



Análisis estructural de un bus por el método de elementos finitos

Structural analysis of a bus by the finite element method

Análise estrutural de um barramento pelo método dos elementos finitos

Pedro Andrés Moreno-Zulca ^I
pandresmorenoz@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7623-7117>

Edilberto Antonio Llanes-Cedeño ^{II}
antonio.llanes@uisek.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6739-7661>

William Vinicio Guña-Fernández ^{III}
williamgfvinicio.91@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1369-0007>

Juan Carlos Jima-Matailo ^{IV}
juan.jima@uisek.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5496-4073>

Correspondencia: pandresmorenoz@gmail.com

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

***Recibido:** 18 de noviembre de 2019 ***Aceptado:** 30 de diciembre de 2019 * **Publicado:** 17 de enero de 2020

- I. Ingeniero Automotriz, Docente de la Carrera de Mecánica Automotriz en el Instituto Tecnológico Superior “Central Técnico”, Quito, Ecuador.
- II. Máster en Eficiencia Energética, Doctor Dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Rural, Ingeniero Mecánico Automotriz, Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz en la Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.
- III. Ingeniero Automotriz, Docente de la Carrera de Mecánica Automotriz en el Instituto Tecnológico Superior “Central Técnico”, Quito, Ecuador.
- IV. Magíster en Sistemas Automotrices, Ingeniero en Mecánica Automotriz, Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz en la Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.

Resumen

Los buses de tipo urbano sirven para el transporte de personas en distancias cortas y medianas en el interior de la ciudad es relevante visualizar su diseño por motivos de seguridad. El presente estudio se centró en la definición del proceso de simulación de elementos finitos y como resultado se identificaron los factores más relevantes a la hora de procesar las particularidades de éste. Con la recopilación de la información teórica científica que aporta como ayuda al análisis de la estructura sometido a cargas variables con el fin de plasmarse el comportamiento estructural mostrando que la simulación es suficiente para su construcción y además se debe acudir a varios métodos que avalen la seguridad de los pasajeros, como también el modelo aplicado garantizarlo para su construcción.

Palabras clave: Carrocería; vehículo; esfuerzos; elementos finitos; diseño.

Abstract

Urban-type buses are used to transport people over short and medium distances inside the city. It was relevant to visualize their design for safety reasons. The present study focused on the definition of the process of simulation of finite elements and as a result, the most relevant factors were identified when processing the characteristics of this. With the compilation of the theoretical scientific information that contributes as an aid to the analysis of the structure subjected to variable loads in order to capture the structural behavior showing that the simulation is sufficient for its construction and also it is necessary to resort to several methods that guarantee the safety of the passengers, as well as the applied model guarantee it for its construction.

Keywords: Body; vehicle; efforts; finite elements; design.

Resumo

Os ônibus urbanos são usados para transportar pessoas por curtas e médias distâncias dentro da cidade. É importante visualizar seu projeto por razões de segurança. O presente estudo enfocou a definição do processo de simulação de elementos finitos e, como resultado, os fatores mais relevantes foram identificados no processamento das características deste. Com a compilação das informações científicas teóricas que contribuem para a análise da estrutura sujeita a cargas variáveis, a fim de capturar o comportamento estrutural, demonstrando que a simulação é

suficiente para sua construção e também é necessário recorrer a vários métodos que garantam a segurança dos passageiros, bem como o modelo aplicado, garantem sua construção.

Palavras-chave: Carroçaria; veículo; esforços; elementos finitos; design.

Introducción

La industria automotriz en el Ecuador, enfrenta grandes desafíos, evolucionando tecnológicamente nuevos diseños, que brinden seguridad a todos los ocupantes del bus, por lo que es necesario ejecutar investigaciones que ayuden al desarrollo de este tipo de industria, llegando a producir mensualmente hasta 127 carrocerías, repartidas en 62 de tipo urbano, 45 interprovincial, 8 de estilo turismo y finalmente 12 de tipo escolares, por lo que anualmente llega a producirse hasta 1524 unidades, en 41 empresas homologadas y registradas legalmente, dando trabajo de manera directa a 1348 personas, donde 137 son ocasionales y 53 que presentan algún grado de incapacidad, mientras que de manera indirecta son 889 personas (CANFAC, 2014; Rocha-Hoyos et al., 2019).

Los tipos de carrocerías utilizadas en el transporte público en el Ecuador, según Manjarrés, & Santillán (2016), basados en Normas y Reglamentos INEN son:

- Buses Urbanos
- Vehículos de Transporte Escolar
- Vehículos de Transporte Interprovincial e Interprovincial
- Vehículos Automotores de tres ruedas

Los buses de Tipo Urbanos son de “estilo público, para el transporte de personas de distancias cortas y medianas, en el interior de la ciudad, en chasis de tipo cama baja, diferenciándose del interprovincial que son usados para largas distancias, proporcionado por una o varias empresas privadas, estableciéndose la ruta basada en áreas definidas y establecidas por operadoras diferentes en el Ecuador” (Manjarrés & Santillán, 2016).

Según Alvarado & Carrera (2015), detalla que el procedimiento de homologación incluye la presentación de las certificaciones de cumplimiento, donde se especifican las normas técnicas aplicables para los vehículos de transporte urbano, donde la institución encargada de la revisión y control, se las determina según la emisión de dos tipos de certificaciones como son:

- RTE INEN 034 donde se detallan los elementos de seguridad que deben tener vehículos automotores.
- RTE INEN 2205, donde se especifican los requisitos que deben cumplir los Vehículos Automotores, de Tipo Bus Urbano.

Los buses se componen por dos partes que son: Carrocería y Chasis

La carrocería como se indica en la Figura 1, lo conforma la parte estructural en las que se ubican los pasajeros o la carga, la cual soporta las fuerzas de estilo estático y dinámico, a través de la resistencia y rigidez requerida, ante un impacto suscitado, formado por vigas, perfiles o planchas metálicas (Esmeraldas, 2016).

Figura 1. Carrocería de un bus (Esmeraldas, 2016)



Tipos de carrocerías

- Carrocerías de chasis independiente
- Carrocerías de chasis auto portante
- Carrocerías de chasis tubular

Elementos de una carrocería definida

- Paneles exteriores, como se detalla en la Figura 2.
- Armazón delantero, como se observa en la Figura 3.
- Armazón central y posterior, como se indica en la Figura 4.
- Armazón del piso, como se estipula en la Figura 5.

Figura 2. Paneles Exteriores (Esmeraldas, 2016)

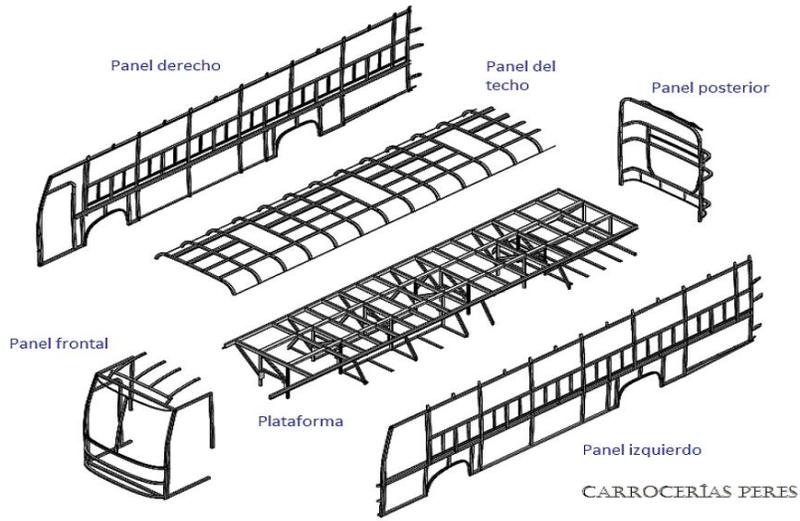


Figura 3. Armazón delantero (Esmeraldas, 2016)



Figura 4. Armazón Central y Posterior (Esmeraldas, 2016)

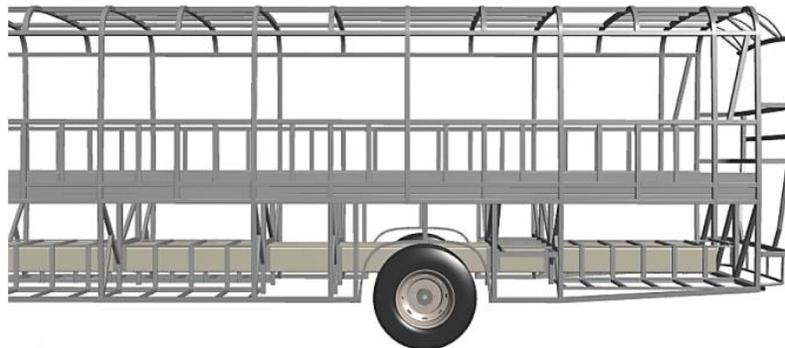
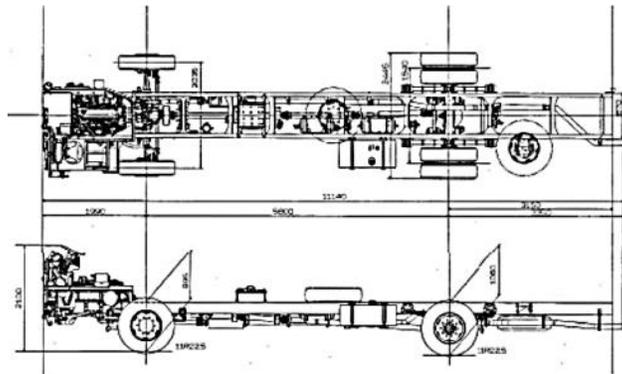


Figura 5. Armazón del Piso (Esmeraldas, 2016)



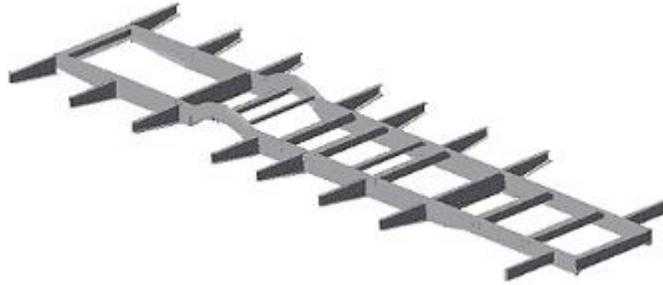
El chasis como se indica en la Figura 6, es el armazón de la unidad comprendida por bastidor, ruedas, transmisión, el cual está sometido a cargas variadas que se generan al montar una carrocería en base a varios tipos de chasis comprendidos por un proceso complejo por personal calificado en varias áreas (López, 2015).

