



UNIVERSIDAD DEL AZUAY  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
AUTOMOTRIZ

Simulación del desempeño estructural del chasis de  
un vehículo eléctrico biplaza durante impactos y  
volcamiento

Trabajo de Graduación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Autores

Darwin Alfredo Garnica Rea  
Diego Javier Pozo Rivadeneira

Director

Ing. Hernán Viteri

CUENCA – ECUADOR

2024

# Simulación del desempeño estructural del chasis de un vehículo eléctrico biplaza durante impactos y volcamiento.

## Resumen

En el siguiente documento se determina el comportamiento del chasis tubular de un vehículo eléctrico ante un evento de impacto frontal, lateral y vuelco. El propósito es medir la deformación producida en la estructura al ser sometida a los eventos mencionados. Dependiendo de la velocidad, carga, las características de diseño y material de fabricación del chasis los elementos de la estructura llegan a deformarse, produciendo intrusiones en el habitáculo. Para la simulación se usa un software de elementos finitos. Se siguen los estándares FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards). Realizado el análisis estructural, el software muestra la deformación ocasionada, se toman las distancias máximas de las intrusiones generadas, se compara con una tabla de valores que clasifica las intrusiones para determinar la gravedad del daño que puedan ocasionar a los ocupantes dentro del habitáculo. Finalmente se determina que el chasis propuesto cumple el objetivo de brindar seguridad a los ocupantes.

**Palabras clave:** chasis, vehículo, elementos finitos, impacto, análisis estructural.



Ing. Hernán Viteri.

Director de trabajo de titulación



Ing. Robert Rockwood

Coordinador de escuela



Darwin Alfredo Garnica Rea

Autor



Diego Javier Pozo Rivadeneira

Autor

# Simulation of the structural performance of the chassis of a two-seater electric vehicle during impacts and rollover.

## Abstract

The following document determines the behavior of the tubular chassis of an electric vehicle in the event of a frontal, lateral, and rollover impact. The purpose is to measure the deformation produced in the structure when exposed to the mentioned events: depending on the speed, load, design characteristics, and manufacturing material of the chassis. The elements of the structure are deformed, producing intrusions into the passenger compartment. For the simulation, finite element software is used. Also, FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) are followed. Once the structural analysis has been carried out, the software shows the deformation caused and the maximum distances of the generated intrusions are taken. It is compared with a table of values that classifies the intrusions to determine the severity of the damage that can be caused to the occupants inside the passenger compartment. Finally, it is determined that the proposed chassis meets the objective of providing safety to the occupants.

**Keywords:** chassis, vehicle, finite elements, impact, structural analysis.



Ing. Hernán Viteri.  
Thesis Director



Ing. Robert Rockwood  
Faculty Coordinator



Darwin Alfredo Garnica Rea  
Author



Diego Javier Pozo Rivadeneira  
Author



# Simulación del desempeño estructural del chasis de un vehículo eléctrico biplaza durante impactos y volcamiento.

Diego Javier Pozo Rivadeneira

Ingeniería en Mecánica Automotriz  
Universidad del Azuay  
Cuenca, Ecuador  
diegodp13@es.uazuay.edu.ec

Darwin Alfredo Garnica Rea

Ingeniería en Mecánica Automotriz  
Universidad del Azuay  
Cuenca, Ecuador  
dgarnica@es.uazuay.edu.ec

## I. INTRODUCCIÓN

*Abstract — The following document determines the behavior of the tubular chassis of an electric vehicle in the event of a frontal, lateral, and rollover impact. The purpose is to measure the deformation produced in the structure when exposed to the mentioned events: depending on the speed, load, design characteristics, and manufacturing material of the chassis. The elements of the structure are deformed, producing intrusions into the passenger compartment. For the simulation, finite element software is used. Also, FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) are followed. Once the structural analysis has been carried out, the software shows the deformation caused and the maximum distances of the generated intrusions are taken. It is compared with a table of values that classifies the intrusions to determine the severity of the damage that can be caused to the occupants inside the passenger compartment. Finally, it is determined that the proposed chassis meets the objective of providing safety to the occupants.*

*Keywords: chassis, vehicle, finite elements, impact, structural analysis.*

*Resumen — En el siguiente documento se determina el comportamiento del chasis tubular de un vehículo eléctrico ante un evento de impacto frontal, lateral y vuelco. El propósito es medir la deformación producida en la estructura al ser sometida a los eventos mencionados. Dependiendo de la velocidad, carga, las características de diseño y material de fabricación del chasis los elementos de la estructura llegan a deformarse, produciendo intrusiones en el habitáculo. Para la simulación se usa un software de elementos finitos. Se siguen los estándares FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards). Realizado el análisis estructural, el software muestra la deformación ocasionada, se toman las distancias máximas de las intrusiones generadas, se compara con una tabla de valores que clasifica las intrusiones para determinar la gravedad del daño que puedan ocasionar a los ocupantes dentro del habitáculo. Finalmente se determina que el chasis propuesto cumple el objetivo de brindar seguridad a los ocupantes.*

**Palabras clave:** chasis, vehículo, elementos finitos, impacto, análisis estructural.

Este trabajo de titulación forma parte de un proyecto integral, que evalúa mediante un software de estudio CAE (*Computer Aided Engineering*), el chasis de un vehículo eléctrico biplaza, en condiciones de impactos y volcamiento.

El objetivo es determinar la deformación que se produce en el chasis al ser sometido a un impacto frontal, lateral y vuelco; esto, a través de un programa de asistencia computacional de elementos finitos.

El método de asistencia computacional es la mejor herramienta para validar el comportamiento de la estructura tubular del chasis en situaciones de impacto o volcamiento, porque nos permite omitir las pruebas físicas que representan enormes costos económicos.

El estudio evalúa las deformaciones del chasis en situaciones límites que deben ser considerados en el proceso de manufacturación; por ejemplo, para estimar estructuras más rígidas y zonas de absorción de energía eficientes, con el fin de garantizar la seguridad de los ocupantes.

