



Análisis Estructural en vehículos eléctricos de categoría L7E

Structural Analysis in electric vehicles of category L7E

Análise estrutural em veículos elétricos da categoria L7E

Guillermo Gorky Reyes-Campaña^I
gureyesca@uide.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7133-9509>

Valentina Mikaela Torres-Muñoz^{III}
vatorresmu@uide.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4834-0034>

Jorge Luis Cepeda-Miranda^{II}
jocepedami@uide.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6880-2515>

Kevin Iván Carrillo-Albán^{IV}
kecarrilloal@uide.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8221-1386>

Correspondencia: gureyesca@uide.edu.ec

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

***Recibido:** 10 de abril de 2021 ***Aceptado:** 03 de mayo de 2021 * **Publicado:** 01 de junio de 2021

- I. Ingeniero Mecánico Especialidad Automotriz, Magíster Sistemas Automotrices, Coordinador Investigación EIA Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador.
- II. Ingeniero Mecánico, Magister en Ingeniería Automotriz, Magister en Administración de Empresas, Docente Universidad Internacional del Ecuador, Ambato, Ecuador.
- III. Estudiante Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador.
- IV. Estudiante Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador.

Resumen

En el Ecuador existen vehículos L7e de distintas procedencias, los más comunes europeos y chinos, a los cuales se realizó el análisis estructural de su diseño, ya que representan una gran alternativa de movilidad urbana; se investigó acerca de las normativas de seguridad, criterios de diseño y fabricación para los vehículos mencionados. Se comparó las diferentes variables en condiciones estáticas. Se desarrolló las simulaciones con ingeniería asistida por computador, se colocó diferentes tipos de carga para simular las fuerzas ocurridas durante todo el trabajo de los vehículos, en donde se compara la deformación unitaria, el desplazamiento y la tensión de Von Mises. Para el cálculo de las fuerzas obtenidas los vehículos se rigen a la Normativa NTE INEN 1323 Requisitos de Vehículos automotores. Se estudió el comportamiento de los materiales en función de condiciones externas a las que las estructuras están sometidas, para determinar su resistencia en los peores escenarios estáticos. En la prueba de torsión ambos vehículos superan el límite de fluencia con 334 MPa y 223 MPa, con un factor de seguridad bajo de 0,38 y 0,47 para el vehículo europeo y chino respectivamente, siendo esta prueba la más drástica para la estructura; concluyendo que sobrepasan incluso el límite de resistencia a la tracción, lo que significa que el material ya daría origen a una rotura; por tal motivo se presentó varias opciones de aceros de alta resistencia con un factor de seguridad mayor de 1,50; conociendo que el estudio no hace referencia al sistema de suspensión.

Palabras clave: Vehículos L7e; normativas de seguridad; diseño estructural; fuerzas.

Abstract

In Ecuador there are L7e vehicles from different countries, the most common are European and Chinese, that carried out the structural analysis of its design, as they represent a great alternative of urban mobility; research was made on safety regulations, design and manufacturing criteria for the vehicles mentioned. Different variables were compared under static conditions. Simulations were developed for computer-aided engineered vehicles, different types of loads were placed to simulate the forces that occurred throughout the work of the vehicles, comparing von Mises' strain, displacement and stress. For the calculation of the forces obtained the vehicles are governed by the NTE INEN 1323 Automotive Vehicle Requirements Regulations. The behavior of the materials was studied according to external conditions to which the structures are subjected, to determine their resistance in the worst scenarios. In the torsion test, both vehicles exceed the yield point with 334

MPa and 223 MPa, an extremely low with a security factor of 0.38 and 0.47 for the European and Chinese vehicle respectively, this test being the most drastic for the structure; concluding that they even exceed the limit of tensile strength, which means that the material would already give rise to a break; For this reason, several options for high-strength steels with a safety factor greater than 1.50 were presented; knowing that the study does not refer to the suspension system.

Keywords: L7e vehicles; safety regulations; structural design; forces.

Resumo

No Equador existem veículos L7e de diferentes origens, os mais comuns europeus e chineses, aos quais foi realizada a análise estrutural de seu projeto, já que representam uma ótima alternativa para a mobilidade urbana; Foram investigados os regulamentos de segurança, critérios de design e fabricação dos veículos mencionados. As diferentes variáveis foram comparadas em condições estáticas. As simulações foram desenvolvidas com engenharia auxiliada por computador, diferentes tipos de carga foram colocados para simular as forças que ocorreram durante todo o trabalho dos veículos, onde foram comparadas a deformação da unidade, deslocamento e tensão de Von Mises. Para o cálculo das forças obtidas, os veículos são regidos pelo Regulamento NTE INEN 1323, Requisitos para Veículos Automóveis. O comportamento dos materiais foi estudado em função das condições externas a que as estruturas estão submetidas, para determinar a sua resistência nos piores cenários estáticos. No ensaio de torção, ambos os veículos ultrapassaram o limite de elasticidade com 334 MPa e 223 MPa, com um baixo fator de segurança de 0,38 e 0,47 para o veículo europeu e chinês, respetivamente, sendo este o ensaio o mais drástico para a estrutura. concluindo que até ultrapassam o limite de resistência à tração, o que significa que o material já daria lugar a uma ruptura; Por esse motivo, foram apresentadas várias opções de aços de alta resistência com fator de segurança superior a 1,50; sabendo que o estudo não se refere ao sistema de suspensão.