Figura 6. Estructuras Básicas del Chasis (López, 2015)



El chasis está constituido normalmente por dos largueros unidos a un travesaño de diversas formas, el cual permite obtener oscilaciones del puente posterior (Chagoyén, Álvarez, Brito & Moya; 2013).

Figura 7. Modelo geométrico de un Chasis (Chagoyén, Álvarez, Brito & Moya; 2013)



Caracterización de las estructuras y sobre-estructuras, según Badea (2014) indica que la caracterización de los autobuses y autocares, para el transporte a gran escala, se fundamenta en el desarrollo, originada por lo que según las naciones unidas CEPE/ONU 107, se divide en:

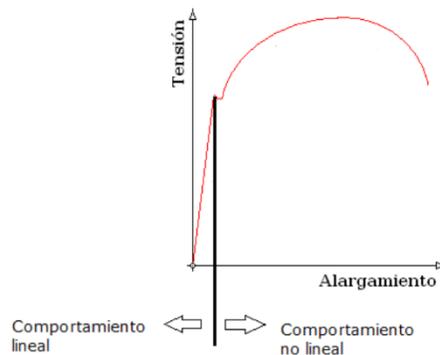
- “Clase 1”, vehículos con zonas para viajeros de pie.
- “Clase 2”, vehículos para el transporte de viajeros sentados, y de pie en el pasillo.
- “Clase 3”, vehículos para el transporte de viajeros sentados
- “Clase A”, vehículos para el transporte de pasajeros de pie.
- “Clase B”, vehículos para el transporte de pasajeros no de pie.
- “Vehículos articulados”, vehículos diseñados por dos o más secciones articuladas.
- “Vehículos de piso bajo”, son unidades de clase 1,2 o A; en los que al menos el 35% de la superficie es usada para viajeros de pie sin escalones.

Además, Badea (2014) indica que la caracterización de las estructuras se da en función del:

- Tipo de volumen, mediante sólidos tridimensionales, utilizados para modelar y analizar las características de formulación lineal con cuatro, seis y ocho nodos.
- Tipo de placa, se da, debido a la representación de espesores diferentes con tres, cuatro, seis y ocho nodos, mediante una formulación lineal ejecutada.
- Tipo de viga, se dan por elementos unidimensionales originados, por línea recta y por formulación lineal y elementos de viga curvas con formulación de estilo cuadrática.
- Elementos de muelle amortiguador, mediante un comportamiento de estilo elástico y de amortiguación, a través de dos nodos.

Existen varios tipos de simulación, el modelado con factores de carga y resistencia, se origina en conceptos de estados límite, donde se multiplica por cargas de factor definidas para el diseño de estructuras, agrupando combinaciones posibles de cargas y servicios utilizadas para definir momentos de tipo cortante y variado, en base a incertidumbres generadas por las imperfecciones en los materiales sintetizados, con criterios no conservadores, contemplados en el manual de la AISC (American Institute Steel Construction), donde las combinaciones desarrolladas son efectuadas en base a incrementos o decrementos estipulados en la Norma, fundamentadas en mecánica clásica, ocupadas por principios de resistencia de materiales, para lo cual se utiliza un procedimiento definido y presentado a continuación (INEN NTE 1323, 2009). Otro análisis es el de elementos finitos este inicia en los años 70, solo en computadoras de tipo y propiedad aeronáutica, de automoción, defensa y nuclear; lográndose implantar conocimientos de física, química y matemáticas, en un modelo de estilo matemático; donde el ingeniero afronta tareas de analizar y calcular soluciones para el diseño de distintos procesos, mediante modelos simplificados, apropiados de manera experimental, para problemas gobernados por un conjunto de ecuaciones diferenciales donde el dominio obtenido es discretizado, pudiéndose crear un modelo de estilo óptimo similar al diseño, pretendiéndose ir de un medio continuo a una serie prescrita de elementos unidos entre sí, dividiendo el espacio geométrico en elementos reflejados en puntos, líneas o superficie de manera lineal, bidimensional o tridimensional; calculando las incógnitas presentadas; comportándose el material de manera elástica en curvas de tensión – deformación hasta lograr un límite definido como se especifica en la Figura 8 (Arroba, 2013).

Figura 8. Curva tensión - deformación de un material (Arroba, 2013)



El análisis estructural consiste en asegurar la fiabilidad y la durabilidad de las estructuras, a través de conocimientos adquiridos, analizándose parámetros que conforman la configuración del software, en base a la experiencia mecánica y resistencia de materiales, verificando el comportamiento de los materiales. La seguridad en buses de tipo urbano, es un factor importante que debe permitir tener presente, ante un accidente a suscitar en carreteras, provocado por un vuelco originado, convirtiéndose en una necesidad adecuada para la protección, observando los espacios de supervivencia, implementado mejoras, ya que según la INEC en el Ecuador el 68% de habitantes ocupan transporte público, por lo que se necesita que este sea cómodo y seguro.

En tal motivo este trabajo se recopila información teórica científica que aporte como ayuda al análisis de la estructura sometido a cargas variables con el fin de analizar el comportamiento estructural de un bus urbano basado en la simulación de varios métodos que avalen la seguridad de los pasajeros.

Metodología

El presente estudio se centró en la definición del modelo de simulación en el proceso de elementos finitos y como resultado se identificaron los factores más relevantes a la hora de procesar las particularidades de este complejo trabajo que derivara a la ingeniería computarizada (CAE) (Vega et al., 2018).

Los métodos de análisis para resolver problemas dinámicos, según Donaire (2016) son:

- Método Implícito, se utiliza para la resolución del tiempo en sistemas de ecuaciones definidos, para la determinación de la rigidez, mediante el uso de matrices, siendo estables y convergentes.
- Método explícito, es usado para la resolución de cálculos dinámicos, en menor tiempo que los métodos implícitos, sin ser convergentes, siendo útil para colisiones no lineales.

Los tipos de análisis son esenciales según Vázquez (2014), indica que los tipos de análisis de modo estático del desarrollo de una pieza o ensamble son:

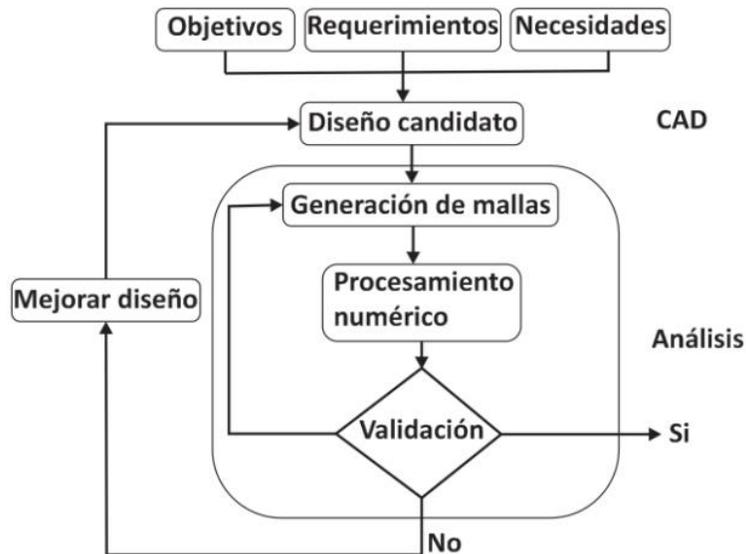
- Análisis de resistencia, se trata de un análisis que pueda proporcionar valores para esfuerzos y deformaciones máximos de un determinado y definido material.
- Análisis de rigidez, son diseño basados en la rigidez referida al desplazamiento proporcionando curvas fuerza-desplazamiento.

- Análisis de Frecuencias Naturales, es útil para determinar los modos naturales de los componentes definidos por cargas de operación, manteniendo una frecuencia bajo una velocidad de oscilación, validando el diseño final mediante el uso de un análisis establecido.

Los principales esfuerzos en la industria automotriz, según Vázquez (2014), son:

- Reducción del peso vehicular.
- Optimizar los componentes y subsistemas.
- Procesos de manufactura.
- Utilización de materiales con rigidez de estilo elevada con aleaciones ofertadas, con un proceso de diseño de tipo estructural como se indica en la Figura 9.

Figura 9. Diagrama de flujo de proceso de diseño estructural



Fuente: (Vázquez, 2014)

Análisis de esfuerzos por elementos finitos

Los métodos a utilizar son los de Elementos Finitos y Matemáticos, debido a la división de los elementos en nodos, transformando las funciones matemáticas, en modelos discreto, mediante una interpolación de los valores suscitados, donde en cada función se distingue tres tipos de nodos, como son primarios, secundarios e intermedios, agrupándose en dos familias conocidas

como serendípicas y lagrangianas, sometándose a cargas variadas, en función de su geometría, definiéndose inicialmente las unidades, condiciones de contorno, en base a un modelado en 3D de las partes que conforman la carrocería, ubicando las restricciones y fuerzas, dando como resultados esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y factores de seguridad, donde los elementos generatrices satisfacen las condiciones, permitiendo la transformación geométrica en base a errores presentados como los de modelización, discretización y de computación, con un mallado de tipo adaptivo en base a un resultado de un:

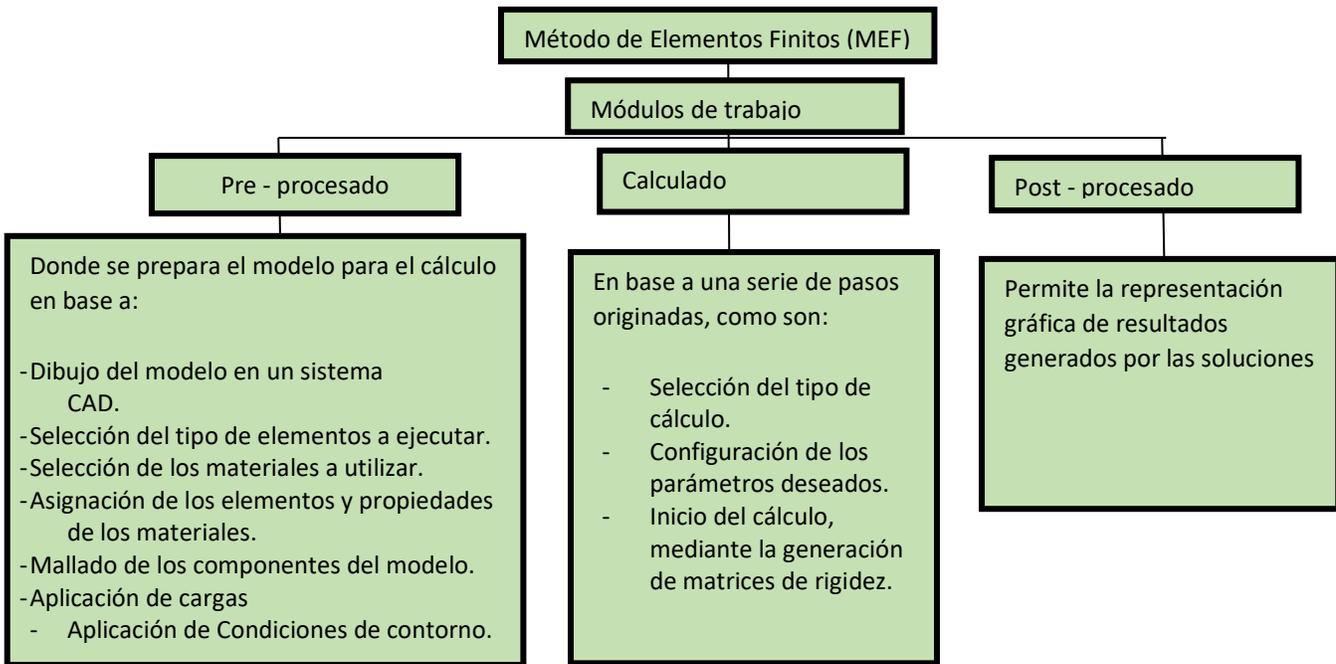
Método H, el cual consiste en la reducción del error, presentado en dos inconvenientes como es la lentitud y la pérdida del control pudiendo provocar un mallado distorsionado.

Método P, consistiendo en un aumento progresivamente la interpolación con un mantenimiento fijo, con mayor velocidad de convergencia, presentando un grado alto en las soluciones.

Método HP, se trata de una secuencia generada en ambas técnicas, donde se optimiza el mallado de la geometría con un error marcado y estimado como mínimo.

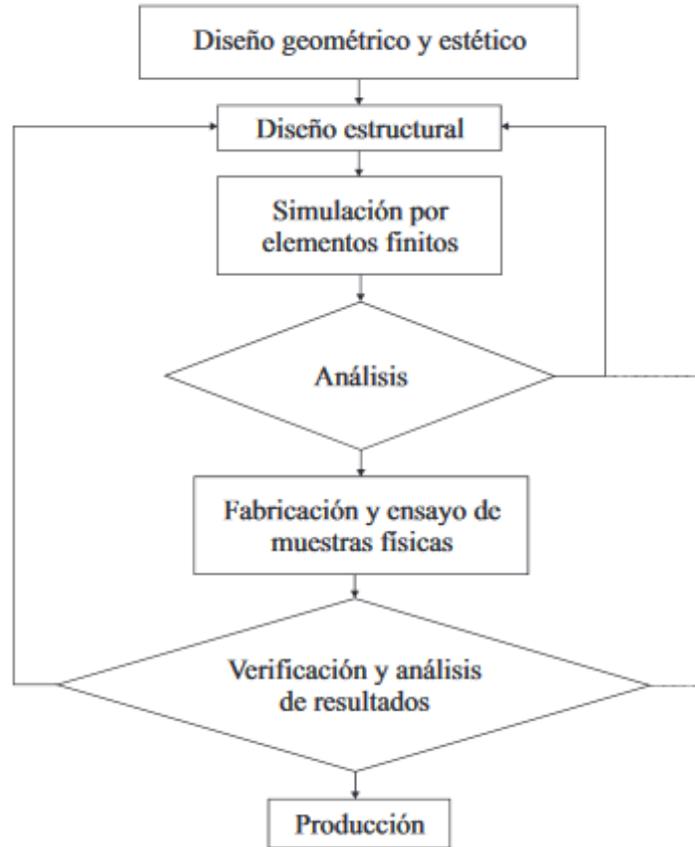
Por lo que (Frías, E.; 2004; Guamán et al., 2019), detalla los siguientes pasos a seguir, del Método de Elementos Finitos (MEF), ubicados en la Figura 10, como son:

Figura 10. Procedimientos Metodológico del Método (MEF) (Frías, E.; 2004)



Geometría CAD, los análisis por elementos finitos se basan en una geometría definida el cual se da en una serie de procesos como son según figura 11:

Figura 11. Esquema geométrico del proceso de diseño (Peña, 2013)



Modelos de verificación dinámica

Modelos de elementos simplificados, los cuales se dan “en base a un cálculo dinámico de estilo cuasi estático, donde se deben incluir la influencia del endurecimiento del material con la velocidad de deformación variando las condiciones de carga” (Belhocine & Afzal, 2019).

Modelos mediante método multi-cuerpo, se dan “mediante cálculos empleados en modelos similares a los de barras y muelles no-lineales, empleándose una estructura suficientemente aceptable” (Belhocine & Afzal, 2019).

Modelos de elementos finitos detallados, en formulación explícita, se pueden “incluir desde superestructuras hasta los elementos del vehículo en función de la complejidad de los elementos detallados que se procede a manufacturar, realizando fases de diseño, ajustándose a la realidad y

el servicio técnico requerido, originando resultados aceptables y válidos para la homologación” (Corral, 2015).

Los modelos no lineales según Sánchez, Reyes & Vásquez (2015) más usados son:

No linealidad del material, esto se da cuando se deja de ser lineal la relación originada entre el esfuerzo y deformación.

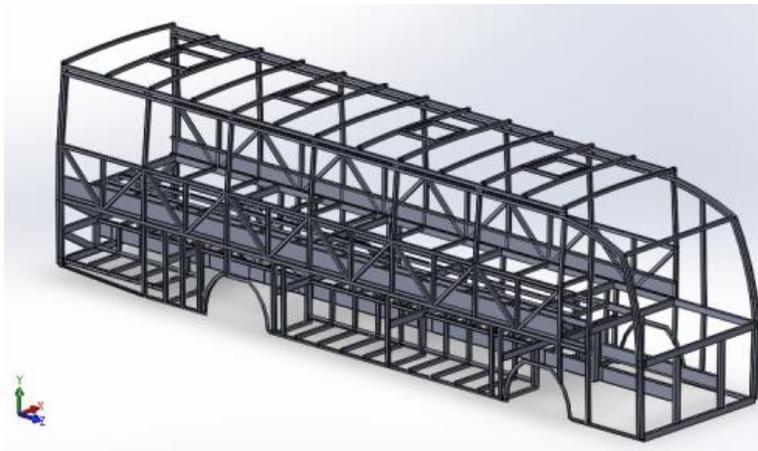
No linealidad geométrica, se da comúnmente cuando se asocia irregularidades geométricas debido a cambios bruscos.

No linealidades en condiciones de frontera, se presentan cuando las cargas y limitaciones del movimiento son definidas por su posición, forma de aplicación, tipo de carga y magnitud.

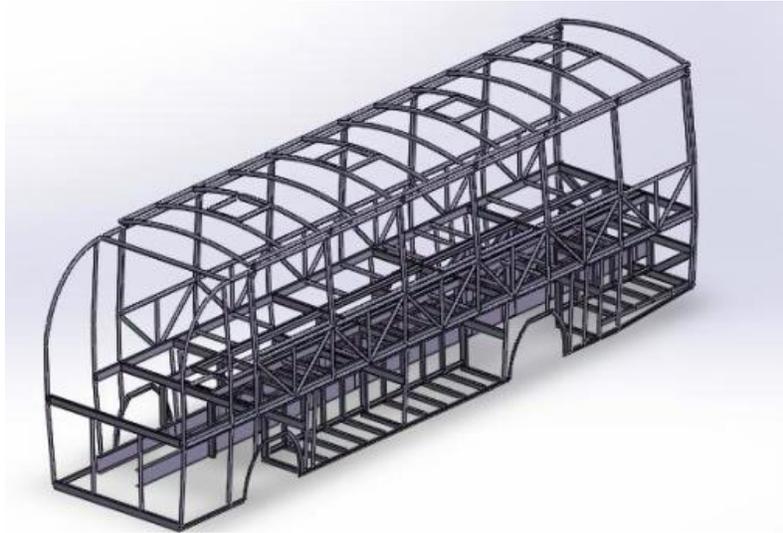
El modelado de la estructura, en el proceso del modelado de la estructura según Cárdenas, Escudero, Quizhpi & Amaya (2014), son:

- Estructura Convencional, detalla el levantamiento de datos requeridos de una estructura determinada, como se detalla en la Figura 12.
- Propuesta de la Estructura
- Análisis Estructural
- Optimización
- Propuesta Final, como se indica en la Figura 13.

Figura 10. Estructura Convencional con tubo Cuadrado



Fuente: (Cárdenas, Escudero, Quizhpi & Amaya; 2014)

Figura 11. Propuesta Final con Tubo Circular

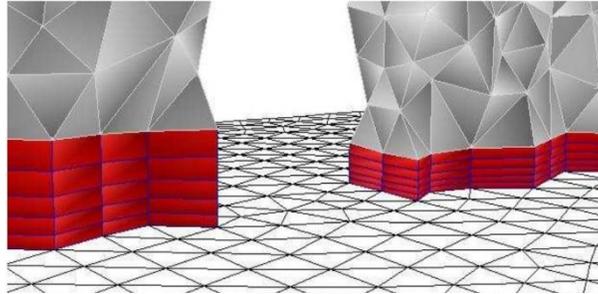
Fuente: (Cárdenas, Escudero, Quizhpi & Amaya; 2014)

La simulación estructural brinda ayuda a problemas relacionados con cargas producidas por componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, entre otros; permitiendo visualizar esfuerzos y deformaciones presentes en la estructura, ampliando el rango de opciones de simulación que permita controlar la complejidad del modelado, a través de una precisión deseada y tiempos computacionales, optimizando los diseños antes de proceder a la fabricación, con una alta precisión, diseños mejorados y parámetros críticos con una mejor percepción, en prototipos virtuales, iniciando con el croquis y modelado mediante el Diseño Asistido por Computadora (CAD), para posteriormente modelarlos a través de la Ingeniería Asistida por Computadora (CAE), aplicando las propiedades de los materiales utilizados (Garza, 2013).

