

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DIRECCIÓN PARA UN VEHÍCULO TIPO FORMULA STUDENT.

Fernando Morillo
fpmorillot@utn.edu.ec
Universidad técnica del Norte

Resumen

Esta investigación se la realizó guiándose en las reglas de la formula SAE para realizar el diseño e implementación del sistema de dirección para este tipo de vehículo. Primero se redacta la introducción del trabajo de grado, donde se enuncia el problema se establece los objetivos y también la justificación de la investigación para diseñar e implementar un sistema de dirección para un vehículo tipo formula student. Después se redacta el marco teórico en el cual se detalla los tipos de dirección y materiales de las mismas y cuál de estos tipos de sistema se recomienda según las especificaciones de la normativa SAE para diseñar e implementarlo en el chasis de este tipo de vehículo. Luego se detalla el desarrollo de la propuesta se realiza un flujograma del proceso que se va a seguir para ejecutar los análisis de la geometría de la dirección, cálculos y el diseño del sistema de dirección en un software CAD, en el cual se realiza el análisis de esfuerzo, deformación y factor de seguridad a cada una de las partes del sistema de dirección.

Índice de términos

Diseño asistido por computadora, Sistema de equivalencia estructural, La dirección electrohidráulica.

I. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se manifestará la descripción y el diseño de los elementos que conforman el sistema de dirección de un prototipo de formula student.

El sistema de dirección de un vehículo es una de las partes más importantes de todos los elementos que contribuyen en el funcionamiento del mismo, ya que es el encargado de transmitir el control del vehículo. Es decir, el sistema es a través del cual el piloto puede dirigir el vehículo. Esto significa que su diseño tiene que ser estudiado cuidadosamente, con el fin de evitar cualquier fallo.

En este proyecto, el sistema de dirección que va a ser analizado consiste en una serie de elementos los cuales se inician en el volante el cual se acopla a la columna de dirección por medio de unas juntas universales. La columna de dirección transmite este movimiento rotatorio a la caja de dirección la cual transforma esa rotación en un movimiento lineal, esto se lleva a cabo a través de un sistema piñón cremallera. De ésta el movimiento pasa a los brazos de dirección los cuales están acoplados por su otro extremo a las manguetas que están localizadas en las ruedas.

Para llevar a cabo el diseño es importante saber de medidas y características del vehículo, obviamente, información necesaria a tener en cuenta. A su misma vez, las medidas del vehículo están reguladas por una serie de normas establecidas en esta competición.

II. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

2.1 Análisis de la geometría de la dirección

2.1.1 Transferencia de la longitud de la masa

Para el cálculo de la transferencia de la longitud de la masa se tomará como referencia la fórmula propuesta por William F y Douglas L en su libro de dinámica de vehículos de carreras (Cantos, 2011).

$$\Delta f_x = \frac{h * m(\pm a)}{lt} \quad (1)$$

Dónde:

$\Delta f(a, b)$ = Incremento de la carga delantera
 lt = longitud total de las ruedas
 h = Altura del centro de gravedad
 m = Masa del prototipo
 $\pm a$ = Aceleración / desaceleración

Dónde:

Los siguientes datos se toma de la tesis realizada del bastidor del vehículo tipo formula student debido a que la implementación del sistema de dirección es la continuación del proyecto (Melo, 2017, pág. 46).

a = ancho de via = 1.4 m
 b = Batalla = 1.6m
 lf = Distancia del eje delantero = 1.06 m
 h = Altura del centro de gravedad = 0.317 m
 m = Masa total del vehículo = 322 kg
 A = Aceleración = 1.75 g

$$\Delta f_x = \frac{0.317m * 322kg(1.75g)}{1.06m}$$

$$\Delta f_x = 168.51 N$$

2.1.2 Carga total vertical del vehículo

Es el reparto que se le hace del peso total del vehículo distribuyéndolo para cada una de las ruedas.

$$\begin{aligned} \text{carga vertical} &= \text{peso del vehículo} \\ &+ \text{transferencia de masa longitudinal} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{carga vertical} &= 3155.6 N + 168.51 N \\ \text{carga vertical} &= 3324.11 N \end{aligned}$$

2.1.3 Cálculos para la obtención de tensiones y fuerzas

Se toma en cuenta la fuerza que el piloto emplea en el sistema de dirección para mover las ruedas. Cuando se mueve el volante se crea una fuerza de fricción en las ruedas la cual hay que vencer para poderlas mover.