Esta metodología de investigación bibliográfica aporta información previa, para confirmar que el prototipo del vehículo cumpla con los requerimientos de seguridad.

En esta misma línea, la investigación de algunos autores se centra en el estudio y simulación de situaciones reales de impactos, utilizando para ello, el Método de Elementos Finitos (*MEF*), asistencia computacional que se utiliza para replicar estados de deformación y de tensión que surgen en situaciones reales, “esto se debe principalmente a las ventajas que el método presenta a la hora de aportar información sobre el posible comportamiento del vehículo” [1].

## II. METODOLOGÍA.

Cuando se manufactura o modifica cualquier diseño mecánico, se opta por verificar su funcionamiento, ya sea en una prueba física como lo realizan los protocolos NCAP (*New Car Assessment Program*), o mediante cualquier paquete computacional de estudio CAE, es por eso que este proyecto tiene su base en el uso de un programa de asistencia computacional, en el cual se procede a ejecutar simulaciones en los casos de: impacto frontal, lateral y vuelco de un chasis biplaza propuesto para su análisis.

### A. Método de elementos finitos (*MEF*).

Es una técnica numérica que nos ayuda a resolver problemas inabordables por métodos numéricos

tradicionales. El principio del MEF consiste en aproximar la solución, donde transforma un medio continuo en una serie de pequeños elementos, que dependerán del problema a analizar, considerando que mientras más se incremente el número de elementos, más fiable serán los resultados.

Actualmente, el MEF ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico, capaz de resolver problemas de la física formulable como un sistema de ecuaciones diferenciales o derivadas parciales, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo, etc. Sin embargo, no se debe olvidar que este método es una virtualización de los problemas físicos reales, pues en un problema real existen muchos fenómenos e interacciones, procesos de fabricación, casos de carga, condiciones de contorno, propiedades mecánicas de los materiales que en muchas ocasiones resultan imposibles de medir y/o caracterizar. En consecuencia, es responsabilidad del analista asumir las simplificaciones adecuadas para conseguir la mejor aproximación a la solución del problema, en un plazo de tiempo corto, con un uso de recursos adecuados y con una precisión acorde a los datos iniciales de partida y a los objetivos marcados del cálculo. Para ello, resulta necesario que el usuario disponga de la suficiente experiencia previa y sea capaz de interpretar los resultados arrojados por el programa, ya que de lo contrario su carácter aproximado le confiere cierto riesgo al interpretar los resultados [2]. En la fig. 1 se observa el esquema de los pasos a seguir al momento de usar un estudio, por elementos finitos.



Fig. 1. Uso de método de los Elementos Finitos. [9].

### III. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA TUBULAR DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO PROPUESTO

En esta etapa se usa un modelo tridimensional para el análisis, donde “el diseño del chasis radica en bocetos originales de un vehículo eléctrico biplaza semejante a la estructura del vehículo Ariel Atom 2”. [3], diseñado en un

proyecto que antecede al presente, para lograr que el chasis obtenga el peso mínimo, una baja resistencia aerodinámica y una mejor resistencia, como se muestra en la Fig. 2. El diseño cuenta con las siguientes características que se muestran en la Tabla I.

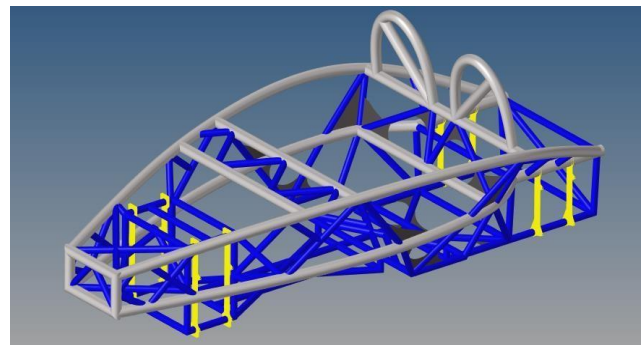


Fig. 2. Modelado de la estructura tubular del vehículo eléctrico.

Fuente: Autores.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DEL CHASIS

Dimensiones, pesos, capacidades	
Tipo de carrocería	Deportivo
	3214 / 1446 /
Peso (kg)	456
Número de plazas	2
Propiedades del material	
Material	Acero ASTM A36
Módulo de elasticidad (Gpa)	205
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7860
Límite elástico (Mpa)	250

#### B. Característica del discretizado o mallado de superficie con elementos finitos.

Para las tres pruebas de análisis de la estructura, se utiliza un mallado de tipo trías (3 nodos), el tamaño de elemento usado es de 8mm, se descarta el uso de elementos de tamaño inferior por que elevan el tiempo de análisis, entregando los mismos resultados; tampoco se usan medidas mayores de elementos, debido a que provocan que el mallado no se ajuste a las superficies complejas de esta estructura y provocan una pobre visualización del proceso de deformación cuando el chasis es sometido a los eventos de impacto y vuelco. La cantidad total de elementos generados es de 263685 formando un mallado que se adapta correctamente a la estructura a ser analizada, Se presentan 9 elementos con error, el programa compara con la cantidad total de elementos que forman la malla, e indica que existe un 0% de error de discretizado. En la fig. 3, se muestra en resumen el porcentaje de error en el mallado. Para visualización del detalle se presenta la fig. 4, en la cual se puede observar el entramado formado por la creación de los elementos.



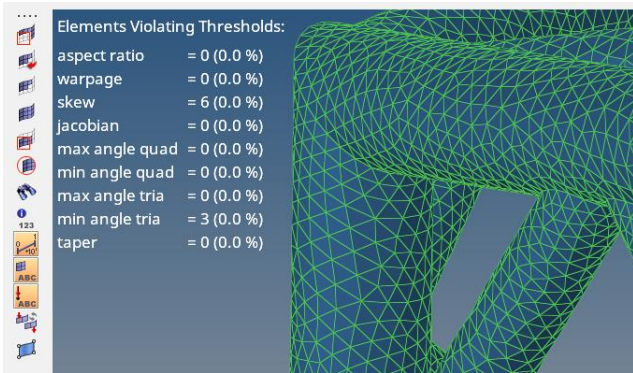


Fig. 3. Porcentaje de error en los elementos del mallado.