El diseño asistido por computadora (CAD) en 2D y 3D, se basa en la precisión adquirida por modelos complejos del mundo real, donde la Ingeniería Inversa, depende de la segmentación ofertada por etapas, resaltando los procedimientos efectuados de datos, suavizando las superficies y registros múltiples en base a la integración de datos, con características adicionales que permitan eliminar irregularidades, creando una textura uniforme, en base a un pre procesamiento de simulación CFD, en base a parámetros simulados con dominio de estilo computacional, mallado y una solución óptima, obteniendo una confiabilidad adecuada lisa, debido a la complejidad limitada, en base a una propiedad de estilo física, con geometría y combinaciones de métodos

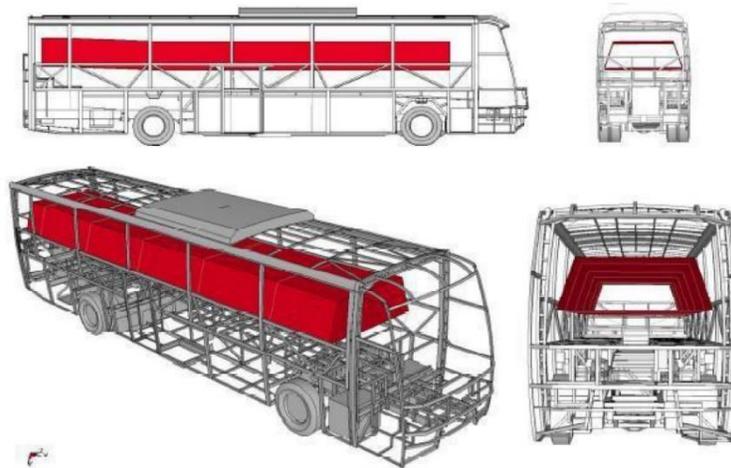
adecuados de estilo tetraédrico y hexacore, en base al refinamiento con una configuración prismática de cada capa límite como la indicada en la Figura 14. (Samaniego, 2018)

Figura 12. Configuración prismática (Samaniego, 2018)



El espacio de supervivencia es el espacio que debe quedar en el compartimiento de viajeros, ante un ensayo de vuelco, definiéndose también como el volumen, originado por la traslación longitudinal y transversal, donde se ubican los asientos ocupantes, como se observa en la Figura 15. (Donaire, 2016)

Figura 13. Espacio de Supervivencia (Donaire, 2016)



Teorías de fallas

Enriquez (2017), detalla que la Teoría de fallas se basa en la pérdida de función de elemento originados por deformación y por separación, dependiendo de la estructura microscópica de forma con enlaces atómicos, prediciendo la falla de materiales bajo cargas estáticas, modelando

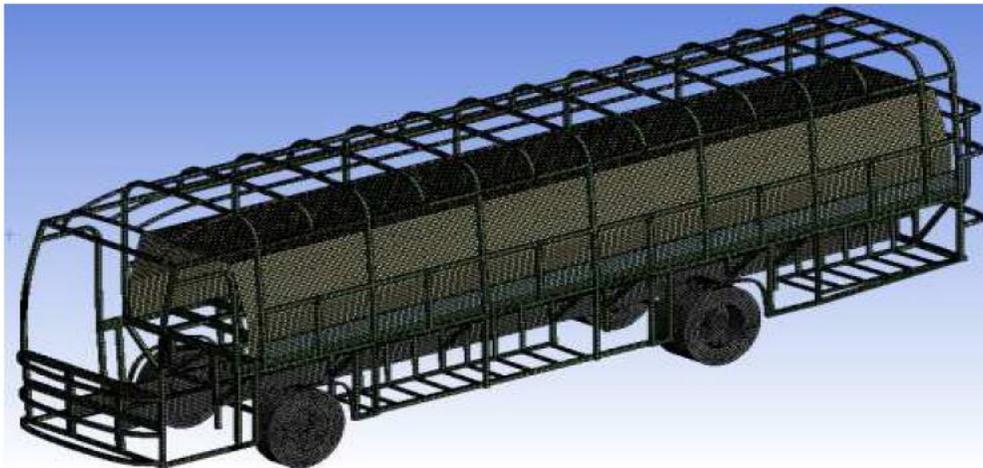
diseños de elementos de máquinas de estilo confiable, generando cedencia bajo estados combinados de esfuerzos con criterios como:

- Tresca o Teoría de esfuerzos cortantes máximos
- Von Mises
- Esfuerzo Normal Máximo
- Coulumb – Mohr
- Circulo de Mohr

Mallado

Para mallar un determinado elemento con el método del MEF, actúan los automalladores y preprocesadores, de estilo 2D, en forma de cuadrilateros lineales, dominantes o triángulos adicionales en las regiones definidas, mientras que en 3D operan los elementos de forma tetraédrico lineal para la estimación de esfuerzos aceptable, con una combinación de ladrillos de 8 nodos y cuñas de 6 nodos aumentado el tiempo del procesamiento, de estilo mixto cuando se originan geometrías de diferentes modelos como se indica en la Figura 14 (Cháfuel, 2017).

Figura 14. Mallado Mixto de la carrocería de un bus



Fuente: (Cháfuel, 2017)

Análisis de sensibilidad de las mallas, el análisis se procede para hacer frente a la precisión del mallado de una determinada variable frente a una estructura recomendándose las siguientes.

Tabla 1. Deformación equivalente

Modelo 3D	Deformación equivalente promedio (*10 ⁻³)	Diferencia (%)
Malla Fina (25 mm)	1.8672	1.19
Malla Media (50 mm)	1.8448	2.73
Malla Gruesa (75 mm)	1.8952	

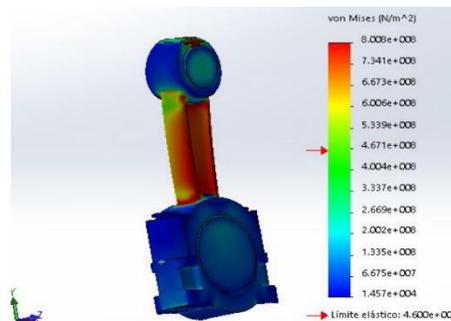
Fuente: (Cárdenas & Teixeira, 2017)

Morillo (2017), indica que el análisis por elementos finitos MEF, permite solucionar, inconvenientes o problemas generados en la ingeniería, a través de un software especializado, mediante el uso del Gestor de diseño, que permitan modificar las operaciones tridimensionales, en base a un croquis bosquejado inicialmente, existiendo tipos de malla variados, mediante una distribución de fuerzas originadas, como son:

- Malla Cuadrada
- Malla Rectangular
- Malla Triangular
- Malla Hexagonal

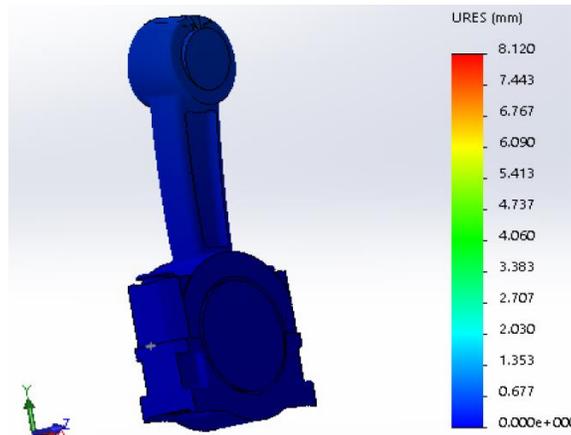
Por lo que mediante el análisis por elementos finitos se observa el comportamiento de una carga continua definida por esfuerzos en escala Von Mises, como se indican en la Figura 17, incrementándose a intervalos variables y desplazamientos generados a cargas máximas como se detalla en la Figura 18, así como el factor de seguridad mediante un diseño establecido y calculado como se observa en la Figura 19.

Figura 14. Esfuerzo sometido a Carga Máxima



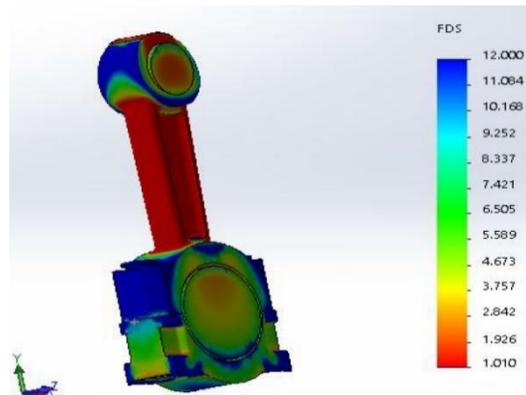
Fuente: (Morillo, 2017)

Figura 15. Desplazamiento sometido a Carga Máxima



Fuente: (Morillo, 2017)

Figura 16. Factor de Seguridad sometido a Carga Máxima



Fuente: (Morillo, 2017)

El análisis de esfuerzos generados, se da con la ayuda brindada por un software de tipo CAE, a través de un mallado de estilo Tetraédrico, dividiendo en pequeñas áreas, en base a una calidad de estilo jacobiano, mediante puntos de anclaje y asignación de cargas, generando un análisis de esfuerzos máximos, el cual no debe superar el esfuerzo ultimo a la fluencia del material, evidenciándose factores de seguridad, resaltando los puntos críticos, resistentes con tendencia a fallar, con una deformación máxima originada, mediante un análisis estático establecido con parámetros de construcción definida inicialmente en conjunto con el croquis bosquejado (Pasquel & Quirola, 2018).

El procedimiento a seguir analíticamente o matemáticamente a una carrocería es:

En base a un análisis de estilo cuastiestático, se determinan los cálculos de cargas y pesos en función de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009, donde se estipulan:

Cargas Actuantes, como:

Carga viva (V)

$$V = v * g$$

Dónde: V = Carga generada por las personas (N); v = Peso originados por las personas (kg); g = Gravedad (9.8 "m" / "s" ^"2")

Carga muerta (M)

$$M = m * g$$

Dónde: M = Carga generada por los materiales (N); m = Peso originados por los materiales (kg); g = Gravedad (9.8 "m" / "s" ^"2")

Carga de giro (G)

$$(G) = (m + v) * \frac{V^2}{r}$$

Dónde: m = Peso de los materiales (kg); v = Peso de las personas (kg); Vel = Velocidad de la unidad recomendada por la Norma 1323:2009 = 90 Km/h; r = Radio de Curvatura (m); G = Carga de Giro (N)

Carga por Resistencia del Aire Frontal (Raf)

$$(Raf) = \frac{Cx * \rho * Af * V^2}{2}$$

Cx= Coeficiente de resistencia aerodinámica recomendada por la Norma 1323:2009 (N) = 0.7; "ρ" = Densidad del aire (kg / m3); Af= Área de la proyección frontal de la unidad en (m2); V= Velocidad recomendada por la Norma 1323:2009 = 90 Km/h,

Carga de frenado (F)

$$F = m * a$$

Dónde: m = Peso de los materiales (kg); a = Desaceleración recomendada por la Norma 1323:2009 de Frenado = "4" "m" / "s" ^"2", F = Carga de Frenado (N)

Carga de Aceleración Brusca (Ab)

$$Ab = -m * a$$

Dónde: m = Peso de los materiales (kg); a = Aceleración recomendado por la Norma 1323:2009 = "4" "m" / "s" ^"2", Ab = Carga de Aceleración Brusca (N)

Combinación de cargas según el método recomendado que es el establecido como LRFD (Load Resistance Factor Design), los cuales son:

- M+V
- 1.2M+1.6V+0.5G
- 1.2M+0.5V+1.6G
- 1.2M+1.6F+0.8Raf
- 1.2M+0.5V+0.5F+1.3Raf
- 1.2M+1.5Ab+0.5V
- 0.9M-1.3Raf
- 0.9M+1.3Raf

Con los resultados obtenidos se procede a analizar por el Método MEF, descrito anteriormente.