La fuerza en cada rueda serán las siguientes:

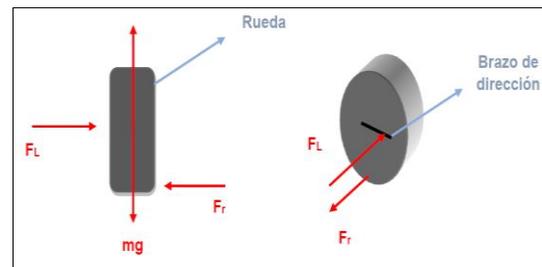


Figura 1. Fuerza en las ruedas.
(Jener, 2014, pág. 34)

Dónde:

F_r = Fuerza de fricción
 mg = Peso
 F_l = Fuerza lateral
 N = Normal

La parte de la rueda que se encuentra en contacto con el piso no es un punto; la fuerza de fricción se la representa de la siguiente manera:

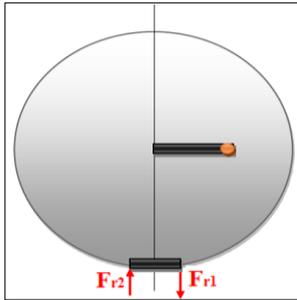


Figura 2. Fuerza de fricción.

Fuente: (Jener, 2014)

Como se ve en la figura 3.3 la parte entre Fr_2 y Fr_1 son las fuerzas de fricción que se tiene que vencer para girar la rueda.

La distancia al centro de la línea central vertical hasta $Fr_2 = Fr_1$ es $r_1 = r_2$ respectivamente.

Dónde:

$$Fr_2 = Fr_1 = Fr \quad (3)$$

$$r_1 = r_2 = r \quad (4)$$

Para realizar el giro a la rueda la fuerza lateral tiene que ser mayor que la fuerza de fricción que se produce por el contacto de esta con el suelo.

1. $\sum Fx = 0; F_L - F_r = 0$
2. $\sum Fy = 0; N - mg = 0$
3. $\sum My = 0; F_L x 2F_r x r = 0$

De la ecuación 1 tenemos:

$$F_l = F_r \quad (5)$$

De la ecuación 2 tenemos:

$$N = mg \quad (6)$$

Para realizar los cálculos es importante conocer el peso del prototipo y así poder conocer cuánto peso soporta cada rueda. A partir de los datos obtenidos el peso del vehículo es de 250 kg sin tener en cuenta el peso del piloto.

Para realizar el cálculo se aumenta el peso del piloto 72 kg por motivo de seguridad. Por otro lado, el peso que soportan las ruedas delanteras en

estos vehículos suele ser de un 45% del peso total (Cantos, 2011, pág. 50).

Por lo que se tiene el peso total que soportan las ruedas.

$$(250 \text{ kg} + 72 \text{ kg}) \times \frac{45\%}{100} = 144.9 \text{ kg} \quad (7)$$

Entonces cada rueda soporta un peso de:

$$\frac{144.9}{2} = 72.45 \text{ kg}$$

$$72.45 \text{ kg} \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 710.73 \text{ N}$$

Finalmente,

$$N = 710.73 \text{ N}$$

Según Shigley en su libro “Diseño en Ingeniería Mecánica” para calcular la fuerza de fricción se usa la ecuación 1 (Shigley, 2008, pág. 135).

$$Fr = \mu \times N \quad (8)$$

Donde μ es el coeficiente de rozamiento y su valor se comprende entre 0.8 y 0.9, para una pista de asfalto y por seguridad se toma el valor de 1 para obtenerla fuerza de fricción.

$$Fr = 1 \times 710.73 \text{ N} = 710.73 \text{ N}$$

De la ecuación 1 se extrae $F_l = Fr$ y tenemos

$$T = \text{Par sobre la columna de dirección.}$$

$$T = F_l * r_{\text{piñon}} \quad (9)$$

2.2 Análisis de cargas y esfuerzos CAE

Con este estudio se busca determinar el esfuerzo máximo a los que está sometido el sistema de dirección. Este tipo de análisis ayuda a determinar el factor de seguridad, esfuerzo y deformación de elementos mecánicos.

