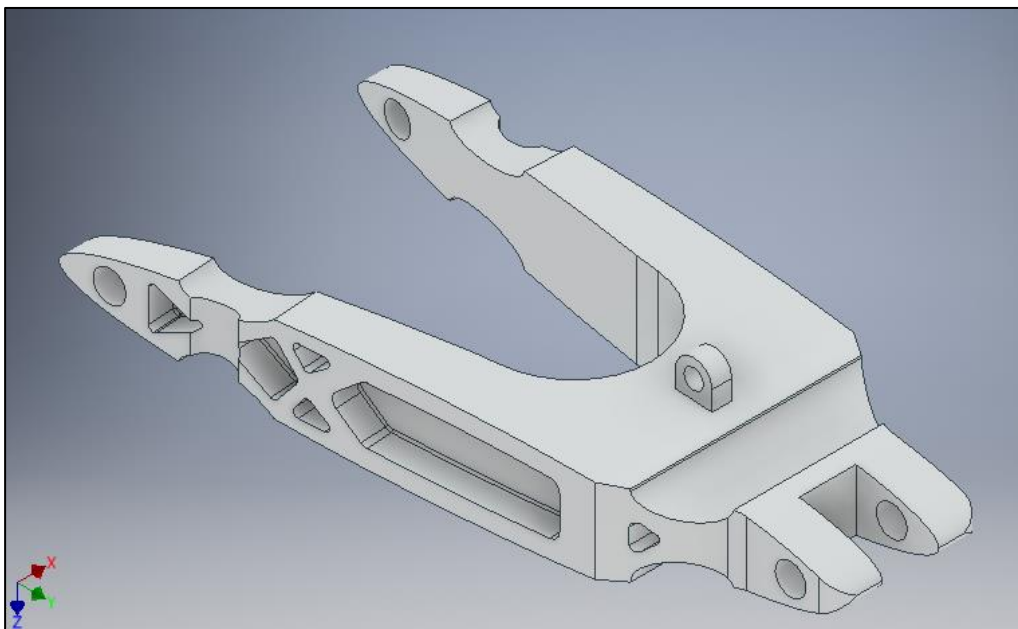


Figura 51 Resultado de la optimización del brazo oscilante con restricción de manufactura en el plano YZ

La masa del nuevo plato oscilante es 17,402kg reduciendo 5,99 kg. Lo que equivale al 25,60%

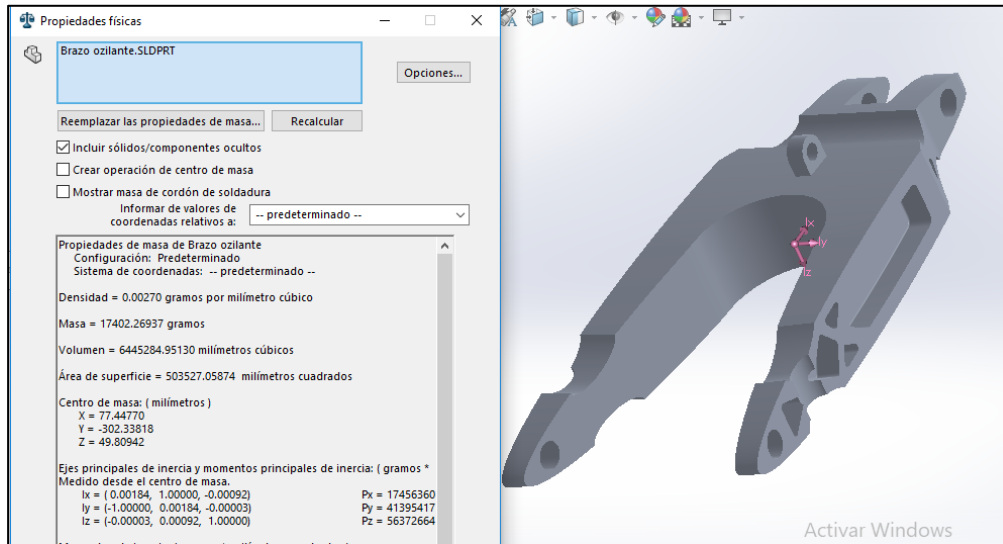


Figura 52 Propiedades físicas del brazo oscilante resultante en el plano YZ

Plano del plato oscilante optimizado en el plano XY en el **anexo 2**

Luego de desarrollar los capítulos anteriores, en los cuales se revisaron los cálculos de las fuerzas a los cuales están sometidos, se procede a proponer dos modelos de brazos oscilante con restricciones de manufactura en los planos XY y YZ, a los cuales se les someterá los análisis de esfuerzo y deformación, para identificar con cuál de ellos se obtiene mejores resultados.