Palavras-chave: veículos L7e; regulamentos de segurança; projeto estrutural; forças.

Introducción

Con la venta excesiva de autos, surge la necesidad de buscar soluciones al problema del tráfico y la contaminación ambiental, lo que ha llevado a que el parque automotor se desarrolle en función de la búsqueda de nuevas fuentes de movilidad y energía, varias marcas fabrican vehículos que se adaptan a las vías teniendo como alternativa los vehículos eléctricos, entre estos los vehículos L7e, también

llamados cuadriciclos ligeros que son una buena opción para movilizarse en distancias cortas, son sencillos, fáciles de manejar, versátiles y económicos (Capellan, 2017).

Existen agencias de control donde se está buscando alternativas en sus equipamientos para mejorar sus sistemas y determinar su calidad. En el Ecuador se observa circulando algunos de estos cuadriciclos de diferentes procedencias, entre los más comunes europeos y chinos a los cuales se realizó el análisis estructural con distintos casos de carga.

Se investigó acerca de las normativas y regulaciones de fabricación, los requisitos y criterios de diseño. Se analizó estructuralmente el chasis del vehículo, mediante softwares de ingeniería asistida por computador para evaluar la tensión Von Mises, el desplazamiento y la deformación unitaria; con estos resultados determinar el límite de fluencia de la estructura y su factor de seguridad. Se realizó un estudio de las características mecánicas de los vehículos eléctricos ofertados en el Ecuador, comparando las diferentes variables en condiciones estáticas en relación al cálculo estructural y a las normativas de los vehículos eléctricos.

Las principales características de los vehículos L7e eléctricos con un tamaño de hasta 2.5 metros de longitud y uso mayormente en ambientes urbanos. Compuestos principalmente de una carrocería ligera con aleaciones de acero, aluminio, fibra de carbón o fibra de vidrio y velocidades que no superan los 70km/h (Pellicer, 1997).

Más del 90% de la demanda de energía a nivel mundial se cubre con recursos derivados del petróleo sin embargo hoy en día los vehículos eléctricos están en auge como alternativa para emitir menos contaminación que los vehículos de combustión interna. (Condor Romero, 2019). Lo que significa que estos vehículos son una buena opción de movilidad para quienes buscan distintas alternativas al motor de combustión y que se preocupan por el medio ambiente.

Un artículo relacionado con la movilidad urbana de los vehículos eléctricos indica que el comportamiento de las personas al momento de comprar un vehículo eléctrico es impulsado por la innovación de la tecnología que está detrás de un vehículo eléctrico (Bobeth & Kastner, 2019).

Este artículo se basa en los sistemas de seguridad vehículos L7e mas no los sistemas de confort y actualización a nuevas tecnologías de estos.

Otro estudio indica que un grupo mayoritario de personas en Italia se ven atraídos por el rendimiento de los vehículos eléctricos, por tal motivo será importante la autonomía de un vehículo con respecto a otro para la elección de su compra (Dianelis , Rotaris, & Giansoldati, 2020).

Las normativas de seguridad son leyes elaboradas por expertos en el campo y son aprobadas por los gobiernos y parlamentos de cada país. Las normativas son de cumplimiento obligatorio y a partir de estas se cumplirá por cada fabricante para cada país (Doblado & Marin, 2017). Uno de los objetivos de este artículo es llegar a los departamentos encargados de la homologación de los vehículos eléctricos L7e cumplan con normativas básicas de seguridad activa y pasiva al momento de un accidente.

Para el cumplimiento del estudio se trabajará con un método de investigación exploratorio y experimental, se realizará simulaciones virtuales de pruebas de análisis estructural entre los cuadríciclos estudiados, para comparar sus resultados y examinar su diseño.