Una vez desarrollado el Modelado por el Método MEF, se procede a validar los resultados, mediante Modelos Matemático, descrito a continuación:

Según la Norma 1323:2009, indica que se deben alcanzar una deformación elástica de todos los componentes iguales o menores a 1/240 veces su longitud.

Otro factor a tener en cuenta según la Norma 1323:2009, es que debe resistir una carga estática sobre el techo, equivalente al cincuenta por ciento del peso máximo admisible para el chasis, distribuido uniformemente, en elementos que superen los setenta milímetros.

Mediante la Ley de Hooke se procede a establecer la deformación unitaria del material basada en la longitud real y el desplazamiento generado.

Los datos que tomamos de este registro son:

L = Longitud Calibrada; σ = Esfuerzo de fluencia; δ = Deformación; E = Modulo de Elasticidad; Et = Deformación Unitaria Teórica; Ec = Deformación Unitaria Experimental.

$$\sigma = E * Et$$

$$Et = \frac{\sigma}{E}$$

$$Ec = \frac{\delta}{L}$$

$$Et = Ec$$

Mediante bibliografías útiles como Diseño de Elementos de Máquinas de Robert Mott y Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, nos basaríamos para determinar el Esfuerzo Máximo y el Desplazamiento donde intervienen la carga, la elasticidad del material, la Inercia, la Fuerza Cortante y el Momento Flector.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{3V}{2A}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \pm \frac{MC}{I}$$

$$Y_{m\acute{a}x} = -\frac{5ql^4}{384EI}$$

Donde:

C = Altura Media del Tubo; I_x = Inercia; V = Fuerza Cortante; M = Momento Flector; A = Área del Tubo; q = Carga distribuida; L = Longitud de la Viga; E = Elasticidad; I_y = Inercia; τ_{máx} = Esfuerzo de Cortante Máximo; σ_{máx} = Esfuerzo de Flexión Máximo; Y_{máx} = Deflexión Máxima

De igual manera se debe tener presente que el Factor de seguridad útil, originado por el MEF debe ser igual o mayor al recomendado para materiales dúctiles, establecidos en las bibliografías indicadas anteriormente, donde actúan la energía cinética y fuerza constante, en función de la densidad del Acero ASTM A36, y la Profundidad de Deformación.

Tipo de errores

Avilés (2017), indica que los errores existentes en el análisis de los elementos finitos se dividen en:

Errores de modelización, generados en cargas exteriores, condiciones de contorno y propiedades de los materiales.

Errores en la aproximación de la geometría, por falta de exactitud de modo real, aumentando la calidad del mallado con un mejor refinamiento.

Errores en la discretación, relacionadas de manera directa con el tamaño de los componentes en forma de nodos.

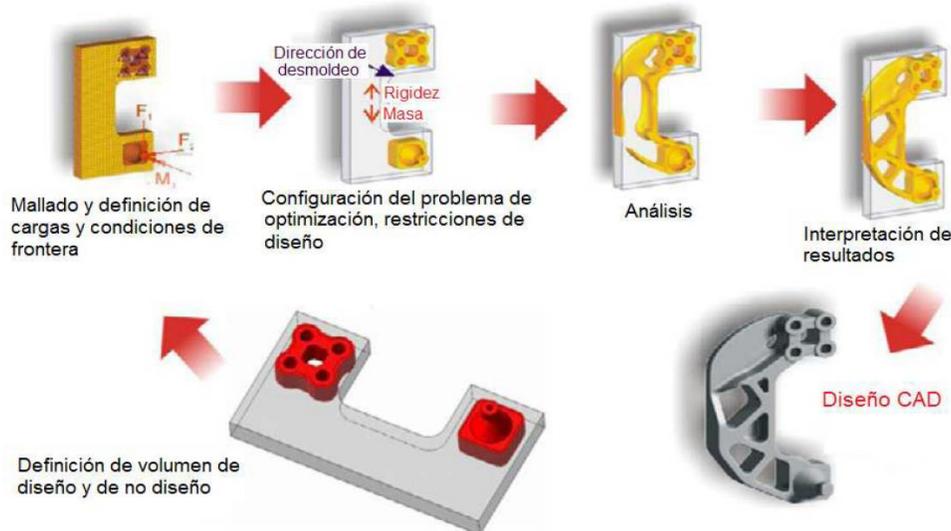
Errores de computación, debido a la integración generada sobre los componentes, aceptando un error limitado, por un truncamiento en la representación del ordenador

Optimización estructural

Optimización estructural, son procesos guiados por el método CAE (Ingeniería Asistida por Computadora), útil para ser utilizada en la etapa conceptual donde se dan, diseños innovadores, productos de mayor eficiencia y mayor rapidez en el proceso de modelado, logrando mejor desempeño con varias restricciones como la cantidad de material, esfuerzo máximo, el desplazamiento, entre otros, debido a los recursos materiales originados por el impacto ambiental y la competencia tecnológica, en función de variables definidas de diseño en base a las densidades estipuladas con una combinación lineal de vectores ejecutadas, como se detalla en la Figura 20 (Pozo, 2014)

Por lo que la optimización estructural topológica se da en base a una técnica matemática de una distribución de materiales para un conjunto de cargas y restricciones lineales, basadas en la suposición de cada elemento de densidad variable, definiendo las propiedades de los elementos, dimensiones y espesores de un componente mecánico ideal (Pozo, 2014).

Figura 17. Diseño de un componente mediante optimización estructural



Fuente: (Pozo, 2014)

Simulación del modelo matemático

La simulación del modelo matemático, según Gómez (2018), básicamente se da en base a tres tipos que son:

Static Structural, permite “el análisis de fuerzas axiales y de corte, así como los de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos mediante la aplicación de cargas definidas estáticamente, en base a diferentes contactos utilizados a través de un coeficiente de fricción, y las condiciones de fronteras analizadas” (Gómez, 2018).

Modal, permite “la determinación de características dinámicas, en base a sistema definido en forma de frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y de nodos de un elemento definido” (Gómez, 2018).

Rigid Dynamics, permite “la creación de diferentes juntas de diferentes componentes que no permitan la separación de la simulación producida y generada por la fuerza definida y establecida, en base a diferentes condiciones no lineales, definidas con un mallado aceptable” (Gómez, 2018).

Tipos de Problemas

Militello & Guadalupe (2013), los problemas físicos ejecutados, que pueden originarse son:

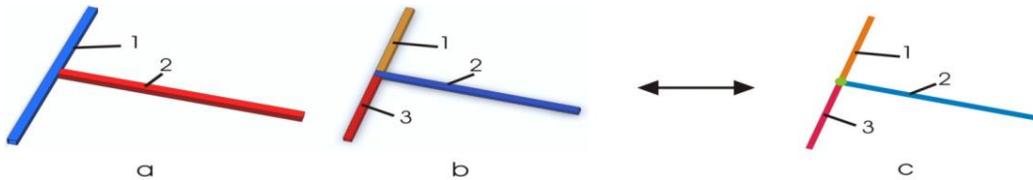
- Deformación elástica estructural
- Equilibrio de fuerzas
- Desplazamientos
- Tensión
- Módulo de Young, constante de poisson
- Torsión
- Electrostática
- Magnetismo
- Conservación de la energía, momento y masa.
- Función de tensiones
- Velocidad
- Torsión
- Estados de tensiones
- Módulo de corte
- Viscosidad
- Permeabilidad

- Permitividad

Limitaciones de los elementos

Las limitaciones de los elementos dados, durante la manufacturación de los autobuses son la utilización de perfiles tubulares de sección hueca, cuadrada o rectangular que tengan resistencia mecánica aceptable, con dimensiones apropiadas y una geometría regular considerable, utilizándose uniones simples formadas por dos o tres perfiles perpendiculares entre sí, como las indicadas en la Figura 21, ofertando una rigidez mayor con uniones complejas relacionadas con los aspectos brindados de manera práctica con tres elementos independientes, con una estimación de una estructura modelizada rígidamente, con análisis de fatiga mayor a los nodales los cuales generan una sensibilidad grande tras la distribución de masa. (Badea, Alcala, Grimaldi, Ogando & Aparicio; 2015)

Figura 18. Correlacional entre dos modelos de uniones simples (a, b) y el equivalente modelo FEM (c)



Fuente: (Badea, Alcala, Grimaldi, Ogando & Aparicio; 2015)

Materiales estructurales útiles

Los materiales estructurales utilizados en la Industria Automotriz son:

Acero ASTM A36, es el material “más usado para la construcción de estructuras, con una aleación de hierro mínimo del 98%, con carbono en porcentajes menores del 1% y cantidades como, el manganeso, fosforo, azufre, sílice y vanadio en un porcentaje igual al anterior del 1%, presentando una gran resistencia a la intemperie, mejorando su soldabilidad, con un límite de fluencia de 3600 psi, con una resistencia a la tracción de 58000 psi, con una elongación en 2 pulgadas igual al 20” (Hidalgo, 2013).

Acero Inoxidable, es una “aleación de hierro y carbono, con un mínimo de contenido del 10.5% de cromo, resistente a la corrosión, aplicándose en estructuras definidas, manteniendo la apariencia del bus atractiva, con una carrocería fácil de reparar, evitando la corrosión del hierro

originado, ofreciendo una resistencia mecánica, propiedades higiénicas, resistencia a temperaturas elevadas y criogénicas (Hidalgo, 2013).