CAPITULO 4

4. Validación

Una de las grandes ventajas de los softwares de ingeniería es que nos permite realizar la optimización dependiendo del plano de geometría, este caso, los planos de optimización serán los ejes XY y YZ.

Luego de realizado la optimización se procede a verificar, mediante el análisis de esfuerzos y deformación, en dos estados fundamentales, en curva y estático.

Con estos resultados se puede visualizar cuál de los dos brazos optimizados nos brinda un mejor resultado en concentración de esfuerzos y desplazamiento.

La masa del nuevo plato oscilante en el plano XY es 12,653kg reduciendo 10,743kg. Lo que equivale al 45,9% y la masa del nuevo plato oscilante en el plano YZ es 17,402 kg reduciendo 5,99 kg. Lo que equivale al 25,61%.

4.1 Esfuerzos

Como resultados luego del proceso de optimización se puede apreciar los esfuerzos sometidos en el brazo oscilante de la suspensión, bajo las cargas.

4.1.1 En la optimización en el plano YZ

4.1.1.1 En la optimización en el plano YZ en condición de curva

La mayor concentración de esfuerzos en la optimización en X es de **13.29 GPa** ubicados en los extremos del plato de suspensión y alrededor del soporte del amortiguador, esto debido a su geometría y a la unión del soporte del amortiguador con el brazo oscilante.

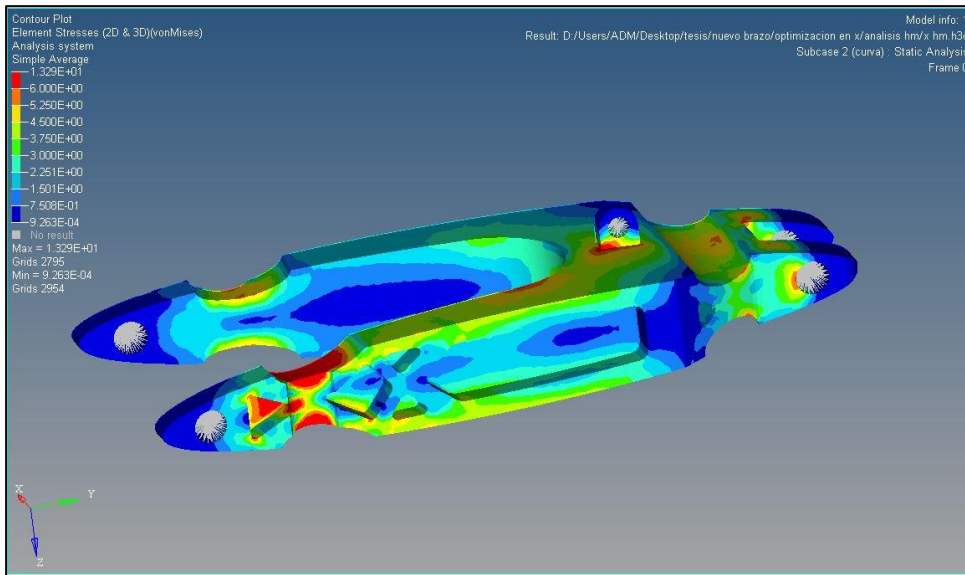


Figura 53 Esfuerzos del plato optimizado en YZ sometido a las cargas de una curva

4.1.1.2 En la optimización en el plano YZ en condición Estática

La mayor concentración de esfuerzos en la optimización en X en modo estático es de 5.69 MPa. ubicados en soportes del plato de suspensión y alrededor del soporte del amortiguador.

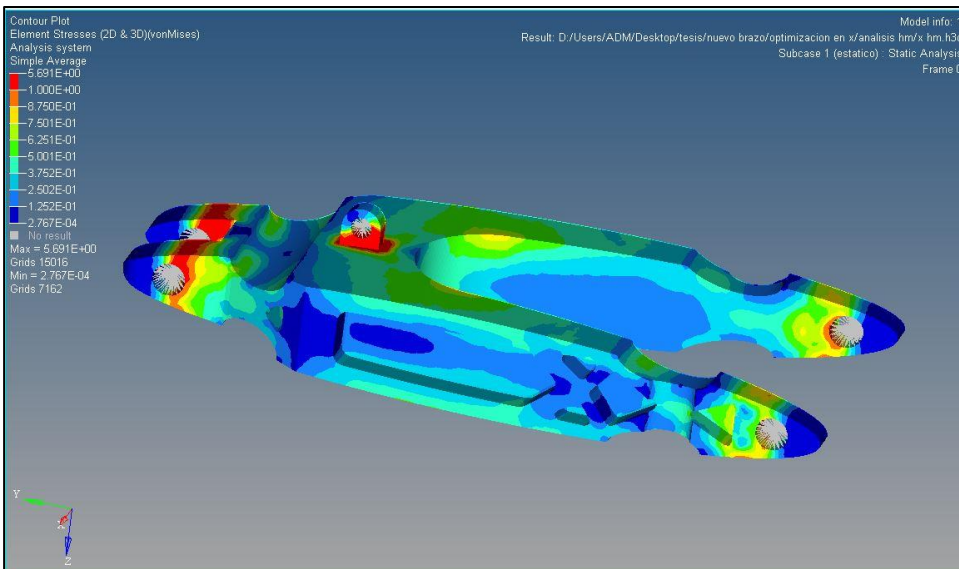


Figura 54 Esfuerzos del plato optimizado en X sometido a las cargas estáticas.