Para realizar el análisis a los diferentes componentes del sistema se utilizó el mallado predeterminado por el software.

Para realizar las simulaciones en el diseño se utilizó la fuerza de 710.73 N obtenida en los cálculos realizados.

2.3 Condiciones de contorno

En la actualidad el sistema de dirección en la mayoría de los vehículos utiliza rótulas para conectar las manguetas con los brazos de la suspensión y con los tirantes de la dirección. Gracias a los tres grados de libertad que permiten estas uniones se puede fácilmente independizar el movimiento vertical de la suspensión del horizontal de la dirección. Estos sistemas son más compactos y se emplea por lo general una barra de dirección transversal que están constituida por los siguientes elementos (Alonso, 2008, pág. 56): Las manguetas, volante y la columna de dirección habitualmente articulada. La caja de dirección y barra de dirección en un único módulo, generalmente formado por la propia cremallera de dirección o en algunos casos por un sistema de recirculación a bolas y barra de dirección (Alonso, 2008, pág. 56).

Los brazos de acoplamiento o tirantes conectados mediante rótulas a la masa suspendida, barra de dirección o cremallera y a la masa no suspendida, manguetas o porta manguetas. Las rótulas son tipo de unión que permite independizar el movimiento vertical de la suspensión a la dirección (Alonso, 2008, pág. 56).

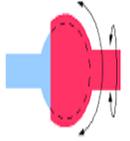
Elemento	Carga	Grados de libertad	Imagen
Axial	710.73 N	3 grados de libertad	
Terminal	710.73 N		
Columna	710.73 N		
Cremallera	710.73 N		

Figura 3. Condiciones de contorno

(Azom, 2012, pág. 34)

El sistema de dirección tiene tres grados de libertad debido a que esta implementada con rótulas, pero para realizar el análisis a cada uno de los elementos del sistema individualmente se aplica este valor verificando el punto fijo y el área donde se aplica la carga.

2.4 Verificaciones de calidad de malla

La malla cumple un papel muy importante al momento de realizar el análisis, el programa realiza 2 verificaciones para comprobar la calidad de los elementos esto ayuda a que los datos que se obtenga garanticen el diseño.

2.4.1 Verificación del cociente de aspecto

Para una malla sólida, la precisión numérica se logra mejor mediante una malla con elementos tetraédricos perfectos y uniformes cuyas aristas sean de igual longitud. Para una geometría general, no es posible crear una malla de elementos tetraédricos perfectos (systemes, 2017, pág. 1). Debido a las aristas pequeñas, la geometría curva, las operaciones lámina y las aristas vivas, algunos de los elementos generados pueden tener algunas aristas mucho más largas que otras. Cuando las aristas de un elemento tienen una notable diferencia en su longitud, la precisión de los resultados se ve perjudicada (systemes, 2017, pág. 1).

La relación de aspecto de un elemento tetraédrico perfecto se utiliza como la base para el cálculo de relaciones de aspecto de otros elementos. La relación de aspecto de un elemento se define como la relación entre la arista más larga y la normal más corta colocadas desde un vértice a la cara opuesta normalizada con respecto a un tetraedro perfecto.