Fuente: Autores.

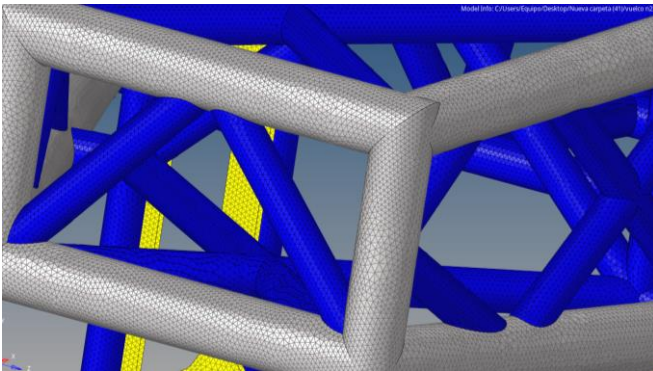


Fig. 4. Discretizado del modelado de estructura del chasis.

Fuente: Autores.

#### IV. NORMAS PARA ENSAYOS DE CHOQUE.

##### C. Normas.

Es muy importante la seguridad que brinda un vehículo a sus ocupantes, debido a la siniestralidad que existe en las carreteras, y, por ende, para que un vehículo pueda ser comercializado debe superar pruebas que evalúan la seguridad que nos ofrece cada fabricante de las distintas marcas y modelos de vehículos ante un eventual impacto o vuelco. Localmente no existen normativas para ensayos de pruebas de impacto frontal y lateral, pero si existe una normativa para vuelco de autobuses que es la ECE- R66

El chasis es un elemento importante, ya que en él se afirman todos los elementos y componentes de un vehículo, es por eso que al momento de sufrir una colisión este es el encargado de absorber la mayor cantidad de energía y garantizar la seguridad del habitáculo donde se encuentran los ocupantes del vehículo.

Por ello existen ensayos de choque frontal, lateral y volcamiento, que se realizan mediante la utilización de software de estudios CAE, que son capaces de recrear una situación concreta entregándonos resultados de gran fiabilidad para evaluar el comportamiento de una estructura, donde dichos ensayos son llevados a cabo en la actualidad por distintas asociaciones u organizaciones. [4]

A nivel europeo existe la European New Car Assessment Programme (EuroNCAP) desde 1997 que cuenta con el apoyo y la participación de siete países

europeos, varias instituciones y fabricantes, con el objetivo de corroborar que el vehículo probado sea el mismo que el consumidor encontraría en la calle. [5]

En los Estados Unidos de Norte América las Normas Federales de Seguridad para Vehículos de Motor (FMVSS) adoptada el 1 de marzo de 1967, siguiendo vigente hasta la fecha, actualizando sus requisitos periódicamente y la National Highway Transportation Safety Administration (NHTSA) establecida en 1970, que cuenta con estándares para protección de ocupantes en los vehículos en caso de choque, estos estándares son el FMVSS 208 y el FMVSS 214.

Lo que concierne a los países de Sudamérica existe el Acuerdo sobre Transporte Internacional Terrestre (A.T.I.T.) conformado por los países de Argentina, Brasil, Chile, Perú, Bolivia, Uruguay, Ecuador, Venezuela y Paraguay, que se encarga de evaluar los resultados entregados de cada vehículo sometido a un impacto concreto.

Con respecto a ciertos países de Sudamérica cabe recalcar que se encuentran desarrollando sus propias normativas para la regularización del diseño y construcción de carrocerías como es en Ecuador las Normas Técnicas Ecuatorianas (INEN), por ejemplo, la NTE INEN 2703 y en Colombia que posee las normas generadas por el Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

##### D. Ensayos de choque

Al momento de producirse un accidente hay que tener en cuenta que existen varios factores y distintos patrones que se generan en el suceso. “Sin embargo, atendiendo a las estadísticas, se puede llegar a reproducir una situación que abarque una parte significativa de los accidentes graves” [6].

Los ensayos que se representaran son:

- Impacto frontal.
- Impacto lateral.
- Vuelco.

##### C.1 Ensayo de impacto frontal.

Este ensayo no es sencillo puesto que requiere un análisis estructural enfocado a la deformación plástica en un periodo muy pequeño de tiempo (milisegundos) para la absorción controlada de la energía provocada por el impacto [7].

Para la seguridad de los pasajeros, la desaceleración que sufren en respuesta al pulso del impacto debe estar dentro de rangos tolerables, según la NHTSA la desaceleración en el pecho no debe ser mayor a 61.4 G's [9]. Por lo que el ensamble frontal de la estructura debe permitir una fácil deformabilidad en la dirección el impacto.

Existen distintos modelos sobre la caracterización de las pruebas de impacto frontal, los cuales difieren del grado de inclinación y el porcentaje de pared con el que el vehículo impacta, pero las principales regulaciones para las pruebas de impacto son el FMVSS No.208, el cual trata

sobre un impacto frontal a 56 km/h sobre una pared rígida, y en el NCAP conducido a 56 km/h, los cuales consideran el comportamiento del cuerpo humano basado en pruebas estandarizadas de trineo o “sled test” (ISO/SAE) que consisten en la caracterización del desempeño de un maniquí de pruebas sentado sobre una silla con ruedas al ser impactado sobre barreras rígidas [8]. La fig. 5. Muestra las configuraciones para impacto frontal con barrera rígida. “Análisis de las estadísticas de accidentes de EE. UU. ha demostrado que en choques donde la intrusión excede los 15 cm, la probabilidad de lesión es sustancialmente más alto que en choques con cantidades más bajas de intrusión” [9]. La probabilidad de lesiones determinada mediante el nivel de intrusión se puede observar en la tabla II.



Fig. 5. Ensayo impacto frontal contra barrera rígida según FMVSS 208. Fuente: Autores.