Metodología

El presente estudio tuvo un enfoque cuantitativo donde se implementó un método de investigación exploratorio – experimental, para la comparación de las diferentes variables en condiciones estáticas en relación al análisis estructural. El método de investigación exploratorio plantea la búsqueda de una problemática, que beneficie la búsqueda y entendimiento de nuevos conceptos, soluciones y alternativas. Se estudia las variables y factores que ocasionan un fenómeno. (Abreu, 2012)

Para el desarrollo del diseño de los modelos estudiados se utilizó el método experimental tomando en cuenta los cálculos y valores que determinan las normativas. Esta metodología extiende competencias y habilidades para encontrar soluciones, donde se analicen los procedimientos de la fabricación de los vehículos. (Dumon, 1992)

Vehículo

Para las simulaciones se experimentó con dos cuadríciclos eléctricos, el primero de procedencia francesa, por ser uno de los cuadríciclos más vendidos a nivel mundial y el segundo uno de procedencia china, ya que al tener un precio bastante accesible es una alternativa para los conductores.

Tabla 1: Características de los vehículos L7e.

Características	M1	M2
Motor	4/8 kW	4,5 kW
Torque Max	57@2100 rpm	Indefinido
Potencia Max	13@7250 rpm	1,3 kW
Peso	6768,9N	7602,75N

Peso en vacío	375 kg	320kg
Velocidad Max	80 km/h	50 km/h
Autonomía	60 a 70 km	100km
Seguridad	-Chasis tubular -Airbag. -Freno de disco. -Suspensión independiente. -Cinturones seguridad. -Freno de emergencia.	-Chasis tubular -Cinturones de seguridad. -Frenos de disco.

Fuente: Autores, 2021

El primero es un vehículo eléctrico biplaza, existe en dos versiones, uno posee un motor de 4 kW y el otro de 8KW, con una Potencia Máxima kW CEE (cv) 13(17) @7250 rpm y un Torque Máximo Nm CEE 57@2100 rpm, dispone de una caja automática con una velocidad, tiene una autonomía real de 60 a 70 km. (Macció, 2018)

Figura 1: Vehículo Europeo



Fuente: (Lojacar)

El segundo es un vehículo eléctrico biplaza, posee un motor de 4,5 kW con una Potencia Máxima 1,3 kW y con un tiempo de carga de 220/8 horas, cuenta con una caja automática. Tiene una autonomía real de 75km dependiendo las variables del terreno (intercar, 2019)

Figura 2: Vehículo Chino



Fuente: (intercar, 2019)

Se desarrolló el análisis de los vehículos seleccionados ya que, al ser eléctricos, de fácil manejo y de un precio accesible para el público son una alternativa distinta que beneficia al tráfico y al ahorro de combustible. (Capellan, 2017)

Altair SimSolid

Se utilizó un software de ingeniería asistida por computador que simula y verifica como actúa cada elemento analizado de manera estática y dinámica, se obtiene la información necesaria sobre variables de análisis como, temperatura, fuerzas, presión, etc., y elimina la elaboración del mallado, teniendo una gran ventaja sobre otros softwares de elementos finitos, con resultados reales y en un tiempo casi inmediato. La ingeniería asistida por computador evita la instrumentación de las estructuras con galgas extensiométricas para la obtención de información de esfuerzos y reacciones en presencia de cargas. (Altair Engineering, 2021)

Normativa Construcción L7E

Según establece el Reglamento (Ue) No 168/2013 Del Parlamento Europeo Y Del Consejo, es obligación de los fabricantes asegurarse de que, cuando sus vehículos sean introducidos en el mercado, estén fabricados y homologados. Los fabricantes diseñan sus vehículos con el fin de disminuir el riesgo de lesiones de los ocupantes de vehículos, asegurando que tengan la misma durabilidad. Garantizarán que los vehículos cumplen los requisitos establecidos al igual que los procedimientos de ensayo y los requisitos de funcionamiento. (REGLAMENTO (UE) No 168/2013 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativo a la homologación de los vehículos de dos o tres ruedas y los cuatriciclos, y a la vigilancia, 2013)

NTE INEN 1323 Primera revisión Vehículos Automotores. Carrocerías De Buses. Requisitos.

Indica los requisitos para el diseño, fabricación y montaje de carrocerías en el Ecuador; establece los criterios y parámetros para el cálculo de las cargas vivas, muertas, de resistencia del aire frontal, de giro, frenado y aceleración, los cálculos realizados que se indican a continuación están basados en esta normativa, para con estos valores efectuar las simulaciones respectivas. (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2009)

Resultados y discusión

Para la elaboración de tablas y gráficas se identifica los términos V1 y V2 correspondientes al vehículo europeo y vehículo chino.