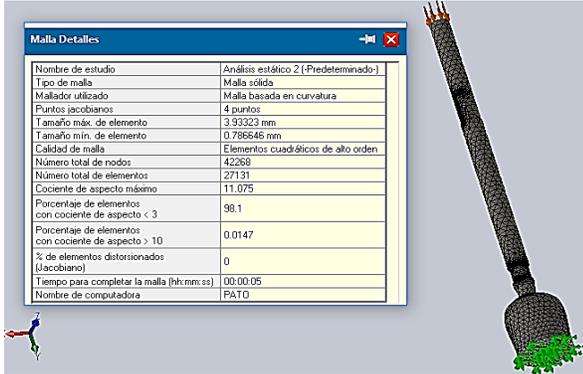


Figura 4. Verificación de mallado

2.4.1 Puntos jacobianos

Los elementos parabólicos pueden trazar la geometría curva de manera mucho más precisa que los elementos lineales del mismo tamaño. Los nodos centrales de las aristas de contorno de un elemento se colocan en la geometría real del modelo. En contornos extremadamente vivos o curvos, las colocaciones de los nodos centrales en la geometría real pueden generar elementos distorsionados con aristas que se entrecruzan entre sí. La verificación jacobiana de un elemento extremadamente distorsionado es negativa (systemes, 2017, pág. 1).

El cociente de un elemento tetraédrico parabólico con los nodos centrales ubicados exactamente en el medio de las aristas rectas es 1,0. Aumenta a medida que aumentan las curvaturas de las aristas. En un punto dentro del elemento el cociente jacobiano brinda una medida del grado de distorsión del elemento en dicha ubicación (systemes, 2017, pág. 1).

2.5 Análisis de malla del axial

Según el análisis de malla realizado en el axial se observa que el elemento consta de 4 puntos jacobianos además se obtiene un cociente de 3.293, de acuerdo con los valores obtenidos se valida la malla garantizando el estudio numérico.

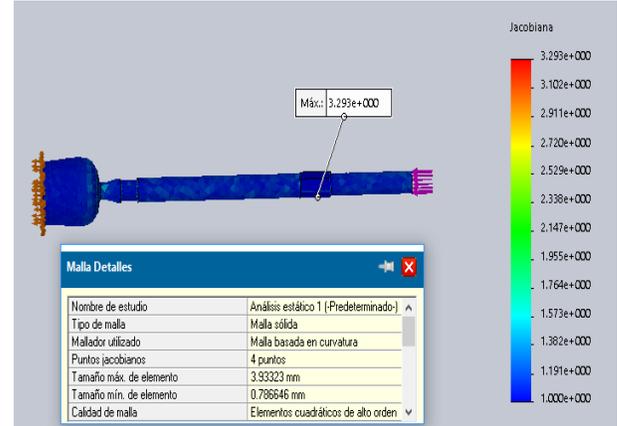


Figura 5. Análisis de malla del axial.

2.5.1 Análisis de malla del terminal

El análisis de malla realizado al terminal consta con 4 puntos jacobianos y se obtiene un valor máximo de 1.82 y según la página Dassault Systems dice que un cociente de 40 o menos es aceptable por lo tanto se garantiza el estudio realizado.

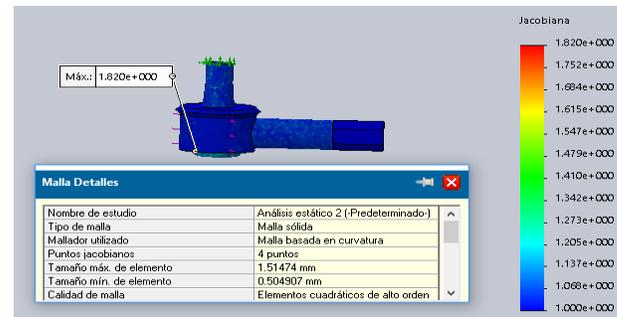


Figura 6. Análisis de malla del terminal.

2.5.2 Análisis de malla de la cremallera

Según Dassault Systems dice que un cociente de 40 o menos es aceptable el análisis realizado a la cremallera indica que la malla consta de 4 puntos Jacobianos garantizando el estudio.

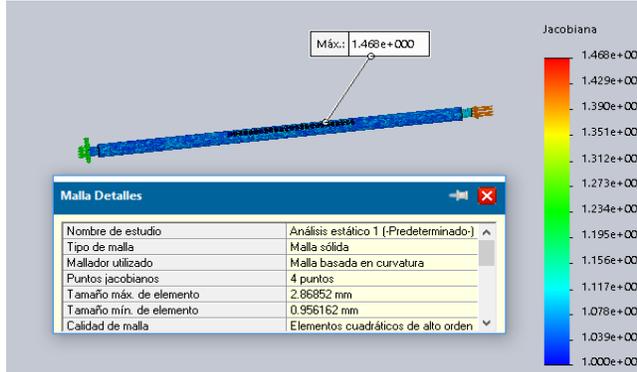


Figura 7. Análisis de malla de la cremallera.