TABLA II. PROBABILIDAD DE LESIONES SEGÚN EL NIVEL DE INTRUSION DE LA ESTRUCTURA

Nivel 1	intrusión 0 - 15 cm	probabilidad menor de lesiones
Nivel 2	intrusión >15 cm	probabilidad mayor de lesiones

### C.2 Ensayo de impacto lateral contra un poste rígido.

Para este tipo de prueba, cada NCAP tiene sus lineamientos; el protocolo EURO NCAP emplea un chasis que lleva en su parte delantera una barrera deformable, este chasis se traslada mediante ruedas y se impacta contra el lateral del vehículo sometido a la evaluación, además esta normativa presenta un modelo de prueba en el cual el vehículo en posición oblicua se impacta contra un poste metálico. LATIN NCAP presenta un protocolo similar al protocolo EURO CAP, pero en la prueba de impacto contra poste metálico la realiza sin ninguna inclinación.

En el protocolo FMVSS 214 el impacto se aplica sobre el vehículo en posición oblicua (75°) en lado del conductor, el cual se mueve lateralmente a 32 km/h, hasta impactar un poste rígido de 254 mm de diámetro. Esta prueba emula el choque del vehículo después de perder el

control saliendo del camino, deslizándose lateralmente e impactando oblicuamente contra un objeto fijo en el camino, tal como un poste o un árbol. El análisis evalúa el daño en cabeza, pecho, columna vertebral baja, abdomen y pelvis del conductor adulto [10]. La fig. 6, obtenida de la web de FMVSS, muestra un esquema del ensayo de choque.



Fig. 6. Ensayo impacto lateral contra un poste según FMVSS 214.

Fuente: Autores.

### C.3. Ensayo de vuelco.

Mediante el ensayo de vuelco se busca evaluar la capacidad que posee el habitáculo para no deformarse, poniendo a prueba el techo y los pilares que lo sostienen.

Para este tipo de prueba existen distintos reglamentos como: la ECE-R66 que consiste en colocar el vehículo en una plataforma de basculamiento, donde se inclina hasta llegar a la posición de inestabilidad; con velocidad angular cero y el eje de rotación pasando a través de los puntos de contacto, el vehículo se caracteriza por la energía de referencia E R (véanse fig. 7.); el vehículo cae de lado en una cuneta con superficie de cemento, horizontal, seca y lisa, cuya profundidad nominal es de 800 mm [11].

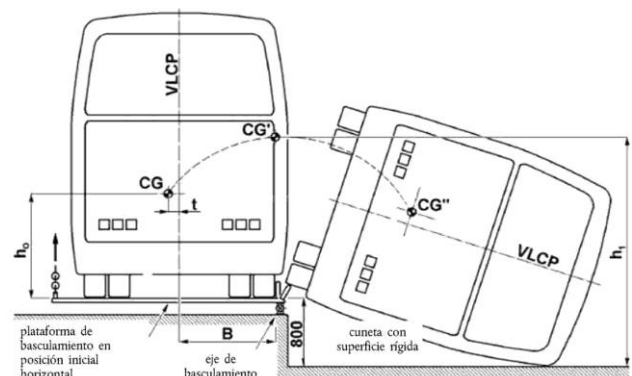


Fig. 7. Ensayo de vuelco según ECE-R66. [11].

El reglamento FMVSS 208 ubica el vehículo en un mecanismo de tracción a una velocidad constante de 48 km/h, momento en el cual se detiene súbitamente donde cambia la velocidad de 48 a 0 km/h en una distancia no

mayor a 71 cm, desarrollando una magnitud de desaceleración de no menos de 20 g en un tiempo no menor a 0,04s. [10] La fig. 8. nos muestra cómo se realiza el ensayo.

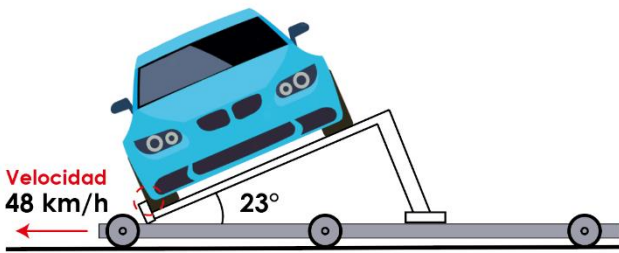


Fig. 8. Ensayo de vuelco según FMVSS. Fuente: Autores.

## V. SIMULACIONES

En esta fase todo lo concerniente al cálculo es resuelto por el software, el cual, mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas en forma matricial, resuelve los escenarios creados, de las cuales se genera soluciones al problema propuesto. [13].

**Impacto Frontal contra una pared rígida:** En el programa se recrea las condiciones en las cuales se va a simular el impacto frontal, consta de una pared rígida ubicada frente de un vehículo, con la cual se impacta. No hay desfase con respecto a la pared, el ángulo es 0° [14]. En la fig. 9 observamos el modelado de la simulación.

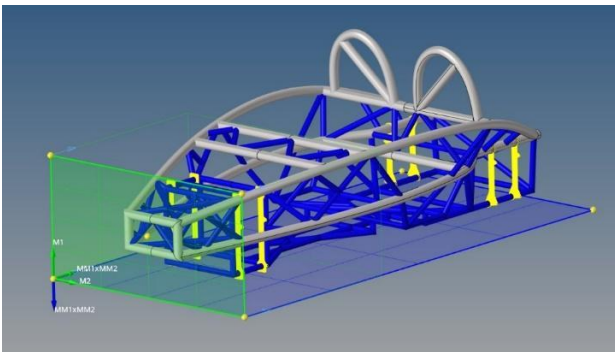


Fig. 9. Modelado de la simulación de impacto frontal.

Fuente: Autores.

Se establecen las siguientes condiciones de velocidad de 56 km/h, el peso de la estructura y las cargas que soporta el chasis, tales como: el peso de los ocupantes, los packs de baterías, la dirección, el controlador eléctrico; en los puntos establecidos para su distribución en la estructura.