4.1.2 En la optimización en el plano XY

4.1.2.1 En la optimización en el plano XY en condición de Curva

La mayor concentración de esfuerzos en la optimización en Y es de 2.43 MPa ubicados en los extremos internos del soporte del plato de suspensión y a lo largo del brazo en el cual se aplica la mayor fuerza debido al sentido de giro de la curva.

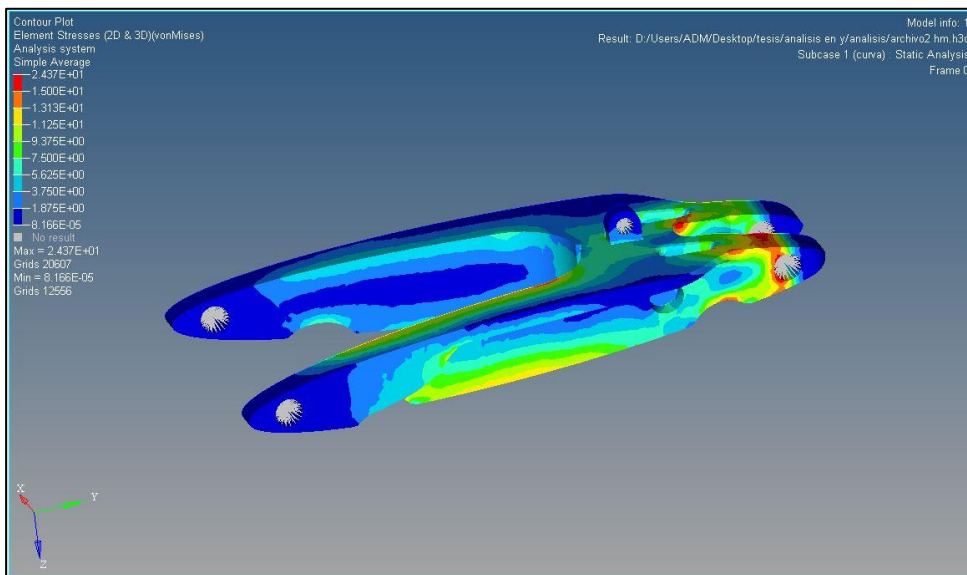


Figura 55 Esfuerzos del plato optimizado en XY sometido a las cargas estáticas.

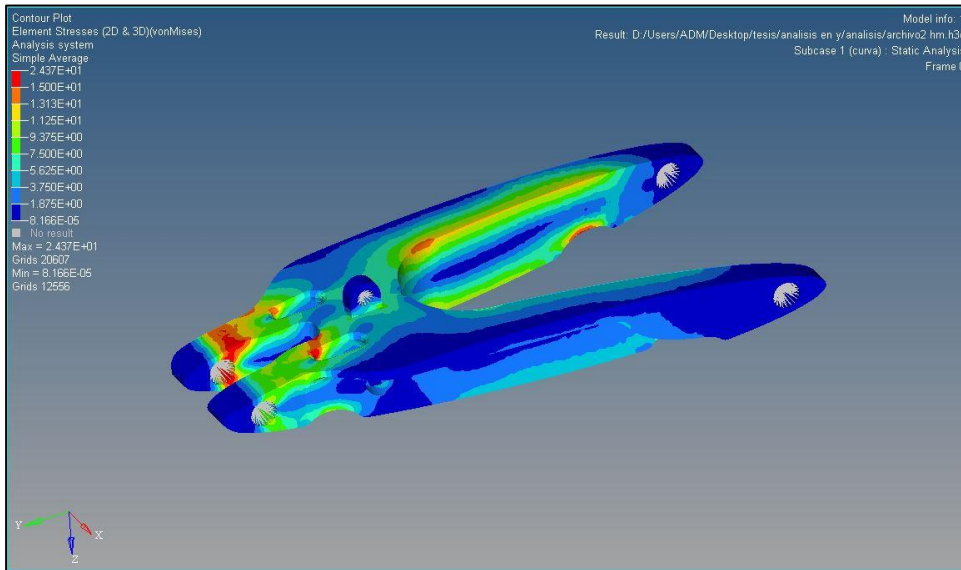


Figura 56 Esfuerzos del plato optimizado en XY sometido a las cargas de una curva

4.1.2.2 En la optimización en el plano XY en condición Estático

La mayor concentración de esfuerzos en la optimización en Y es de 6.02 MPa ubicados en los bordes del soporte plato de suspensión y los agujeros de los extremos del plato.