Aluminio, por su “baja densidad da una valoración de 2.7 g/cm³, por lo que se origina una gran resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas superiores, con un 46% más liviano, por lo que requerirán menor fuerza o potencia para moverse, reduciendo el ruido y vibración, absorbiendo energía cinética” (Hidalgo, 2013).

Carbajo & García (2014) en su proyecto de investigación, indican que se han realizado el análisis planteado mediante el modelado virtual en ANSYS por el Método de Elementos Finitos, de tipo modal y otro de tipo armónico semejante a la realidad, mediante grandes simplificaciones, donde se ejecutan resultados coherentes, determinando que los niveles de vibraciones que sufre el pasajero en la unidad de transporte no son de amplitud considerable, mediante el arranque generado de valores elevados en un determinado tiempo, cumpliéndose una frecuencia natural del 50% de disparo, siendo de 31.25 Hz, comprobándose la transmisibilidad entre el motor y la estructura menor al 40%, estableciéndose la función de respuestas a lo largo del eje longitudinal del autobús.

Beltrán & Garrido (2017), que permitió conocer la resistencia y deformación, mediante la aplicación de cargas sometidas a una operación definida, modificando la configuración geométrica logrando mayor eficiencia aerodinámica, siguiendo los lineamientos del RTE-043, cuyas herramientas, mediante el análisis de tipo CAE, realizando esfuerzos y cargas basadas en la norma INEN 1323:2009, donde dicha deformación elástica es menor a 1/240, simulando el impacto frontal según normativa internacional NCAP, analizando el comportamiento mediante el uso del software especializad CFD, estableciendo factores que intervienen en la carrocería, realizándose un prototipado en 3D de una escala de 1:200, los cuales son adecuados. Hernández (2016), con el proyecto de investigación analizó las Normas Técnicas de Estándares Nacionales e Internacionales para la simulación virtual, ejecutando un modelado en 3D en un sistema de estilo CAE, obteniendo datos que permiten evaluar y analizar las consideraciones mediante pruebas en la simulación, en base al diseño estructural según la norma NTE INEN 1323:2009, donde se determinó que ningún elemento invadió el espacio de supervivencia en base a resultados del Diagrama Deformación Plástica Efectiva Vs Tiempo, manteniéndose un valor constante de tiempo cero MPa, con un material adecuado permitiendo una absorción apropiada de energía de impacto, con un ensayo virtual, ubicándose el centro de gravedad CG, punto de impacto y el

valor del peso total del autobús, simplificándose el modelado 3D, mediante el uso de un SOLVER propio.

Santos (2017), mediante el uso de un software, establecido con un paquete computacional de estilo dinámico no lineal, donde se determinó parámetros de simulación adecuados mediante una malla e 30 mm para toda la parte estructural, validando la obtención de un error del 0.3616% a través del método de la energía de Hourglass y del 3.87% con el método de comparación de una análisis físico de estilo conservador, proponiendo una enmienda en la Norma Técnica Ecuatoriana que incluya el ensayo de impacto frontal adecuado.

González (2013), con el proyecto de investigación permitió optimizar la características mecánicas y estructurales en base a consideraciones definidas como elementos finitos y el comportamiento de los materiales dentro del área elástica como herramienta de diseño, obteniendo un semi – chasis que sea capaz de soportar la carga muerta y viva promedio, con una estructura ligera, considerando aspectos dimensiones con parámetros normalizados, definiendo el cambio de geometría y ubicación de las secciones transversales, satisfactoriamente incrementándose 2.5 veces la carga viva, obteniéndose un desplazamiento del 13.22 mm, con un esfuerzo permisible del 298.11 MPa, absorbiéndose la problemática de no haberse dado una distribución de asientos iguales, con simulaciones adecuadas del 60% del peso bruto vehicular del límite definido, bajo condiciones críticas. Además Murillo (2018), valora la posibilidad de usar perfiles combinados en estructuras de autocares, protegiendo a los pasajeros en caso de vuelco, desarrollando una metodología adecuada, de manera precisa, caracterizando la influencia de las tolerancias dimensionales, en base a medidas establecidas, en un modelado de tipo paramétrico valorando su utilidad, del momento flector de los perfiles individuales, en base a estudios efectuados, considerando ensayos correlacionales de régimen de tipo plástico o elasto-plástico, debido a los resultados originados, en base a fijaciones definidos de cada perfil.

Conclusiones y recomendaciones

El comportamiento estructural desde la simulación es suficiente y además se debe acudir a varios métodos que avalen la seguridad de los pasajeros y así ser satisfecho el modelo aplicado para su construcción.

Los factores relevantes de análisis como desplazamientos, deformaciones y factores de seguridad son útiles en una simulación apropiada para que se valide sus materiales y se muestre como estrategias de optimización.

De la definición de varios autores las condiciones de contorno se deben de cuidar de tal forma se garantice el grado de precisión de la simulación de la estructura y de forma similar su aplicación práctica.

Referencias

1. Alvarado, P. y Carrera, J. (2015). “La homologación de los buses de transporte urbano, los procedimientos de regulación técnica y su influencia en la seguridad”. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito. (págs. 28, 29 y 30)
2. 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”. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato. (págs. 21 - 25)
3. Avilés, R. (2017). “Estudio del impacto lateral del autobús urbano con carrocería IMPA para determinar la configuración de la estructura que cumpla con la normativa de la UNECE Regulación R095R02” Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato (pág. 30)
4. Badea, F., (2014). “Métodos numéricos y estadísticos de caracterización de uniones tubulares soldadas para su aplicación en modelos finitos de estructuras de vehículos”. Argentina: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. (págs. 28, 29 y 30)
5. Badea, Alcala, Grimaldi, Ogando, Aparicio; (2015), Optimización de uniones y estructuras de autobuses, España: Asociación Española de Ingeniería Mecánica. (págs. 3 y 4)
6. Belhocine, A & Afzal, A; (2019). “FEA Analysis of coupled thermo-mechanical response of grey cast iron material used in brake discs”, REVISTA CIENTIFICA, SCIELO, (págs 280 – 196)

7. Beltrán, C. y Garrido, J.; (2017), “Análisis estructural y optimación aerodinámica de la carrocería de un bus interprovincial modelo GR de la empresa OLÍMPICA QUITO” Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. (págs. 159 y 160)
8. CANFAC; (2014), “INFORME DE DIAGNÓSTICO DEL SECTOR CARROCERO” Ambato, Ecuador: CÁMARA NACIONAL DE FABRICANTES DE CARROCERÍAS.
9. Carbajo, J. y García, F.; (2014), “Análisis Modal de un Autobús” Pamplona, España: Universidad Pública de Navarra. (pág. 146)
10. Cárdenas, D.; Escudero J. & Quizhpi, K. (2014). “Propuesta de diseño estructural de carrocería para buses de servicio interprovincial”, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. (pág. 46 – 48)
11. Cárdenas J. & Teixeira J (2017). “Intrapedicular screw and stud. Finite Element Analysis”. Revista redalyc.org
12. Cháfuel, V. (2017). “Análisis estructural por el método de elementos finitos de una carrocería de bus interprovincial basado en simulación virtual de impacto frontal y posterior para verificar materiales y geometrías de construcción”. Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército (pág. 41, 42 y 43).
13. Chagoyén, C; Álvarez, C; Brito, Y; Moya, J; Chagoyén, E (2013). “Comportamiento estático y modal del chasis de un ómnibus modernizado”. IM. Ingeniería Mecánica. SCIELO.
14. Corral, T. (2015). “Estudio teórico-experimental para la mejora de la resistencia estructural de autocares basados en el diseño de uniones y asientos” España: Universidad Politécnica de Madrid. (págs. 59 y 60)
15. Donaire, J., (2016), “Comparativa de modelos de simulación de vuelco de autobuses según los procedimientos del reglamento 66”, España: Universidad Politécnica de Madrid.
16. Enríquez, M. (2017). “Diseño y análisis estructural del chasis, por método de elemento finito de un transporte biplaza eléctrico-híbrido, que transportará un discapacitado en silla de ruedas, funcionando mediante celdas de combustible poliméricas” México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica sección de estudios de posgrado e investigación unidad profesional” Adolfo López Mateos”. (págs. 34 – 38)

17. Esmeraldas, C. (2016). “Análisis estructural basado en simulación por el método de elementos finitos de una carrocería de bus interprovincial sometida a prueba de impacto lateral para determinar la geometría y materiales aplicables que garanticen la seguridad de los pasajeros”, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejercito.
18. Frías, E. (2004). “Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial, mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos” Barcelona, España: UPC – Departamento de Ingeniería Eléctrica (pág. 111-144)
19. Garza, R., (2013). “Propuesta de reducción del peso estructural de autobuses empleando herramientas de elementos finitos”, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
20. Gómez, P. (2018). “Análisis, diseño y simulación del comportamiento mecánico de un motor asíncrono trifásico, utilizando el método de los elementos finitos”, Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. (págs. 75 – 86)
21. González, M.; (2013), “Análisis estructural de un autobús de piso bajo continuo”, México D.F., México: Instituto Politécnico Nacional del Centro de Investigación e Innovación Tecnológica (pág. 106)
22. Guamán, E., E.A. Llanes-Cedeño, S. Celi y J.C. Rocha-Hoyos, (2019) Parámetros del Múltiple de Escape para su Diseño Computacional: una revisión, Inf. Technol., 30(6), 255-268
23. Hernández, J. (2016). “Análisis estructural basado en simulación por el método de elementos finitos de una carrocería de bus interprovincial sometida a prueba de volteo para determinar la geometría y materiales aplicables que garanticen la seguridad de los pasajeros”, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejercito (pág. 3 y 4).
24. Hidalgo, D. (2013), “Estudio estructural del bus urbano entrada baja de acuerdo a la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 1323 para incrementar la competitividad de la empresa PICOSA, Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
25. INEN NTE 1323, (2009). “Vehículos Automotores, carrocerías de buses. Requisitos” Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización. (págs. 2 – 8)
26. López, L., (2015). “Análisis de la estructura del chasis HINO AK8JRSA y su incidencia en el comportamiento mecánico general del bus interprovincial en la Industria Metálica CEPEDA (IMCE), Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato. (págs. 12 y 13)