Se considera que el contacto entre el chasis y la pared rígida genera rozamiento, tomando en cuenta coeficientes de rozamiento estático y dinámico y la velocidad del vehículo al desplazarse contra la pared rígida, el cual se calcula mediante la siguiente fórmula [5].

$$\mu = FD + (FS - FD)e^{-DC|Vrel|} \quad (1)$$

Donde:

FD: coeficiente de rozamiento estático.

FS: coeficiente de rozamiento dinámico.

DC: constante.

Vrel: velocidad relativa en m/s

Se reemplaza los datos en la fórmula y el coeficiente de fricción calculado de 0.1 El tiempo de simulación debe permitir observar la deformación de la estructura desde el instante en que se impacta con el elemento rígido hasta el momento en el que concluya.

Al finalizar la simulación se toman las distancias de intrusión de la estructura hacia el interior del habitáculo de seguridad. El resultado de la intrusión se dividió en dos categorías – (1) Intrusión leve de 0 a 15 cm, y (2) Intrusión mayor a 15 cm. El análisis de las estadísticas de accidentes de EE. UU. ha demostrado que en los accidentes en los que la intrusión supera al valor antes mencionado, la probabilidad de lesiones es sustancialmente mayor que en los accidentes con menores cantidades de intrusión. [9].

**Forma para realizar las mediciones:** Realizadas las simulaciones de los impactos propuestos, se procede con la medición de los daños producidos en la zona principal de deformación del chasis; se desprecia valores de intrusión menores a 10cm de los daños inducidos, los cuales son los que se producen en otra zona del vehículo como consecuencia de la deformación de los daños directos. Las deformaciones toman en cuenta a objetos rígidos, no plásticos, rejillas, etc. [12].

**Medición de la deformación frontal:** Para realizar esta medición, se toma una línea base de referencia, en este caso, al ser un impacto frontal se toma de referencia el eje posterior, para ello se traza dicha línea paralela al citado eje [12], y se procede a la medición de la zona deformada como se ve en la fig. 10.

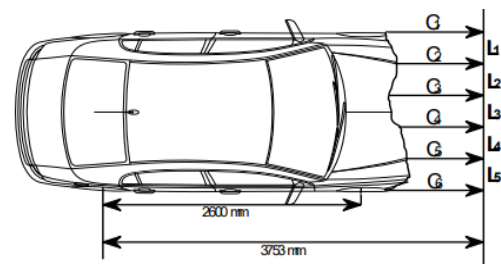


Fig. 10. Medición de la deformación ante el impacto. [10].

**Impacto lateral contra un poste rígido:** En la evaluación del chasis en el evento de impacto lateral con poste rígido, se coloca las cargas puntuales a toda la estructura de chasis. Véase en la fig. 11.



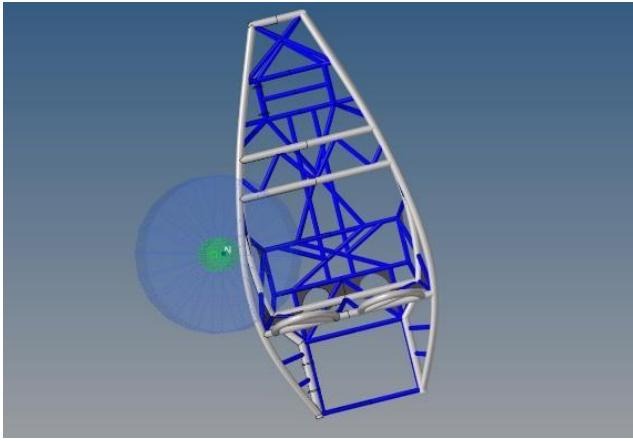


Fig. 11. Modelado de la simulación de impacto lateral contra poste rígido.

Fuente: Autores.

**Medición de la deformación lateral:** Las medidas se toman en el lado donde se experimentó el arqueamiento generado por el impacto contra el poste. Se traza una línea siguiendo en el lateral del vehículo y se procede a la medición como se aprecia en la fig. 12. Se considera arqueamiento siempre que el mismo sea superior a 10 centímetros [12].

Luego de la consideración anterior, se mide el espacio dentro del habitáculo, al nivel de donde se produce el impacto con el poste, para obtener el valor de la intrusión de la estructura hacia el interior.

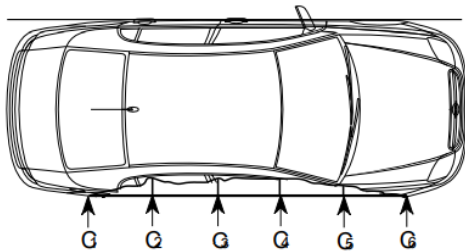


Fig. 12. Medición de la deformación ante el impacto. [12].

**Medición de la deformación en vuelco:** En la fig. 13. se observa el entorno para proceder a la simulación de vuelco. Luego de realizado el análisis se procede a verificar el costado averiado, es decir el costado que tuvo contacto con el suelo, y se comprueban los daños generados mediante la medición de la intrusión de los elementos estructurales.

Se utilizo el mismo criterio de medición que en el lateral, ya que se vería afectado el lateral de la estructura, al impactar contra el suelo.

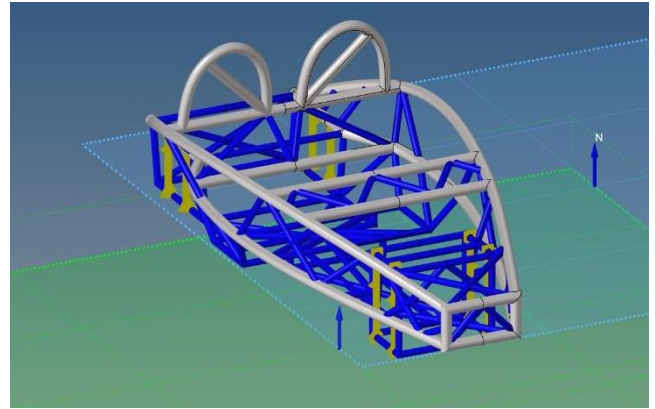


Fig. 13. Estructura tubular previo a la simulación de vuelco.

Fuente: Autores.