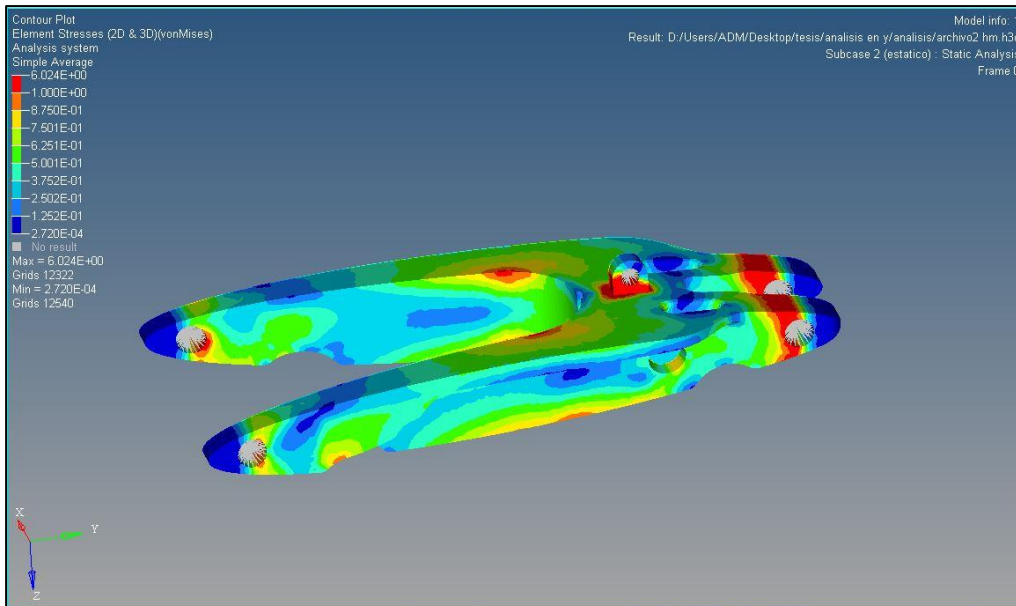


Figura 57 Esfuerzos del plato optimizado en Y sometido a las cargas estáticas.

*Deformación***4.1.3 Deformación en la optimización en el plano YZ****4.1.3.1 Deformación en optimización del plano YZ en condición de curva**

La mayor deformación en la optimización en X es de 0.522 mm ubicados en los extremos del plato de suspensión.

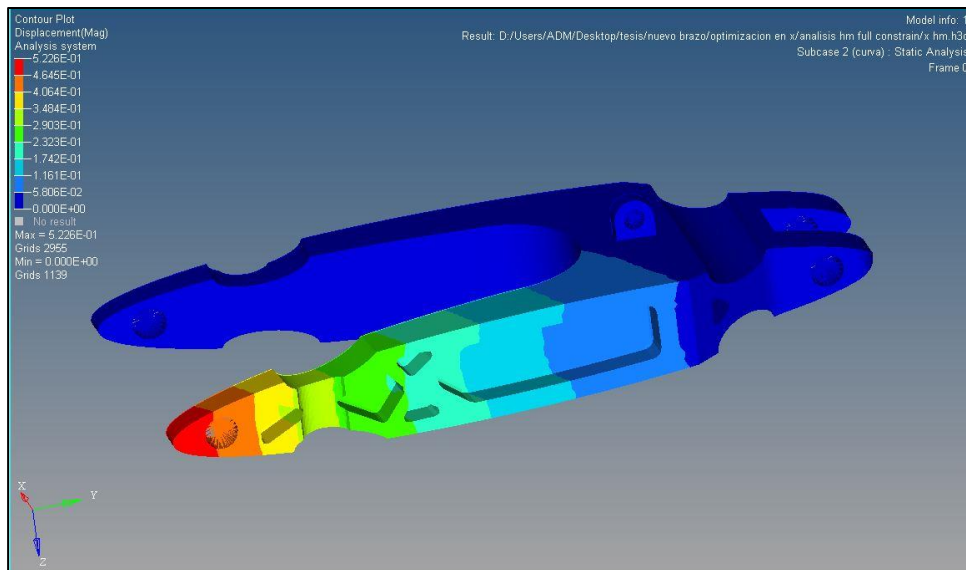


Figura 58 Deformación del plato optimizado en YZ sometido a las cargas de una curva

4.1.3.2 Deformación en optimización del plano YZ en condición estático

La mayor deformación en la optimización en YZ es de 0.0084 mm ubicados en el agujero soporte del amortiguador.