2.5.3 Análisis de malla de la columna de dirección

Los datos obtenidos en el análisis de malla realizado en la columna de dirección garantizan el estudio se observa un valor máximo de 2,48 este valor ayuda a confirmar que el mallado utilizado es aceptable.



Figura 8. Análisis de malla en la columna.

2.6 Contrición de los elementos del sistema de dirección

2.6.1 Caja de dirección

Se diseño la caja de dirección para alojar es mecanismo piñón cremallera, en la realización de este elemento se utilizó un torno para dar la forma esférica de diámetro 88mm y a su base interna se realizó una perforación que sirve de alberge el

rodamiento, a un lado de la misma se hizo una perforación donde se ubica la cremallera.



Figura 9. Caja de dirección.

2.6.2 Axiales del sistema de dirección

El axial está diseñado con un acero SAE 1020, acoplados en los extremos de la cremallera permiten que las oscilaciones de las ruedas no se trasfieran a la caja de dirección, este axial es de un vehículo Suzuki forsa 1 y se lo puede adquirir en los almacenes de repuestos automotrices.



Figura 10. Axial.

2.6.3 Cremallera de dirección

Para la elaboración de la cremallera se utilizó una barra de acero de 570 mm y un diámetro de 20mm, con ayuda de una fresadora en la parte

central de la misma se realiza 26 dientes y a sus extremos se hace 2 roscar para poder acoplar los axiales.



Figura 11. Cremallera de dirección.

2.6.4 Piñón

Se utilizó una barra de acero de 136 mm y de diámetro 88mm, con la ayuda del torno se redujo a diferentes diámetros, el primero de 15 mm de diámetro y una longitud de 18 mm en el cual se acopla la junta universal luego realiza los diámetros de 25mm para alojar los rodamientos en el centro de la barra se tornea un espacio de 76 mm para ubicar el engrane. Por último, se ensambla estos elementos.



Figura 12. Engranaje.

2.6.5 Terminales de dirección

Es una serie de uniones tipo rótula que se acopla a las ruedas directrices y absorben las irregularidades del camino por el que circula está

diseñado con un acero SAE 1020 y se lo adquirió este elemento en un almacén de repuestos.



Figura 13. Terminal de dirección

2.6.6 Acople del volante

El acople está diseñado de aluminio SAE 1060 y sirve para acoplar y desacoplar el volante a voluntad del conductor este no afecta la maniobrabilidad del vehículo, este elemento se lo adquirió al comprar el volante.



Figura 14. Acople del volante.

2.6.7 Juntas universales

Las juntas universales están hechas de un acero SAE 1015 y son elementos mecánicos que ayudan a la transmisión de fuerzas en ejes no alineados se utilizó este tipo de junta debido a que tiene tres grados de libertad y permiten la rotación del volante sin problemas.



Figura 15. Juntas universales

2.6.8 Rodamiento

Se utilizó el rodamiento de rodillos cónico para sistemas de dirección debido a que este permite a que gire libremente el mecanismo del piñón este elemento consta con 19 rodamientos cónicos que ayudan a que el giro se transmita sin problemas.



Figura 15. Rodamiento.

2.6.8 Volante

En la normativa SAE no se tiene una estandarización del volante para un vehículo tipo formula student por lo que se toma como referencia el diámetro del arco frontal para el diseño de este elemento.

2.6.8.1 Procedimiento de modificación del volante

Se obtuvo un volante Sparco, pero no se pudo utilizar en el prototipo debido a su diámetro por lo que se tuvo que modificarlo para poder usarlo en el sistema de dirección para instalarlo en el chasis del vehículo formula student y se siguió los siguientes pasos:

Es necesario desarmar la parte central del volante para desmontar el acople rápido.