## VI. RESULTADOS

Los resultados obtenidos mediante la simulación en el software HyperMesh, corresponden a las condiciones establecidas en las normativas FMVSS para los tres casos de análisis.

**Deformación frontal:** Previo al impacto, el chasis se desplaza a una velocidad de 56 km/h, el chasis lleva energía cinética, al impactarse contra la pared rígida la energía cinética va disminuyendo, la estructura se deforma gradualmente y la energía producida por la deformación se convierte en energía interna y va en aumento. Cuando finaliza el proceso de deformación del chasis al ser sometido al impacto, la energía cinética será cero, no se produce energía interna y se mantendrá constante. Según la ecuación de la energía cinética y con los valores que tenemos de masa y velocidad se obtiene:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Donde:

Ec: Energía cinética.

m: masa del vehículo.

v: velocidad.

Con la ecuación (2) reemplazando los valores de masa del vehículo y velocidad a la cual se debe desarrollar la prueba, se obtiene el valor de la energía cinética de 88536.10 J.

En la fig. 14 se indica el comportamiento de la energía cinética vs la energía interna; se observa además que el valor de la energía cinética calculada por el software, es semejante al valor obtenida mediante fórmula, lo cual indica el correcto planteamiento de condiciones en el proceso de simulación.

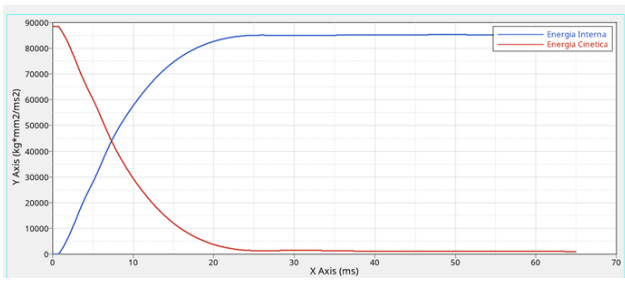


Fig. 14. Gráfica de energía cinética vs energía interna.

Fuente: Autores.

Ejecutada la simulación de impacto frontal se procede a realizar las mediciones en el área afectada, se obtiene una intrusión de 3.20 cm en la parte frontal izquierda de la estructura. Debido a la configuración del chasis se observa también que el espacio destinado a los ocupantes tiende a ensancharse producto del impacto en la parte frontal con la pared rígida, como se puede ver en la fig. 15.

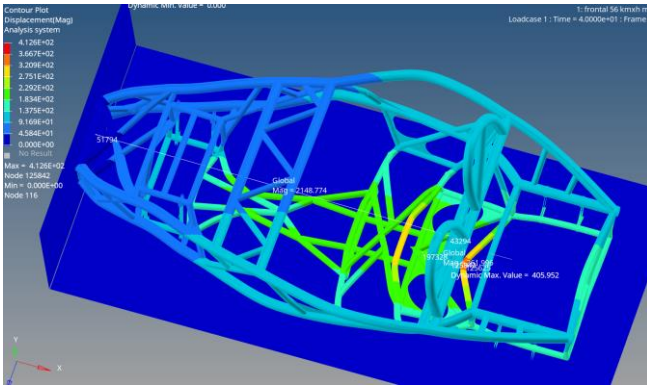


Fig. 15. Estructura tubular posterior a la simulación de impacto frontal.

Fuente: Autores.

El acelerómetro mide la tasa de cambio de la velocidad. El valor de lectura de desaceleración es de  $-7.33 \text{ G's}$ . En la fig. 16, se observa que la fase de inicio del golpe contra la pared rígida desaceleración es mayor, luego se estabiliza hasta llegar a cero.

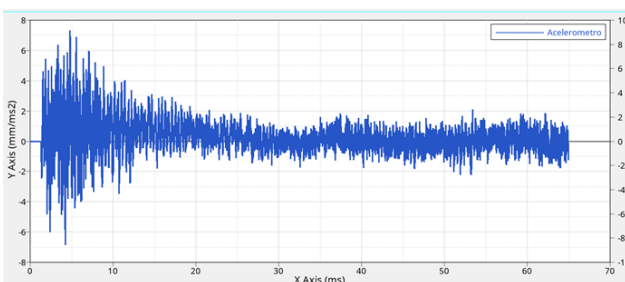


Fig. 16. Gráfica del acelerómetro en el impacto frontal.

Fuente: Autores.

**Deformación lateral:** Transcurrido el tiempo de análisis, el espacio interior del habitáculo luego del impacto tiene una deformación de 7,82 cm, en la parte baja de la estructura, como se puede apreciar en la fig.17. Se encuentra dentro del primer nivel de seguridad considerado

como intrusión leve cuyo rango es de 0 a 15 cm, y al no comprometer la seguridad de los ocupantes, se valida el diseño de la estructura propuesta.

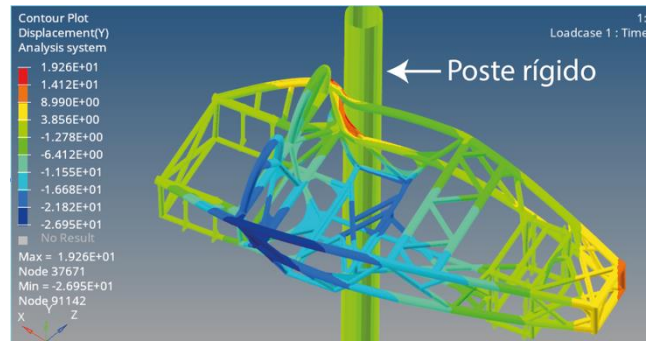


Fig. 17. Estructura tubular posterior a la simulación de impacto lateral.

Fuente: Autores.

Las curvas de energía cinética y energía interna fig. 18, la gráfica se comporta de manera similar a las curvas de energía generadas en el caso anterior, la energía cinética disminuye y la energía interna aumenta debido al impacto. Mediante la ecuación (2), y con los valores de masa y velocidad para simulación de impacto lateral se obtiene un valor de 28835,48 J.