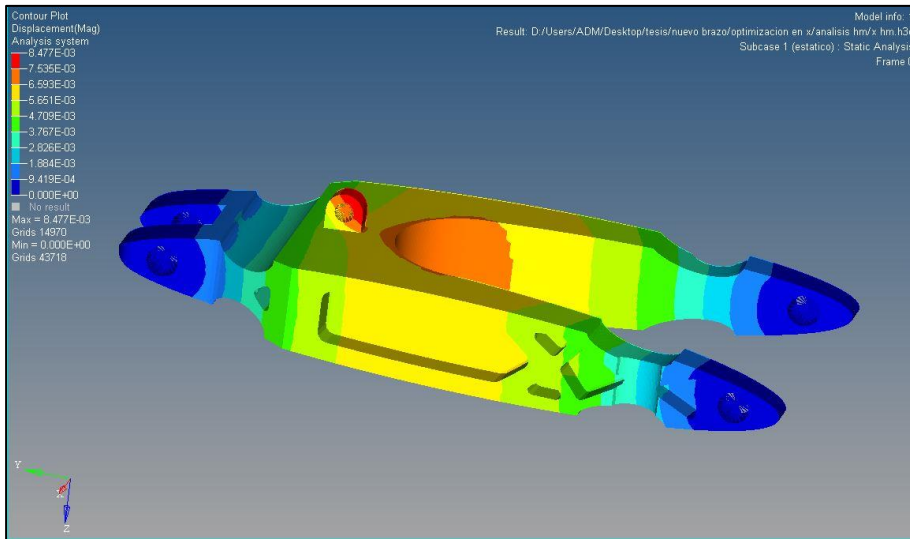


Figura 59 Deformación del plato optimizado en X sometido a las cargas estáticas

4.1.4 Deformación en la optimización en el plano XY

4.1.4.1 Deformación en optimización del plano XY en condición de Curva

La mayor deformación en la optimización en XY es de 1.056 mm ubicados en los extremos del plato de suspensión.

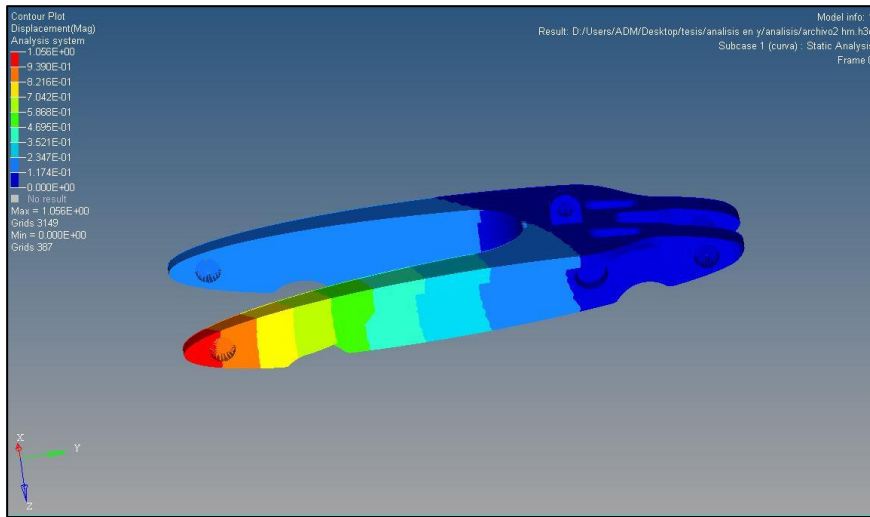


Figura 60 Deformación del plato optimizado en Y sometido a las cargas de una curva

4.1.4.2 Deformación en optimización del plano XY en condición Estático

La mayor deformación en la optimización en Y es de 0.0103 mm. ubicados en el agujero de soporte del amortiguador.