Tabla 2: Datos de entrada

	V1	V2
Velocidad	13,88 m/s	13,88 m/s
Masa	131,833 kg	137,936 kg
Volumen	0,0167941 m ³	0,0175702 m ³
Densidad	7.850 kg/m ³	7.850,55 kg/m ³
Peso	1.291,97 N	1.351,77 N
Material	Acero	Acero
Tipo de malla	Malla sólida	Malla sólida

Fuente: Autores, 2021

Casos de Cargas

Cargas muertas y vivas

El primer análisis de cargas viene dado por el peso bruto de los vehículos, se denomina cargas muertas al total de la masa del chasis, carrocería, sistemas y componentes del automóvil y las cargas vivas se refieren al peso de los ocupantes; la normativa NTE INEN 1323:2009 establece que cada ocupante posee una masa de 70 kg. Para los cálculos respectivos se ha tomado en cuenta este valor. (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2009)

Tabla 3: Cargas Peso Total

	V1	V2
Muerta	690 kg	775 kg
Muerta	6768,9 N	7602,75 N
Viva	140 kg	280 kg
Viva	1373,4 N	2746,8 N
Peso Total	8142,3 N	10349,55 N

Fuente: Autores, 2021

Se propuso realizar los cálculos exponiendo a los vehículos a su máxima carga por lo cual en el caso del V1 como carga viva tiene una masa de 140 kg debido a que se asume la masa de dos ocupantes; en el caso del V2 la masa de 280 kg corresponde a cuatro ocupantes.

Cargas aerodinámicas

Las cargas aerodinámicas vienen dadas por la fuerza que ejerce el viento en un área transversal, en este caso del vehículo en movimiento (Cepeda, 2006). Para el análisis de cargas aerodinámicas se propone la siguiente ecuación:

[Ec. 1]

$$D = C_D \cdot \rho \cdot a_f \left(\frac{V_t}{3,6} \right)^2$$

Donde:

D = Fuerza de Resistencia del viento. (N)

C_D = Coeficiente de Resistencia al avance.

ρ = Densidad del aire. (kg/m³)

a_f = Área frontal del vehículo. (m²)

V_t = Velocidad. (km/h)

El coeficiente de resistencia aerodinámico al avance para un automóvil convencional es de 0,52. La densidad del aire en la ciudad de Quito es de 1,225 kg/m³ (Cepeda, 2006), y la velocidad propuesta en el cálculo es de 50 km/h ya que es el límite de velocidad máximo en la ciudad de Quito. El vehículo europeo posee una versión con un motor de 4,5 kW que alcanza los 45 km/h sin embargo, para los cálculos se analizó únicamente la versión de motor 8 kW.

El área frontal en la sección transversal de los vehículos se obtuvo a partir de los diseños en el software de Inspire Estudio de Altair Estudios midiendo en perfil frontal.

Tabla 4: Cargas Aerodinámicas

	V1	V2
C_D	0,52	0,52
ρ	1,225 kg/m ³	1,225 kg/m ³
a_f	1,50 m ²	1,85 m ²
V	50 km/h	50 km/h
V	13,88 m/s	13,88 m/s
D	184,32 N	227,32 N

Fuente: Autores, 2021

La tabla 4. evidencia los resultados de la ecuación de la carga de resistencia del viento para ambos vehículos y sus datos respectivos.

Carga de giro

Las cargas de giro se originan por las fuerzas centrífugas en el centro de gravedad al momento del vehículo entrar a una curva, (Cepeda, 2006) para obtener los resultados se aplica la siguiente ecuación:

[Ec. 2]

$$F_g = M * \frac{V^2}{r}$$

Donde:

F_g = Fuerza de Giro. (N)

M = Masa de la estructura (kg).

V^2 = Velocidad al cuadrado (m/s)

r = Radio mínimo

Según la Orden FOM/273/2016, por la que se aprueba la Norma 3.1- IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras, tabla 4.4, citada en la NTE INEN 1323:2009; establece que el radio mínimo para una velocidad de 40 km/h será de 50 m. (BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, 2016)

Tabla 5: Fuerza de Giro

	V1	V2
M	850 kg	1095 kg
V	13,88 m/s	13,88 m/s
r	50 m	50 m
F_g	3275.124N	4219.131N

Fuente: Autores, 2021

La tabla 5. indica los valores de la fuerza de giro que se aplicó a los vehículos en la simulación.

Carga de frenado brusco

Todos los vehículos están sometidos a una carga de frenado, que será opuesta a la dirección del movimiento del mismo. (Cepeda, 2006)

Para determinar el valor del frenado se utilizó la siguiente ecuación:

[Ec. 3]

$$a_{Frenado} = \frac{v - v_f}{t}$$

Donde:

$a_{frenado}$ = frenado(N)

V = Velocidad inicial (m/s).

V_f = Velocidad final (m/s).

t = Tiempo (s).