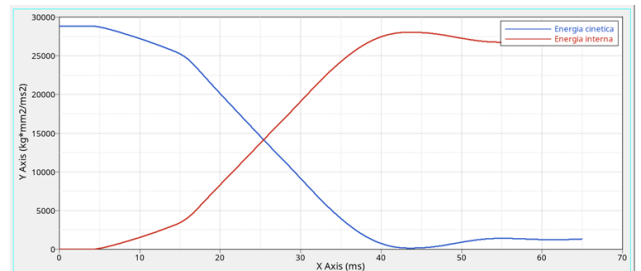


Fig. 18. Gráfica de energía cinética vs energía interna.

Fuente: Autores.

EL valor de la energía cinética obtenida de la fórmula, es semejante al valor de la energía cinética obtenida mediante el software, esto indica que el proceso de simulación de impacto lateral fue planteado de manera correcta.

El valor de lectura de desaceleración es de  $-14.21 \text{ G's}$ . En la fig. 19, en la gráfica se observa una fase de inicio del golpe contra el poste rígido, entra en contacto contra el poste únicamente el larguero principal y no se ejerce una desaceleración brusca; transcurridos 15ms se produce el contacto de los demás elementos laterales de la estructura, y la desaceleración empieza a incrementar, luego se estabiliza hasta llegar a cero.

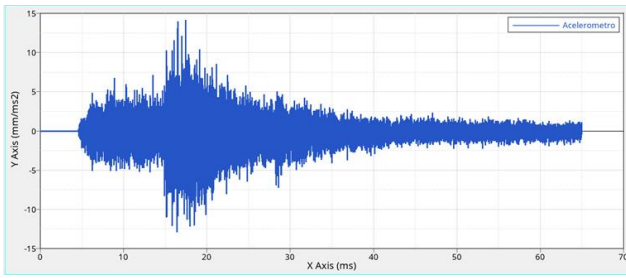


Fig. 19. Grafica del acelerómetro en el impacto lateral.

Fuente: Autores.

**Deformación en vuelco:** En la fig. 20 se observa la estructura del chasis tomando la inclinación lateral con trayectoria hacia el suelo. Transcurrido el tiempo de análisis, para la simulación de volcamiento, se observa que el costado afectado por el golpe contra el suelo, pierde su curvatura inicial de diseño, generándose una deformación de 6,70 cm, tomando una forma recta paralela al suelo, se puede observar en la fig. 21.

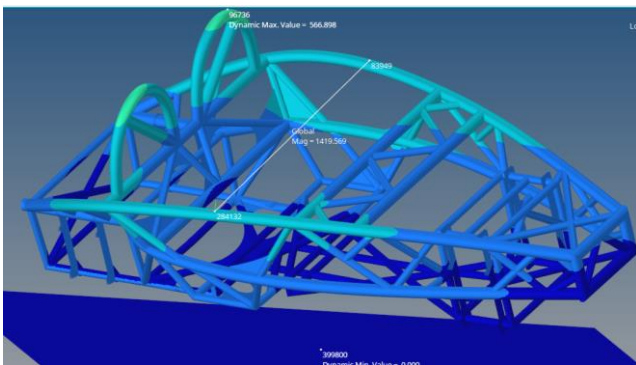


Fig. 20. Estructura tubular antes de la simulación de vuelco.

Fuente: Autores.

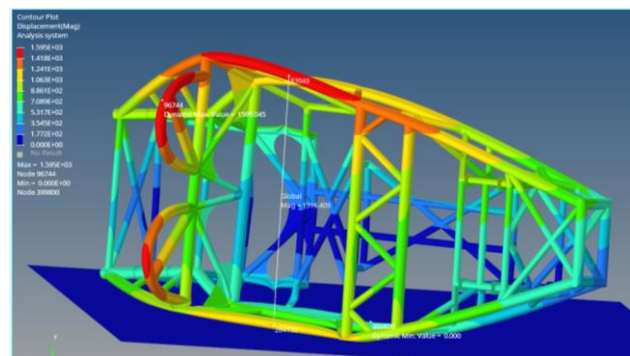


Fig. 21. Estructura tubular posterior a la simulación de vuelco

Fuente: Autores.

Además de la intrusión, se genera una desaceleración, el valor obtenido es -11.66 G's. En la fig. 22. se aprecia la gráfica trazada por el acelerómetro.

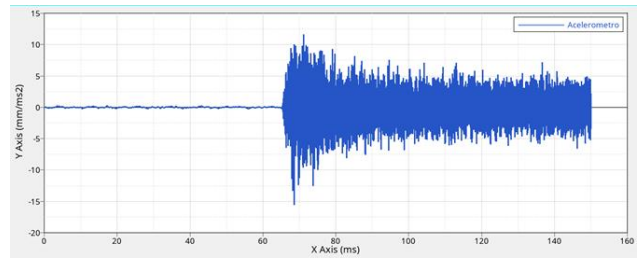


Fig. 22. Grafica del acelerómetro en la simulación de vuelco.

Fuente: Autores.

La nueva forma adoptada por la estructura en este lado no genera intrusiones que puedan causar daño al ocupante. Por el contrario lo protege. Se puede afirmar que el diseño de la estructura aprueba el evento de volcamiento según la normativa FMVSS 208 sección S8.3.

El valor de la energía cinética obtenida mediante el software es de 107389,53 J. en la fig. 23. tenemos la gráfica de la energía cinética y la energía interna, el comportamiento de esta grafica es distinta a las anteriores debido a los parámetros del ensayo de vuelco.

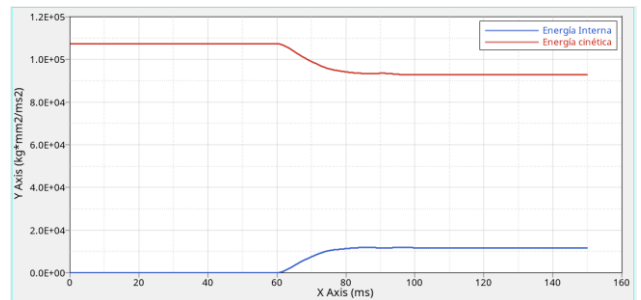


Fig. 23. Grafica de energía cinética vs energía interna en el vuelco.