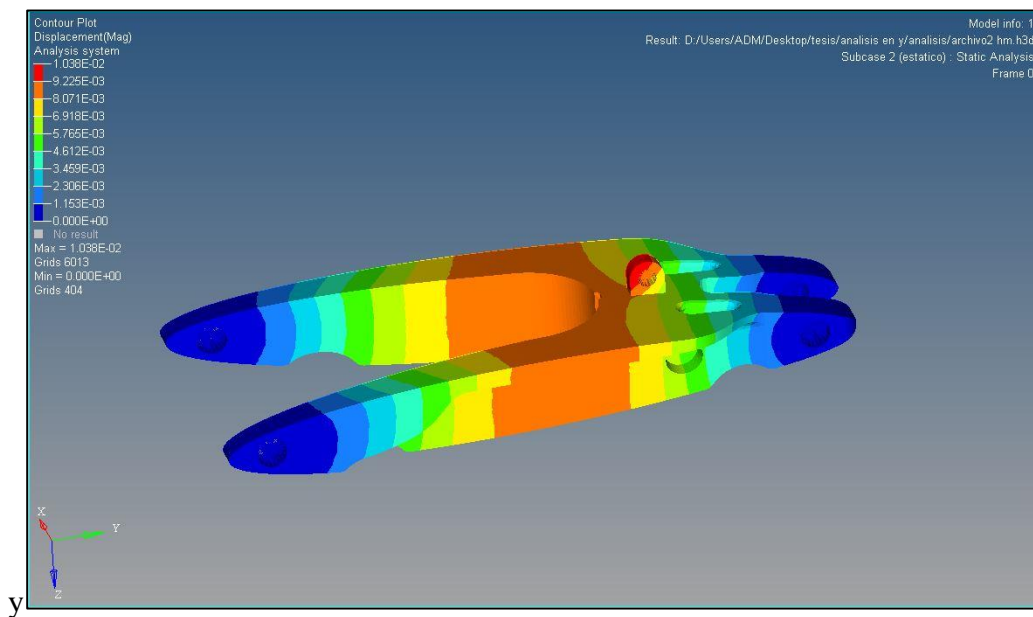


figura 61 Deformación del plato optimizado en Y sometido a las cargas estáticas.

4.2 RESULTADOS

Se puede apreciar en la tabla que el resultado de desplazamiento es mayor en la optimización en XY, en el análisis en curva (1,056mm) en comparación con el desplazamiento en YZ en curva (0,52mm).

Los esfuerzos en el brazo oscilante son mayores en la optimización en X en el análisis en curva (13,29GPa) en comparación con el esfuerzo en Y en estático (6,02GPa).

Tabla 10 resumen de resultados- optimización de plato de suspensión.

OPTIMIZACION PLATO DE SUSPENSION							
OPTIMIZACIÓN EN EL PLANO YZ				OPTIMIZACIÓN EN EL PLANO XY			
EN CURVA		ESTATICO		EN CURVA		ESTATICO	
DESP.(mm)	ESF(GPa)	DESP.(mm)	ESF. (GPa)	DESP.(mm)	ESF. (GPa)	DES.(mm)	ESF. (GPa)
0.52	13.29	0.008	5.69	1.056	2.437	0.0103	6.02

En la tabla anterior se puede apreciar los resultados de la optimización del brazo oscilante en los dos planos mencionados, el XY y YZ.

En el plano YZ el brazo tiene un esfuerzo mayor en la fase de curva (13,29 GPa), que en el plano XY (1,056 GPa).

En el plano XY el brazo tiene un mayor desplazamiento (1,056mm), en la fase de curva.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los objetivos del trabajo de tesis fueron cumplidos, se diseñó un brazo oscilante de una motocicleta, mediante la técnica de optimización topológica, en un software de diseño asistido por computadora (CAE), en el cual, se realizó una propuesta de diseño de un brazo oscilante estándar, en base a las dimensiones, en el que serán aplicados las cargas para su proceso de optimización.

Se realizó la optimización del brazo oscilante posterior, con el planteamiento de dos propuestas de optimización, la primera fijando un plano de manufactura en el eje XY y la otra en el plano YZ, La mejor propuesta de diseño, tanto desde el punto de vista de manufactura y factibilidad de producción, como la de peso, es la propuesta obtenida al fijar el plano de manufactura de forma paralela al plano XY (figura 3,15) con estas propuestas se logró reducir la masa del nuevo plato oscilante en el plano XY a 12,563 kg reduciendo 10,73kg, con respecto al objeto bruto inicial, lo que equivale a una reducción del 45,90%. Mientras que la masa del nuevo plato oscilante en el plano YZ es 17,402 kg reduciendo 5,99 kg. Lo que equivale al 25,61% sin disminuir en ningún momento la resistencia en las propuestas.

Al comparar la propuesta de diseño concebida en esta investigación, respecto a los que se equipan en motocicletas de serie, y que han sido manufacturadas con perfilera de acero, la diferencia de peso bordea en promedio 5kg; mientras que el plato de suspensión de motos de serie equipados con platos de suspensión de aluminio pesan alrededor de 5 kg menos, presumiblemente a que el material es una aleación, dando como conclusión que el plato oscilante en aluminio es de excelentes características de resistencia y con grandes prestaciones.

Adicionalmente durante el estudio dinámico de la motocicleta se puede apreciar una gran cantidad de cargas que soporta el brazo oscilante posterior, entre ellas están: cargas estáticas, dinámicas, en curva, en frenado e inclusive derivadas directas del impacto sobre ruedas, es por ello que su diseño debe ser robusto.