Tabla 6: Cargas de Frenado Violento

	V1	V2
V_0	0	0
V_f	13,88 m/s	13,88 m/s
t	7,3 seg	8,5 seg
$a_{Frenado}$	1,90 m/s ²	1,63 m/s ²

Fuente: Autores, 2021

La fuerza de frenado será el producto de la suma de cargas vivas y muertas por el valor de la afrenado obtenido de la ecuación anterior. La NTE INEN 1323:2009 asume que la carga de frenado para buses debe ser mayor o igual a 4 m/s² según los ensayos de frenado y rendimiento de los dispositivos de frenado de la Directiva 98/12/Ce De La Comisión Europea (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2009), en este caso el valor de la carga de frenado será menor a 4 debido a que la prueba se realiza a 50 km/h.

[Ec. 4]

$$f_r = M \cdot a_{Frenado}$$

Donde:

f_r = **Fuerza** de frenado(N)

M = Masa (kg).

$a_{frenado}$ = frenado.

Tabla 7: Fuerza de Frenado

	V1	V2
Muerta	690 kg	775 kg
Viva	140 kg	280 kg
$a_{Frenado}$	1,90 m/s ²	1,63 m/s ²
f_r	1615 N	1784,85 N

Fuente: Autores, 2021

La tabla 7. indica la fuerza de frenado resultante de la ecuación prescrita anteriormente.

Carga De Aceleración Brusca

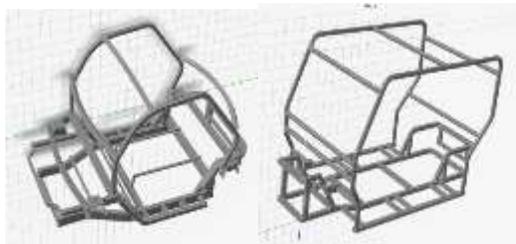
El caso de carga de Aceleración violenta se realiza del mismo modo que el de carga de frenado, la diferencia se encuentra en que en la aceleración la fuerza que experimenta el vehículo se dirige en la misma dirección que el del movimiento de este. (Cepeda, 2006)

Modelos a evaluar

Se efectuó el diseño de los vehículos eléctricos de categoría L7e, el primero el vehículo europeo y el segundo el vehículo chino.

Previo al dibujo se tomó medidas del chasis tubular de los vehículos reales; seguido se realizó la geometría de los modelos de los vehículos en SolidWorks, y las simulaciones en el software SimSolid de Altair, en donde se asignó el material y las soldaduras para ambos vehículos.

Figura 3: Diseño modelo europeo/ modelo chino



Fuente: Autores

Proceso de Simulación

Se analizó el comportamiento de los materiales, se colocó restricciones y cargas a los modelos puestos a prueba en el simulador SimSolid, el análisis se enfoca en el esfuerzo de Von Mises, el desplazamiento y la deformación unitaria; en los siguientes casos de carga; muertas, vivas, de frenado, aceleración, giro y torsión. Existe un código de colores que indica los valores mínimos y máximos de tensión, desplazamiento y deformación siendo los tonos rojizos las zonas más afectadas. Al no tener un registro oficial del material específico utilizado para la construcción del chasis tubular por los fabricantes respectivos, en el software se realizó el análisis de ambos vehículos con el acero estándar del software, cuyo límite de fluencia es de 205 MPa.

Análisis Von Mises

Von Mises analiza la distribución de esfuerzos en una estructura para determinar si el material utilizado es el adecuado y si el diseño es óptimo. (Márquez, 2014)

Tabla 8: Datos del material empleado

MATERIAL: ACERO		
Módulo de elasticidad	2,00E+11	MPa
Coefficiente de poisson	0,29	
Densidad	7,82E+03	kg/m ³
Coef. de dilatación térmica	1,15E-05	C
Conductividad térmica	5,00E+01	W/m*k
Resistencia a la Tracción	3,80E+02	MPa
Límite de fluencia por tracción	2,05E+02	MPa
Límite de fluencia por compresión	2,05E+02	MPa

Fuente: Autores

Cargas Muertas

El valor máximo de tensión Von Mises en el V1 es 1,10E+02 MPa; en el V2 es de 2,69E+02 MPa siendo esta una tensión mayor debido a que la carrocería del V2 es 85 kg mayor a la del V1, sin embargo, el V2 tiene un mayor ancho y largo lo que permite soportar mayor peso. (Fig. 7).

Cargas Vivas

Al igual que en el caso anterior el V2 al tener mayor dimensión posee disponibilidad de asientos para 4 ocupantes, al contrario del V1 que dispone asientos para 2 ocupantes únicamente, por esta razón en las cargas vivas el valor máximo del V1 es de 1,10E+02 MPa y el V2 de 1,44E+02 MPa. (Fig. 8).