Fuente: Autores.

## VII. CONCLUSIONES

El procedimiento de simulación de impacto frontal, lateral y vuelco, de la estructura de chasis planteada, permitió determinar las intrusiones producidas de los componentes estructurales dentro del espacio de supervivencia del habitáculo, pudiendo así evaluar la seguridad que brinda a los ocupantes.

Al analizar las simulaciones se observan que no existen deformaciones superiores a las clasificadas como intrusiones leves, que no afectarían a los ocupantes, logrando aprobar el diseño.

El error de energía puede ser ligeramente positivo y es aceptable un error entre el 1% y 2%. En el proceso de simulación, el programa indica un rango de error de energía entre 0% y 0.1%, lo cual indica que las condiciones analizadas en el software CAE ofrece resultados confiables.

Luego de realizadas las simulaciones, se concluye que el chasis propuesto para realizar el presente análisis en las distintas simulaciones de impactos es válido, ya que supera las pruebas realizadas en este estudio.

Los valores de intrusión de la estructura hacia el interior del habitáculo en el caso de impacto frontal son de 3.20 cm, en el caso de impacto lateral es 7.81 cm y en el caso de vuelco 6.70 cm. Según el análisis realizado, al suscitarse un eventual impacto, se puede concluir que la estructura tubular es lo suficientemente robusta para proteger a los ocupantes.

### VIII. RECOMENDACIONES

Al realizar las simulaciones se debe tener el conocimiento sobre normativas de impactos en vehículos y materiales, para crear las condiciones de contorno y replicarlo y ejecutarlo en el software.

El análisis por elementos finitos genera un costo computacional elevado dependiendo de la complejidad de la geometría o la cantidad de elementos generados en el chasis. En un computador con prestaciones básicas, el tiempo de análisis será mayor, es por eso que, se sugiere realizar los análisis en un computador con prestaciones avanzadas.

Previo a las simulaciones en el software, es recomendable realizar una inspección de la estructura del chasis, en esta inspección se tomará en cuenta que la unión entre elementos que conforman la estructura sean exactas, que no existan bordes sobrantes; y cuando se haya generado la malla de elementos finitos se proceda a realizar una corrección en los elementos que presenten errores, intrusiones y penetraciones que puedan existir. Estas consideraciones permiten reducir el tiempo de análisis y evitan la presencia de errores durante la simulación.

Las primeras pruebas a realizarse, en las cuales no se está completamente seguro de las condiciones de frontera, tales como: unidades, cargas, velocidades, tiempos, etc., es mejor realizar un mallado de las superficies con elementos relativamente grandes, entre 10 o 15 mm, para no generar un costo computacional elevado.

### IX. REFERENCIAS

- [1] Portillo, M., Chacon, R., Moreno, M. y Bongiorno, F. (2011). Simulación y análisis de una prueba de choque de un automóvil tipo deportivo, utilizando un software basado en el método de los elementos finitos. *Ciencia e Ingeniería*, 32(1), 69–77.
- [2] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, "El método de los elementos finitos: Las bases". Editorial CIMNE, 5 Edición, 2004.
- [3] Cuesta, P., Narváez, A. (2021). Análisis de los modelos de carga sobre la estructura tubular de un vehículo eléctrico biplaza mediante simulación computacional.
- [4] F. D. Ayala Martínez and A. S. Chulde Montalvo. "Diseño y simulación de un vehículo monoplaza eléctrico bajo condiciones de impacto mediante software de ingeniería CAD/CAE," B.S. Thesis. , 2022. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12282>.
- [5] D. Illescas Pérez. (2009) Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera.
- [6] Pavón, A. (2011). Simulación de un choque lateral contra barrera deformable y contra poste [Ingeniería Técnica en Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10016/13101>.

- [7] Paul Du Bois, Clifford C. Chou. Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection. American Iron and Steel Institute. 2000 Town Center, Suite 320 Southfield, MI 48075.
- [8] Garza Feria, R. A. (2008). Metodología para automatización paramétrica de análisis y optimización de la estructura automotriz mediante la integración de paquetes computacionales de ingeniería y diseño, [Maestro en Ciencias Especialidad en Sistemas de Manufactura, Tecnológico de Monterrey]. <http://hdl.handle.net/11285/569102>.
- [9] National Highway Traffic Safety Administration. (2016). REVIEW OF POTENTIAL TEST PROCEDURES FOR FMVSS (Nº. 208). <https://documents.pub/document/review-of-potential-test-procedures-for-fmvss-no-208-2016-11-03-review-of-potential.html>
- [10] Vázquez, D, Hernández, JR, Fabela, M, Flores, O, Sánchez, Cruz, M. Programa de evaluación de autos nuevos para lograr vehículos seguros. Instituto Mexicano de Transporte, Sanfandila, Tec, 0188-7297, 2020.
- [11] Arroba, C. (2013). Estudio del comportamiento mecánico de una sección de la superestructura del autobús interprovincial marca Miral Infiniti en chasis Hino Ak sometida a volcadura, mediante los programas Ansys Ls-Dyna y su incidencia en el espacio de supervivencia [Magíster en Diseño Mecánico, Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/5705>
- [12] Muñoz, T. (2007). Cálculo de la velocidad en la investigación de accidentes de tráfico. Asociación de personas con discapacidad "Virgen del Pilar". (Obra original publicada en 2007)
- [13] Chamba, E. (2018). Determinación de la metodología para el análisis de desempeño del habitáculo de seguridad de un vehículo liviano a impacto frontal sobre una pared rígida por el método de los elementos finitos, [Maestría en Diseño Mecánico Mención Fabricación de Autopartes, Universidad Internacional SEK].
- [14] Román, R. (2020). Análisis de un travesaño frontal automotriz para incrementar la absorción de energía de impacto de baja velocidad, [Maestro en Ingeniería Automotriz, Tecnológico De Monterrey].