27. Manjarrés, F. y Santillán, E., (2016), “Análisis Estructural a Cargas de Impacto Frontal de un Bus Tipo Interprovincial mediante el Método de Elementos Finitos”, Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. (pág. 13, 14).
28. Militello, C. y Guadalupe, V.; (2013). “Modelización Mecánica de Elementos Estructurales”, Tenerife, España: Universidad de la Laguna. (pág. 5)
29. Morillo, V. (2017). “Determinación de la carga mecánica máxima que soportan las bielas del motor de una camioneta MAZDA BT-50 Diésel mediante ensayos estáticos de esfuerzos experimentales y por elementos finitos” Ibarra: Universidad Técnica del Norte. (págs. 5, 6 y 7)
30. Murillo, F. (2018). “Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de autobuses” Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid UPM (pág. 138)
31. Pasquel, S. y Quirola, M., (2018), “Análisis estructural del bastidor carenado para la implementación de los sistemas mecánicos de una motocicleta tipo Chopper eléctrica”, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejercito (págs. 90 – 95)
32. Peña (2013), Optimización de diseño de llantas de aluminio a flexión mediante el método de elementos finitos, SCIELO, (págs. 108-115)
33. Pozo, J., (2014), “Propuesta de Procedimientos de Análisis y de Diseño de Superestructuras de Autobuses”, México D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México.
34. Rocha-Hoyos, J.C.; Llanes-Cedeño, E. A; Celi-Ortega, S.; y Peralta-Zurita, D., (2019) Efecto de la Mezcla de Biodiésel en el Rendimiento y la Opacidad del Motor Diésel, Inf. Technol. 30(3)
35. Samaniego, G., (2018). “Diseño y manufactura de un alerón para aplicación automotriz con material compuesto de matriz poliéster con refuerzo de fibra de vidrio por medio de CAD/ CAE/ CAM”. Ecuador. Universidad de las Fuerzas Armadas (págs. 24 -33)
36. Sánchez, Reyes & Vásquez; (2015) “Determinación de esfuerzos entre dos piezas en contacto utilizando el Método de Elementos Finitos” México, Revista Científica.
37. Santos, L.; (2017), “Simulación por el método de los elementos finitos del impacto frontal de un bus interprovincial de fabricación nacional, para proponer la modificación de la

- NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1323:2009”, Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (pág. 72)
38. Suntaxi, V., (2018). “Análisis y perfeccionamiento de elementos estructurales del sistema de suspensión delantera de un tracto camión mediante herramientas de CAD/CAE”. Ecuador. Escuela Politécnica del Ejército (pág. 33)
39. Vázquez, V., (2014), “Diseño conceptual de un sub-chasis automotriz mediante optimización estructural topológica”, México D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México.
40. Vega, W.H., E.A. Llanes-Cedeño, J.V. Molina y J.C. Rocha-Hoyos, (2018) Revisión de las Características de Modelado y Optimización para el Diseño del Sistema de Suspensión Macpherson, Inf. Tecnol., 29(6), 221-233

References

1. Alvarado, P. and Carrera, J. (2015). "The homologation of urban transport buses, technical regulation procedures and their influence on safety." Quito, Ecuador: San Francisco University of Quito. (pp. 28, 29 and 30)
2. Arroba, C., (2013). Study of the mechanical behavior of a section of the superstructure of the interprovincial bus brand MIRAL Infiniti in a Hino Ak chassis under dump, using the Ansys Ls-Dyna programs and their impact on the survival space ". Ambato, Ecuador: Technical University of Ambato. (pp. 21-25)
3. Aviles, R. (2017). “Study of the side impact of the urban bus with IMPA bodywork to determine the configuration of the structure that complies with the regulations of the UNECE Regulation R095R02” Ambato, Ecuador: Technical University of Ambato (p. 30)
4. Badea, F., (2014). "Numerical and statistical methods of characterization of welded tubular joints for application in finite models of vehicle structures". Argentina: Higher Technical School of Industrial Engineers. (pp. 28, 29 and 30)
5. Badea, Alcala, Grimaldi, Ogando, Aparicio; (2015), Optimization of unions and bus structures, Spain: Spanish Association of Mechanical Engineering. (pp. 3 and 4)

6. Belhocine, A & Afzal, A; (2019). "FEA Analysis of coupled thermo-mechanical response of gray cast iron material used in brake discs", REVISTA CIENTIFICA, SCIELO, (pp. 280-196)
7. Beltrán, C. and Garrido, J .; (2017), "Structural analysis and aerodynamic optimization of the body of an interprovincial bus model GR of the OLÍMPICA QUITO company" Ecuador: University of the Beloved Forces ESPE. (pp. 159 and 160)
8. CANFAC; (2014), "BODY SECTOR DIAGNOSTIC REPORT" Ambato, Ecuador: NATIONAL CHAMBER OF BODY MANUFACTURERS.
9. Carbajo, J. and García, F .; (2014), "Modal Analysis of a Bus" Pamplona, Spain: Public University of Navarra. (p. 146)
10. Cárdenas, D .; Escudero J. & Quizhpi, K. (2014). "Proposal for structural body design for interprovincial service buses", Ecuador: Salesiana Polytechnic University, Cuenca headquarters. (p. 46-48)
11. Cárdenas J. & Teixeira J (2017). "Intrapedicular screw and stud. Finite Element Analysis." Redalyc.org magazine
12. Cháfuel, V. (2017). "Structural analysis by the finite element method of an interprovincial bus body based on virtual simulation of frontal and posterior impact to verify construction materials and geometries." Ecuador: Polytechnic School of the Army (p. 41, 42 and 43).
13. Chagoyén, C; Álvarez, C; Brito, Y; Moya, J; Chagoyén, E (2013). "Static and modal behavior of the chassis of a modernized bus". IM. Mechanical Engineering. SCIELO.
14. Corral, T. (2015). "Theoretical-experimental study for the improvement of the structural resistance of coaches based on the design of joints and seats" Spain: Polytechnic University of Madrid. (pp. 59 and 60)
15. Donaire, J., (2016), "Comparison of bus rollover simulation models according to the procedures of regulation 66", Spain: Polytechnic University of Madrid.
16. Enriquez, M. (2017). "Design and structural analysis of the chassis, by finite element method of an electric-hybrid two-seater transport, which will transport a disabled person in a wheelchair, operating through polymeric fuel cells" Mexico: National Polytechnic Institute, Higher School of Mechanical and Electrical Engineering Postgraduate studies and research unit "Adolfo López Mateos". (pp. 34-38)

17. Esmeraldas, C. (2016). “Structural analysis based on simulation by the finite element method of an interprovincial bus body subjected to lateral impact test to determine the applicable geometry and materials that guarantee the safety of passengers”, Ecuador: Polytechnic School of the Army.
18. Frías, E. (2004). “Contributions to the study of axial flow electric machines, through the application of the Finite Element Method” Barcelona, Spain: UPC - Department of Electrical Engineering (p. 111-144)
19. Garza, R., (2013). "Proposal to reduce the structural weight of buses using finite element tools", Mexico: National Autonomous University of Mexico.
20. Gómez, P. (2018). “Analysis, design and simulation of the mechanical behavior of a three-phase asynchronous motor, using the finite element method”, Cuenca, Ecuador: Salesian Polytechnic University. (pp. 75-86)
21. González, M. ; (2013), “Structural analysis of a continuous low-floor bus”, Mexico City, Mexico: National Polytechnic Institute of the Center for Research and Technological Innovation (p. 106)
22. Guamán, E., E.A. Llanes-Cedeño, S. Celi and J.C. Rocha-Hoyos, (2019) Exhaust Manifold Parameters for your Computational Design: a review, *Inf. Tecnol.*, 30 (6), 255-268
23. Hernández, J. (2016). “Structural analysis based on simulation by the finite element method of an interprovincial bus body subjected to a flip test to determine the applicable geometry and materials that guarantee the safety of passengers”, Ecuador: Polytechnic School of the Army (page 3 and 4).
24. Hidalgo, D. (2013), “Structural study of the low entry urban bus according to the INEN 1323 ECUADORIAN TECHNICAL STANDARD to increase the competitiveness of the PICOSA company, Ambato, Ecuador: Technical University of Ambato.
25. INEN NTE 1323, (2009). “Automotive vehicles, bus bodies. Requirements ”Quito, Ecuador: Ecuadorian Institute for Standardization. (pp. 2-8)
26. López, L., (2015). “Analysis of the structure of the HINO AK8JRSA chassis and its impact on the general mechanical behavior of the interprovincial bus in the CEPEDA Metal Industry (IMCE), Ambato, Ecuador: Technical University of Ambato. (pp. 12 and 13)

27. Manjarrés, F. and Santillán, E., (2016), "Structural Analysis of Frontal Impact Loads of an Interprovincial Type Bus using the Finite Element Method", Quito, Ecuador: National Polytechnic School. (p. 13, 14).
28. Militello, C. and Guadalupe, V .; (2013). "Mechanical Modeling of Structural Elements", Tenerife, Spain: Universidad de la Laguna. (p. 5)
29. Morillo, V. (2017). "Determination of the maximum mechanical load that supports the cranks of the engine of a truck MAZDA BT-50 Diesel by means of static tests of experimental efforts and by finite elements" Ibarra: Technical University of the North. (pp. 5, 6 and 7)
30. Murillo, F. (2018). "Analysis using finite elements of the behavior of combined profiles of bus structures" Madrid, Spain: Polytechnic University of Madrid UPM (p. 138)
31. Pasquel, S. and Quirola, M., (2018), "Structural analysis of the fairing frame for the implementation of the mechanical systems of an electric Chopper motorcycle", Ecuador: Polytechnic School of the Army (pp. 90 - 95)
32. Peña (2013), Optimization of design of aluminum wheels with bending using the finite element method, SCIELO, (pp. 108-115)
33. Pozo, J., (2014), "Proposal for Analysis and Design Procedures for Bus Superstructures", Mexico City, Mexico: National Autonomous University of Mexico.
34. Rocha-Hoyos, J.C .; Llanes-Cedeño, E. A; Celi-Ortega, S .; and Peralta-Zurita, D., (2019) Effect of the Biodiesel Mix on the Performance and Opacity of the Diesel Engine, Inf. Tecnol. 30 (3)
35. Samaniego, G., (2018). "Design and manufacture of a spoiler for automotive application with polyester matrix composite material with fiberglass reinforcement through CAD / CAE / CAM". Ecuador. University of the Armed Forces (pp. 24-33)
36. Sánchez, Reyes & Vásquez; (2015) "Determination of efforts between two pieces in contact using the Finite Element Method" Mexico, Scientific Journal.
37. Santos, L .; (2017), "Simulation by the method of the finite elements of the frontal impact of an interprovincial bus of national manufacture, to propose the modification of the NTE INEN 1323: 2009 ECUADORIAN TECHNICAL STANDARD," Sangolquí, Ecuador: University of the Beloved Forces ESPE (p. 72)