Cargas Aerodinámicas

Debido a que las cargas Aerodinámicas se refieren a la fuerza de la resistencia del viento a la que está sometida un vehículo en movimiento en toda su área frontal, se observa que el V1 soporta una tensión máxima de 8,16E+00 MPa en la soldadura de los pilares delanteros con la consola para resortes y el travesaño, ya que por delante se encuentra el parabrisas siendo esta el área más resistencia. El V2 al tener su estructura cuadrangular la zona que ejerce mayor resistencia es en el pilar trasero con la base del larguero posterior y donde se percibe una tensión máxima de 5,17E+00 MPa. (Fig. 9).

Cargas de Giro

Se estudia las cargas de giro, que se generan cuando el vehículo ingresa a una curva y se enfrenta a una fuerza centrífuga, estas cargas empujan a los pilares de ambos lados de la estructura en una misma dirección; en esta prueba la carga de la simulación se realizó por el lado derecho hacia el izquierdo de la estructura, como referencia, desde el código de colores con los valores resultantes hacia adentro. El V1 tiene una tensión máxima de $1,53E+02$ MPa en la misma zona de la unión del pilar delantero con la consola de la suspensión y el travesaño y el V2 tiene una tensión máxima de $1,21E+02$ MPa en los largueros traseros a razón del desplazamiento en dirección a la fuerza. (Fig. 10).

Carga de Frenado

En el caso del análisis de frenado brusco las cargas se producen en los pilares verticales desde atrás hacia adelante por la inercia, en ambos vehículos la tensión máxima se encuentra en la zona delantera, ya que es la que absorbe la fuerza, el V1 posee una tensión máxima de $3,11E+01$ MPa y el V2 de $5,02E+01$ MPa. (Fig. 11).

Cargas de Aceleración

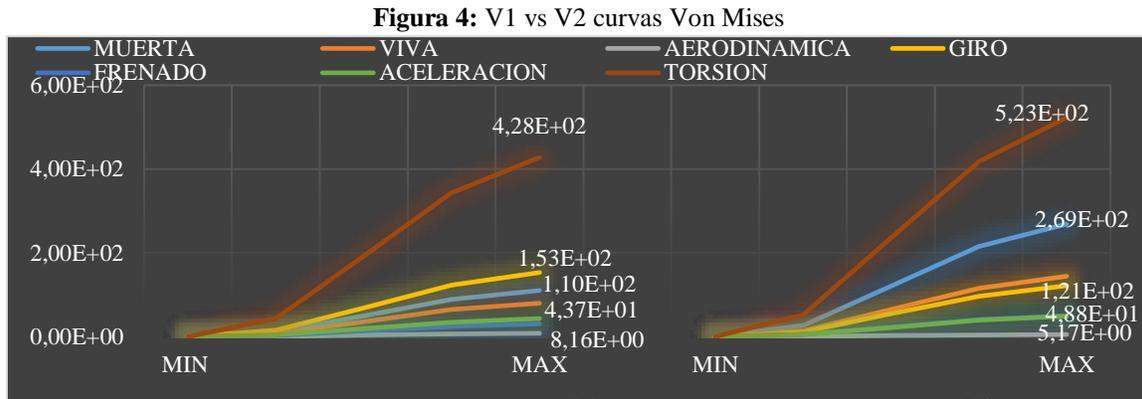
El análisis de carga de Aceleración brusca tiene el mismo principio que el de frenado, variando la dirección de la fuerza, ya que en la aceleración las cargas se producen de adelante hacia atrás. El máximo valor de tensión del V1 es de $4,37E+01$ MPa en el travesaño de soporte superior delantero ya que los pilares se desplazan en reverso y afecta a la soldadura de esta zona, y el V2 tiene una tensión máxima de $4,88E+01$ MPa en los largueros traseros puesto que su estructura también un posee un desplazamiento hacia atrás. En ambos análisis el peso del vehículo y los pasajeros incide en que el V2 posea mayores tensiones. (Fig. 12).

Cargas de Torsión

El análisis de Torsión se efectuó al colocar las cargas vivas y muertas y al retirar las restricciones del lado derecho para simular que el vehículo se desplaza sobre alguna irregularidad. El V1 obtuvo una tensión máxima de $5,39E+02$ MPa en la consola de la suspensión y el travesaño delantero del lado

opuesto, dado que este efecto trata de torcer la estructura. De igual manera el V2 consigue la máxima tensión en los largueros opuestos con un valor de $5,23E+02$ MPa. (Fig. 13).

La siguiente grafica indica las curvas de cada caso de carga estudiados en el análisis de tensión de Von Mises para los dos vehículos.