1. Como siguiente paso se retira el tapizado de la estructura del volante con la finalidad de medir el diámetro y fijar los puntos donde se realizará el corte para reducir el diámetro de 17 y 11 cm.
2. Cortamos la estructura en los puntos fijados después se suelda la estructura dando la forma que se desea y se tapiza nuevamente el volante.



Figura 16. Diseño del volante.

2.6.8.2 Columna de dirección

- 1 Basándonos en el diseño del bastidor se diseñó la columna de dirección de un diámetro de 15mm y una de longitud de 340 mm.

- 2 Se colocó a sus extremos una junta universal para poder acoplarla con la caja de dirección y a la vez con el volante.
- 3 Para finalizar la modificación de la columna de dirección se pinta para mejorar estéticamente.



Figura 16. Columna de dirección

2.7 Montaje del sistema de dirección

Para la implementación del sistema se tuvo que diseñar la cremallera, caja, volante y la columna de dirección, se adquirió: los axiales, mecanismo de liberación rápido del volante, juntas universales y rotulas.

Se procede ensamblar y sujetar el acople rápido en las modificaciones que se realizó al bastidor



Figura. 1. Base de la columna de dirección

Se une el acople rápido del volante a la base mediante pernos después de colocar el mismo a la

caja de dirección a continuación se procede a poner la cremallera en su lugar, finalmente se instala la columna y demás elementos del sistema. El sistema de dirección tiene un radio de giro de externo de 22. 30° e interno de 32. 60° el cual cumple con las especificaciones requeridas.



Figura 2. Sistema de dirección.

III ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 1 se detalla los resultados obtenidos de los cálculos y análisis realizados en el sistema de dirección de acuerdo con lo establecido por la normativa SAE mediante modelos matemáticos, dichos valores cumplen con los estándares garantizando el funcionamiento del mismo.

Se toma datos como son ancho de vía, batalla, masa total del vehículo, altura total del vehículo, altura del centro de gravedad y aceleración calculadas en la tesis del bastidor del vehículo tipo formula student (Melo, 2017, pág. 46).

Para realizar los cálculos se utiliza las fórmulas establecidas en el libro técnicas del automóvil del autor J.N. Alonso (Alonso, 2008, pág. 135).

Tabla 1. Resultados obtenidos de los cálculos.

Nombre	Símbolo	Cálculo
Transferencia de la longitud de la masa	Δfx	168.51 N
Ancho de vía	A_v	1.4 m
Batalla	B	1.6 m

Distancia del eje delantero al centro de gravedad	l_f	1.06 m
Altura del centro de gravedad	H	0.317 m
Masa total del vehículo	M	332 kg
Aceleración	A	1.75 g
Carga vertical del vehículo		3324.11 N
Fuerza lateral	F_l	710.73 N
Par que se aplica al piñón cremallera	T	27.18 Nm
Fuerza para girar el volante	F	247.09 N
Par de entrada a la caja	M_o	27.18 Nm

En la tabla 2 se indica los resultados obtenidos de los ángulos de giro de la rueda externa e interna, se utilizó la geometría de Ackerman para obtener estos valores. Los valores recolectados de los cálculos matemáticos garantizan el funcionamiento de la dirección salvaguardando la vida del piloto. El ángulo de giro de la rueda externa es menor al de la interna, estos datos ayudan a verificar que el funcionamiento del sistema.

Tabla 2. Ángulo de giro

Nombre	Símbolo	Cálculo
Angulo de giro rueda externa	Av_e	22. 30°
Angulo de giro rueda interna	Av_i	32. 60°

En la tabla 3 se indica los valores obtenidos del torque a los que está sometido el sistema de dirección al momento de su funcionamiento estos

resultados ratifican que el sistema va a cumplir con su trabajo.

Los datos obtenidos ayudan a verificar que el material seleccionado es el adecuado y soporta las cargas a los que va a estar sometido al momento de su funcionamiento.