38. Suntaxi, V., (2018). "Analysis and improvement of structural elements of the front suspension system of a truck tract using CAD / CAE tools". Ecuador. Polytechnic School of the Army (p. 33)
39. Vázquez, V., (2014), "Conceptual design of an automotive sub-chassis through topological structural optimization", Mexico City, Mexico: National Autonomous University of Mexico.
40. Vega, W.H., E.A. Llanes-Cedeño, J.V. Molina and J.C. Rocha-Hoyos, (2018) Review of Modeling and Optimization Features for the Design of the Macpherson Suspension System, *Inf. Tecnol.*, 29 (6), 221-233

Referências

1. Alvarado, P. e Carrera, J. (2015). "A homologação de ônibus de transporte urbano, procedimentos de regulamentação técnica e sua influência na segurança". Quito, Equador: San Francisco University of Quito. (pp. 28, 29 e 30)
2. Arroba, C., (2013). Estudo do comportamento mecânico de uma seção da superestrutura da marca interprovincial de ônibus MIRAL Infiniti em um chassi Hino Ak em despejo, utilizando os programas Ansys Ls-Dyna e seu impacto no espaço de sobrevivência ". Ambato, Equador: Universidade Técnica de Ambato. (pp. 21-25)
3. Aviles, R. (2017). "Estudo do impacto lateral do ônibus urbano com carroceria IMPA para determinar a configuração da estrutura que está em conformidade com os regulamentos do Regulamento UNECE R095R02" Ambato, Equador: Universidade Técnica de Ambato (p. 30)
4. Badea, F., (2014). "Métodos numéricos e estatísticos de caracterização de juntas tubulares soldadas para aplicação em modelos finitos de estruturas de veículos". Argentina: Escola Técnica Superior de Engenheiros Industriais. (pp. 28, 29 e 30)
5. Badea, Alcalá, Grimaldi, Ogando, Aparicio; (2015), Otimização de sindicatos e estruturas de ônibus, Espanha: Associação Espanhola de Engenharia Mecânica. (pp. 3 e 4)
6. Belhocine, A e Afzal, A; (2019). "Análise FEA da resposta termomecânica acoplada do material de ferro fundido cinza usado nos discos de freio", *REVISTA CIENTIFICA, SCIELO*, (pp. 280-196)

7. Beltrán, C. e Garrido, J.; (2017), “Análise estrutural e otimização aerodinâmica do corpo de um modelo de ônibus interprovincial GR da empresa OLÍMPICA QUITO” Equador: Universidade das Forças Armadas ESPE. (pp. 159 e 160)
8. CANFAC; (2014), “RELATÓRIO DE DIAGNÓSTICO DO SETOR ORDINÁRIO” Ambato, Equador: CÂMARA NACIONAL DE FABRICANTES DE CARROÇARIA.
9. Carbajo, J. e García, F.; (2014), “Análise Modal de um Ônibus” Pamplona, Espanha: Universidade Pública de Navarra. (p. 146)
10. Cárdenas, D.; Escudero J. & Quizhpi, K. (2014). “Proposta de projeto de estrutura estrutural para ônibus de serviço interprovinciais”, Equador: Universidade Politécnica Salesiana, sede de Cuenca. (p. 46-48)
11. Cárdenas J. e Teixeira J (2017). “Parafuso e parafuso intrapedicular. Análise de elementos finitos. ” Revista Redalyc.org
12. Cháfuel, V. (2017). "Análise estrutural pelo método dos elementos finitos de um corpo de ônibus interprovincial com base em simulação virtual de impacto frontal e posterior para verificar materiais e geometrias de construção". Equador: Escola Politécnica do Exército (p. 41, 42 e 43).
13. Chagoyén, C; Álvarez, C; Brito, Y; Moya, J; Chagoyén, E (2013). "Comportamento estático e modal do chassi de um barramento modernizado". IM. Engenharia Mecânica. SCIELO.
14. Corral, T. (2015). "Estudo teórico-experimental para a melhoria da resistência estrutural de ônibus com base no projeto de juntas e assentos" Espanha: Universidade Politécnica de Madri. (pp. 59 e 60)
15. Donaire, J., (2016), “Comparação de modelos de simulação de substituição de ônibus de acordo com os procedimentos da regra 66”, Espanha: Universidade Politécnica de Madri.
16. Enriquez, M. (2017). "Projeto e análise estrutural do chassi, pelo método dos elementos finitos de um transporte híbrido elétrico de dois lugares, que transportará uma pessoa com deficiência em cadeira de rodas, operando através de células de combustível poliméricas" México: Instituto Politécnico Nacional, Escola Superior de Engenharia Mecânica e Elétrica Unidade de pós-graduação e pesquisa "Adolfo López Mateos". (pp. 34-38)
17. Esmeraldas, C. (2016). “Análise estrutural baseada em simulação pelo método dos elementos finitos de uma carroceria interprovincial submetida a teste de impacto lateral

- para determinar a geometria e os materiais aplicáveis que garantem a segurança dos passageiros”, Equador: Escola Politécnica do Exército.
18. Frías, E. (2004). “Contribuições para o estudo de máquinas elétricas de fluxo axial, através da aplicação do método dos elementos finitos” Barcelona, Espanha: UPC - Departamento de Engenharia Elétrica (p. 111-144)
 19. Garza, R., (2013). "Proposta para reduzir o peso estrutural de ônibus usando ferramentas de elementos finitos", México: Universidade Nacional Autônoma do México.
 20. Gómez, P. (2018). “Análise, projeto e simulação do comportamento mecânico de um motor assíncrono trifásico, usando o método dos elementos finitos”, Cuenca, Equador: Universidade Politécnica Salesiana. (pp. 75-86)
 21. González, M.; (2013), “Análise estrutural de um ônibus contínuo de piso baixo”, Cidade do México, México: Instituto Politécnico Nacional do Centro de Pesquisa e Inovação Tecnológica (p. 106)
 22. Guamán, E., E.A. Llanes-Cedeño, S. Celi e J.C. Rocha-Hoyos, (2019) Parâmetros do coletor de escape para seu projeto computacional: uma revisão, *Inf. Tecnol.*, 30 (6), 255-268
 23. Hernández, J. (2016). “Análise estrutural baseada em simulação pelo método dos elementos finitos de um corpo de ônibus interprovincial submetido a um teste de inversão para determinar a geometria e os materiais aplicáveis que garantem a segurança dos passageiros”, Equador: Escola Politécnica do Exército (página 3 e 4)
 24. Hidalgo, D. (2013), “Estudo estrutural do ônibus urbano de baixa entrada de acordo com o PADRÃO TÉCNICO INU 1323 ECUADORIAN para aumentar a competitividade da empresa PICOSA, Ambato, Equador: Universidade Técnica de Ambato.
 25. INEN NTE 1323, (2009). “Veículos automotivos, carrocerias de ônibus. Requisitos” Quito, Equador: Instituto Equatoriano de Normalização. (pp. 2-8)
 26. López, L., (2015). “Análise da estrutura do chassi HINO AK8JRSA e seu impacto no comportamento mecânico geral do barramento interprovincial na Indústria Metalúrgica CEPEDA (IMCE), Ambato, Equador: Universidade Técnica de Ambato. (pp. 12 e 13)
 27. Manjarrés, F. e Santillán, E., (2016), “Análise Estrutural de Cargas de Impacto Frontal de um Ônibus Tipo Provincial usando o Método dos Elementos Finitos”, Quito, Equador: Escola Politécnica Nacional. (p. 13, 14).

28. Militello, C. e Guadalupe, V.; (2013). "Modelagem mecânica de elementos estruturais", Tenerife, Espanha: Universidad de la Laguna. (p. 5)
29. Morillo, V. (2017). "Determinação da carga mecânica máxima que suporta as manivelas do motor de um caminhão MAZDA BT-50 Diesel por meio de testes estáticos de esforços experimentais e por elementos finitos" Ibarra: Universidade Técnica do Norte. (pp. 5, 6 e 7)
30. Murillo, F. (2018). "Análise usando elementos finitos do comportamento de perfis combinados de estruturas de ônibus" Madri, Espanha: Universidade Politécnica de Madri UPM (p. 138)
31. Pasquel, S. e Quirola, M., (2018), "Análise estrutural da estrutura de carenagem para a implementação dos sistemas mecânicos de uma motocicleta Chopper elétrica", Equador: Escola Politécnica do Exército (pp. 90 - 95)
32. Peña (2013), Otimização do projeto de rodas de alumínio com flexão usando o método dos elementos finitos, SCIELO, (pp. 108-115)
33. Pozo, J., (2014), "Proposta de procedimentos de análise e projeto para superestruturas de ônibus", Cidade do México, México: Universidade Nacional Autônoma do México.
34. Rocha-Hoyos, J.C .; Llanes-Cedeño, E. A; Celi-Ortega, S.; e Peralta-Zurita, D., (2019) Efeito da mistura de biodiesel no desempenho e na opacidade do motor a diesel, Inf. Technol. 30 (3)
35. Samaniego, G., (2018). "Projeto e fabricação de um spoiler para aplicação automotiva com material compósito com matriz de poliéster com reforço de fibra de vidro através de CAD / CAE / CAM". Equador Universidade das Forças Armadas (pp. 24-33)
36. Sánchez, Reyes e Vásquez; (2015) "Determinação de esforços entre duas peças em contato usando o método dos elementos finitos" Mexico, Scientific Journal.
37. Santos, L.; (2017), "Simulação pelo método de elementos finitos do impacto frontal de um ônibus interprovincial de fabricação nacional, para propor a modificação do NTE INEN 1323: 2009 NORMAL TÉCNICO EQUADOR", Sangolquí, Equador: University of the Beloved Forces ESPE (p. 72)
38. Suntaxi, V., (2018). "Análise e aprimoramento de elementos estruturais do sistema de suspensão dianteira de um caminhão com ferramentas CAD / CAE". Equador Escola Politécnica do Exército (p. 33)

39. Vázquez, V., (2014), “Projeto conceitual de um sub-chassi automotivo através da otimização estrutural topológica”, Cidade do México, México: Universidade Nacional Autônoma do México.
40. Vega, W.H., E.A. Llanes-Cedeño, J.V. Molina e J.C. Rocha-Hoyos, (2018) Revisão dos Recursos de Modelagem e Otimização para o Projeto do Sistema de Suspensão Macpherson, Inf. Technol., 29 (6), 221-233

©2019 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).