Fuente: Autores, 2021

Se observa que las tensiones Von Mises del V2 son más altas que las del V1 teniendo en cuenta que el peso total es mayor, las curvas tienen un mayor crecimiento, a excepción de la carga aerodinámica y de giro que el V1 sobrepasa al V2 por su diseño más compacto; los valores generales de los casos de carga se encuentran en la tabla 9.

Análisis de Desplazamiento

En el análisis de desplazamiento se estudió la deflexión de las estructuras, cabe recalcar que el desplazamiento es casi imperceptible en situaciones reales, sin embargo, la simulación realiza el desplazamiento con el grado de movimiento a elección del usuario para enfatizar el análisis.

Carga Muerta

La zona con mayor movimiento es la base del bastidor donde se aplica la fuerza, el V1 posee un desplazamiento de $1,57E+04$ mm en los largueros auxiliares centrales que se encuentran sobre los travesaños centrales del bastidor, el V2 tiene un desplazamiento de $1,10E+04$ mm en los largueros centrales dado que recae todo el peso de la estructura, carrocería, sistemas y elementos del vehículo. (Fig. 14).

Carga Viva

Se observa que el comportamiento de la estructura es similar que en el de las cargas vivas, pero las cargas vivas solo se aplican donde se sitúan los pasajeros, el V1 tiene un desplazamiento de $1,14E+04$ MPa y el V2 de $4,05E+03$ MPa. (Fig. 15).

Carga Aerodinámica

El desplazamiento demuestra el movimiento en las zonas más críticas para este factor de resistencia del viento, en el caso del V1 su mayor desplazamiento se encuentra en soportes del parabrisas y es de $9,13E+02$ mm, en el V2 el mayor desplazamiento se encuentra en los pilares y travesaños superiores posteriores ya que toda la zona frontal es empujada hacia la parte trasera y es de $2,53E+03$ mm. (Fig. 16).

Carga de Giro

El V1 obtiene un desplazamiento máximo de $1,52e+00$ mm y el V2 de $3,42e+00$ mm, en ambos vehículos se observa el mayor desplazamiento en tonos rojos en la parte superior de sus pilares, dado a que esta zona de su estructura posee menos refuerzos que en la zona inferior. (Fig. 17).

Carga de Frenado

El frenado es una aceleración negativa, el vehículo es empujado a la misma dirección a la que se desplaza; se observa como la parte superior de las estructuras tienen un desplazamiento hacia enfrente, el V1 de $2,83E+03$ mm y el V2 de $2,05E+04$ mm. (Fig. 18).

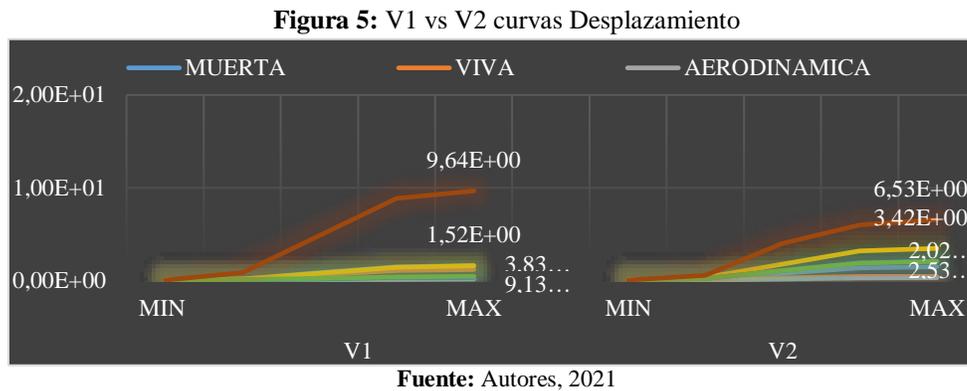
Carga de Aceleración

La carga de aceleración brusca empuja a la estructura en dirección opuesta a la de su movimiento, y en este análisis la parte superior de las estructuras se desplazan hacia atrás, el V1 se desplaza $3,83E+03$ mm en sus zonas más afectadas y el V2 $2,02E+04$ mm. (Fig. 19).

Carga de Torsión

Se observa el desplazamiento de la estructura en el lado donde se retiró las restricciones puesto que se encuentra a desnivel del lado opuesto, es notorio que el V1 tiene un desplazamiento mayor de $9,64E+04$ mm en los largueros y en el pilar delantero que justamente está conectado a los travesaños

delanteros lo que obliga a que la estructura se tuerza; y el V2 de $6,19E+04$ mm en el pilar trasero. La figura 19 es una ilustración de las curvas de los valores de mínimos a máximos del desplazamiento obtenido en las cargas consideradas. (Fig. 20).