Cabe recalcar que es indispensable validar estas propuestas a fatiga para convalidar información para estudios posteriores

Además, recalcar que el proceso de optimización está presente en diversos elementos de los automotores y es una rama del diseño mecánico que está en gran crecimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- ALCALÁ, D. (2014) *Diseño, Cálculo y fabricación del bastidor para un prototipo de competición, Universidad politécnica de Catalunya de Barcelona.*
- ALTAIR STUDY, G. (2014). *Practical aspects of structural optimization, Altair Study.*
- ALTAIR STUDY, (2010). *Design Concept for an Automotive Control Arm - OS, Altair Study*
- CAZACU, R., & Grama, L. (2014). *OVERVIEW OF STRUCTURAL TOPOLOGY OPTIMIZATION METHODS FOR PLANE AND SOLID STRUCTURES* [Ebook] (1st ed., pp. 17-22). Oradea: ANNALS OF THE UNIVERSITY OF ORADEA Fascicle of Management and Technological Engineering. Retrieved from <http://www.imtuoradea.ro/auo.fimte/>
- CERVELLERA, P. (2007). *Reducing Weight in Aircraft Structures, 0–2, altair hyperworks.*
- JURADO A, n., & De, N. (2014). *Suspensión trasera regulable de una moto de competición : alternativa full loater, Escuela universitaria de ingeniería técnica de Bilbao.*
- GAETANO COCCO, (2004) *Motorcycle Design and Technology How and Why first edition, (Giorgio Nada Editore S.R.L.), Milán (Italia).*
- HYPERMESH. (2011). *Design Concept for an Automotive Control Arm - OS-2010 Setting Up the FE Model in HyperMesh, 1–12.*
- JOHNSEN, S. (2013). *Structural topology optimization, (june).*
- OLASON, A. (2010). *Methodology for Topology and Shape Optimization in the Design Process.*

- SANCHEZ,S.(2012),*Nuevas técnicas de optimización de estructuras*,
- VITTORE COSSALTER,(2006) *Motorcycle Dynamics, segunda edicion, Ediciones LULU, Pádova (Italia)*.
- UDA. (2016). proyecto *Smart Moto* Universidad del Azuay , 2020.

TESIS

- OLASON, A.(2010-11) *Methodology for Topology and Shape Optimization in the Design Process*, (Tesis de Maestría en el programa de Maestría Mecánica de Sólidos y Fluidos), Chalmers University of technology, Sweden.
- LARSSON, R. (2016). *Methodology for Topology and Shape Optimization : Application to a Rear Lower Control Arm*,(tesis de maestria en mecánica aplicada) Chalmers university of technology.
- MONTESDEOCA,A, (2016), *Análisis de la suspensión y la estructura de un vehículo UTV mediante FEM.*, (tesis de grado)universidad autónoma de México.
- OCHOA, P,(2016) *Optimización del chasis de la motocicleta “KUNTUR”*, mediante el uso de un programa computacional “CAE”(tesis de grado), universidad del Azuay.
- REYES, D. (2016). *diseño de las manguetas delanteras y posteriores para un vehículo formula SAE mediante técnicas de optimización estructural y manufactura con CNC* (Magister). universidad del Azuay.
- SALAZAR, J. (2015) *Simulación por elementos finitos y propuesta de modelo matemático del comportamiento dinámico de la suspensión posterior de una motocicleta de carretera tipo custom 125 cc*,(Tesis de grado),Universidad superior politecnica del Chimborazo.

- SCHRECK, M. (2014). *Structural Optimization of Components for High-Performance Engines*, (tesis de maestría en mecánica aplicada) Chalmers University of technology.
- VAZQUEZ, VICTOR. (2014). *Diseño conceptual de un sub-chasis automotriz mediante optimización estructural topológica*, Universidad nacional Autónoma de México.

PAGINA WEB

- ARTEAGA Noriega, Luis Enrique, y Delgado, Camilo, y Pantoja, Melquis, y Pantoja, Alejandro, y "Diseño y construcción de una motocicleta eléctrica: una alternativa para el transporte sostenible." *El Hombre y la Máquina*, vol. , no. 45, 2014, pp.88-97. Redalyc, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47838946011>
- MATWEB. (2020). aluminum 6061. 13-04-2020, de matweb material property data Sitio web:

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>
matweb. (2020). aluminum 6061. 13-04-2020, de matweb material property data Sitio web:

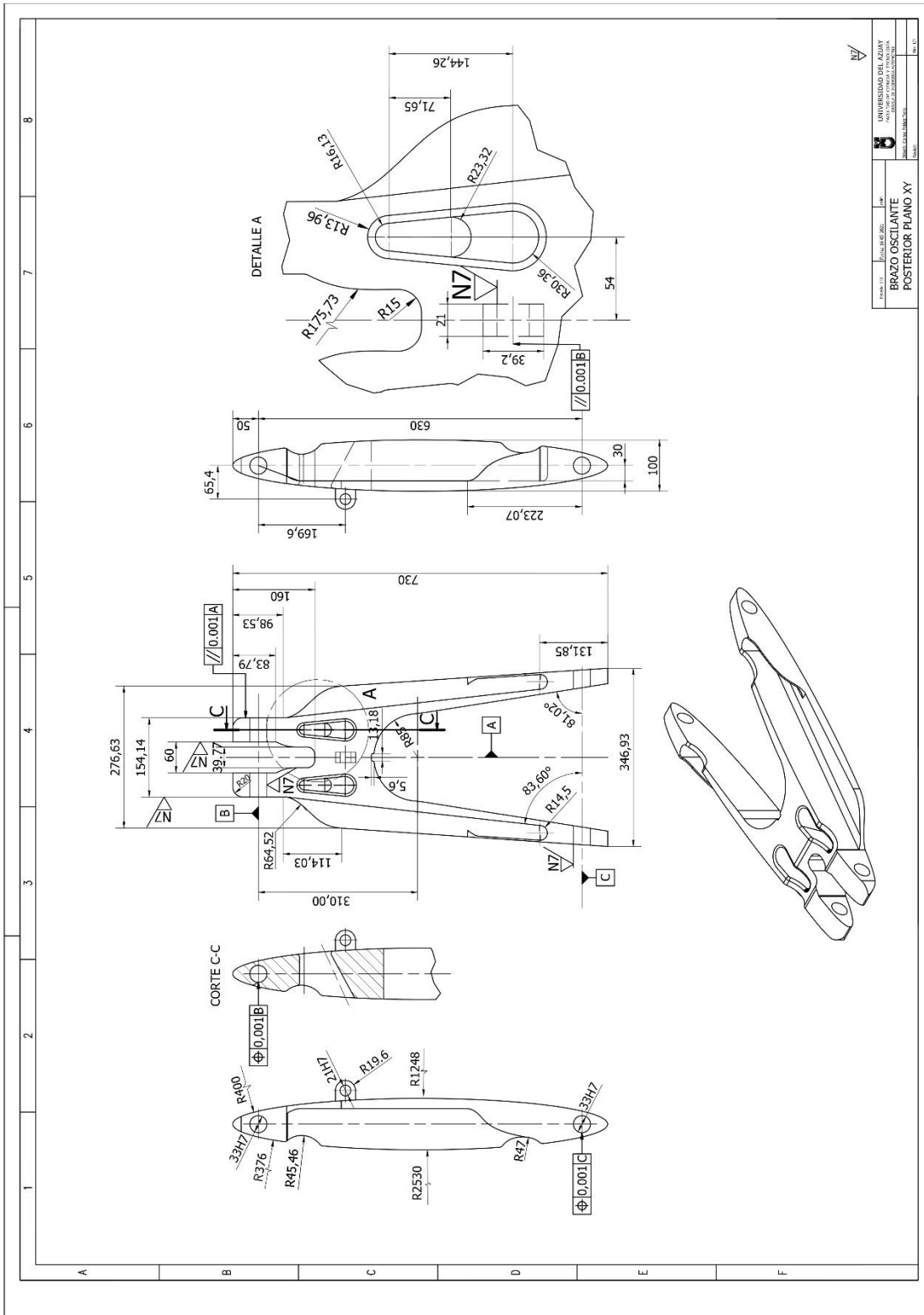
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>
- FABB., G. (N.D.). *Structural Analysis with Altair HyperWorks' OptiStruct*. Retrieved from http://www.notey.com/@fabbaloo_unofficial/external/12776952/structural-analysis-with-altair-hyperworks'-optistruct.html
- MATWEB. (2020). aluminum 6061. 13-04-2020, de matweb material property data Sitio web:

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>

- ISSRC. (2008). *IVE model users manual version 2.0*.
Retrieved from <http://www.issrc.org/ive/downloads/%5Cnmanuals/UsersManual.pdf>
- SANMETALS. (2010). *Características mecánicas del aluminio 6061. 2010*, 5–
Retrieved from <http://www.sanmetal.es/docs/1246450322.pdf>
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed., [versión 23.3 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [23-03-2019]
- SIGNIFICADOS: Diccionario en línea, <https://www.significados.com/optimizar/>

ANEXOS

ANEXO 1 PLANO PLATO OSCILANTE PLANO XY



ANEXO 2 PLATO OSCILANTE PLANO YZ