Tabla 3. Cálculo de momentos

Nombre	Símbolo	Cálculo
Momento de la cremallera	M_C	415.52 Nm
Momento en la columna de dirección	M_{Cr}	324. 62 Nm
Momento en el axial	M_A	191.29 Nm
Momento en el terminal	M_t	63.90 Nm

En la tabla 4 se detalla los valores obtenidos del análisis de esfuerzos realizado a cada uno de los elementos que conforman el sistema de dirección y dichos resultados obtenidos del análisis garantizan que el sistema cumple con los estándares requeridos.

Tabla 4. Resultados obtenidos del análisis de Von Mises

Elemento	Fuerza aplicada	Análisis de Von Mises	Resistencia a la tracción
Axial	710.73 N	13.23 MPa	441 MPa
Terminal	710.73 N	1.388 MPa	441 MPa
Cremallera	710.73 N	6.495 MPa	441 MPa
Columna de dirección	710.73 N	40.820 MPa	372.6527 MPa

En la tabla 5 se indica los datos obtenidos de factor de seguridad según Shigley de 1 a 4 para elementos mecánicos por lo que se establece ese rango y el valor mínimo sobre pasa lo establecido en este análisis.

Tabla 5. Factor de seguridad en cada una de las partes del sistema de dirección.

Elemento	Fuerza que se aplica	Factor de seguridad de diseño	Factores de seguridad mínimos obtenidos en la simulación
Axial	710.73 N	1,5 - 4	26.5
Terminal	710.73 N	1,5 - 4	250
Cremallera	710.73 N	1,5 - 4	54
Columna de dirección	710.73 N	1,5 - 4	8

En la tabla 6 se detalla los valores obtenidos del análisis de deformación realizado a cada uno de los elementos que conforman el sistema de dirección y dichos resultados obtenidos garantizan que el sistema cumple con los estándares requeridos.

Tabla 4.6. Deformación.

Elemento	Fuerza que se aplica	Deformación (mm)
Axial	710.73 N	0.007
Terminal	710.73 N	0.00009161
Cremallera	710.73 N	0.007
Columna de dirección	710.73 N	0.01

IV CONCLUSIONES

La verificación de la calidad del mallado se realizó mediante el criterio de radio Jacobiano cuyo valor converge a 1 en todos los elementos garantizando así la confiabilidad de los resultados producto de la simulación.

Se utilizó una malla sólida basado en la curvatura del elemento la cual se adapta de mejor manera a la geometría de la pieza y así lograr una correcta distribución de las cargas.

De acuerdo con las investigaciones bibliográficas realizadas se ha usado los materiales SAE 1020, SAE 1060 y SAE 1015 pudiendo determinar que sus propiedades mecánicas son mucho mayores a las que el diseño exige, obteniendo factores de seguridad mayores a 1.5 como exige un correcto diseño de elementos.

El adecuado diseño del sistema de dirección apoyado de una precisa alineación garantiza el perfecto funcionamiento del mismo brindando seguridad al piloto, confiabilidad y ahorros económicos solventando posibles desgastes prematuros de neumáticos.

El vehículo al ser de competencia sufre impactos laterales cuyo valor de fuerza de impacto lateral obtenida permitió hacer el análisis en el software de modelado y simulación permitiendo tener una perspectiva clara del comportamiento de los elementos que conforman el sistema de dirección garantizando la resistencia de los mismos.

REFERENCIAS

Bibliografía

- [1] Alonso, J. (2008). *Técnicas del automóvil*. Azom. (13 de Septiembre de 2012). *Azom Materials*. Obtenido de <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6579>
- [2] Cantos, J. (17 de Diciembre de 2011). *Comillas*. Obtenido de <http://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/449badbade7b4.pdf>

- [3] Jener, F. J. (2014). *zaguan*. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/31468/files/TAZ-TFG-2014-2526.pdf>
- [4] Shigley. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. Mexico: McGraw-Hill.
- [5] systemes, D. (10 de Enero de 2017). *peocess, Intuitive Solution for all aspects of your desing*. Obtenido de <http://www.solidworks.com/sw/purchase/solidworks-trial.htm>

Autor

Estudios: Primaria “Instituto Pedagógico Ciudad de San Gabriel”

Secundaria: “Liceo William Blake”

Superior: “Universidad Técnica del Norte”