En la gráfica 5. se observa que el V1 obtiene un mayor desplazamiento en los casos de carga que el V2, a excepción del caso de carga aerodinámica y de giro debido a que en el V2 sus pilares no son totalmente verticales, la parte superior sobresale del bastidor; los valores restantes se hallan en la tabla 9.

Deformación Unitaria

Se revisó la deformación que sufre cada elemento de la estructura tras las tensiones provocadas por las cargas. Como en este estudio se analiza únicamente el material elástico lineal donde no excede el límite elástico a plástico las deformaciones más críticas se encuentran en las mismas zonas que en las del análisis de tensión.

Cargas Muertas

Las cargas muertas provocan una deformación unitaria en los largueros centrales del bastidor, el V1 tiene una deformación de $4,74E+00$ y el V2 de $1,51E+01$. (Fig. 21).

Cargas Vivas

Las cargas vivas producen el mismo efecto de deformación en los largueros centrales de ambas estructuras, pero únicamente con el peso de los pasajeros en la zona donde están ubicados. El V1 tiene una deformación de $3,46E+00$ y el V2 de $6,46E+00$. (Fig. 22).

Cargas Aerodinámicas

La deformación en las cargas aerodinámicas al igual que en el análisis de la tensión Von Mises la deformación máxima se encuentra en la zona posterior de los elementos que ejercen mayor resistencia al viento por ser las más expuestas. El V1 tiene su mayor deformación en la zona de soldadura más afectada de $3,51E-01$ y el V2 de $2,22E-01$ en la unión del pilar y largueros traseros. (Fig. 23).

Cargas de Giro

La deformación unitaria se encuentra en el pilar y el travesaño delantero para el V1 con una deformación de $6,59E+00$ y en el larguero posterior con una deformación de $5,95E+00$ para el V2. (Fig. 24).

Cargas de Frenado

En la carga de frenado brusco se observa que el V1 posee la mayor deformación en la soldadura del pilar delantero con su travesaño y la consola de la suspensión siendo de $1,34E+00$, en el V2 los largueros centrales sufren la mayor deformación de $2,16E+00$ debido al empuje por la inercia. (Fig. 25).

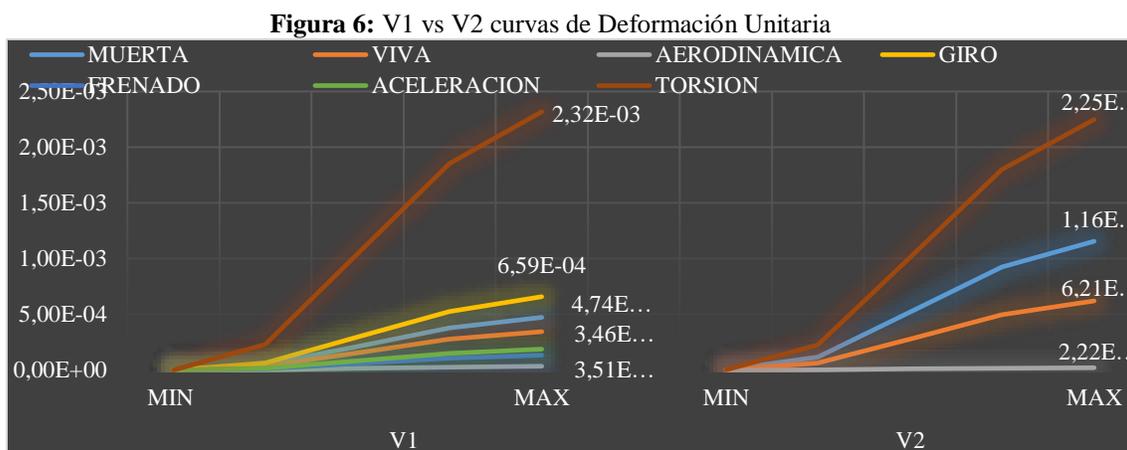
Cargas de Aceleración

Si bien es cierto la aceleración y el frenado se basan en el mismo criterio, pero de manera inversa, el desplazamiento en direcciones opuestas se encarga de que la deformación no sea en las mismas zonas ni que sus valores máximos sean los mismos, el V1 tiene un valor máximo de $1,88E+00$ y el V2 de $2,17E+00$. (Fig. 26).

Cargas de Tensión

La deformación al igual que la tensión en las cargas de torsión se presenta en direcciones opuestas a las de la carga causando grandes concentraciones de esfuerzos. El V1 tiene su deformación máxima de $2,32E+01$ y el V2 de $3,86E+01$ siendo esta mayor que la del primer vehículo.

La figura 6 indica las curvas de los valores de mínimos a máximos de deformación unitaria de las cargas estudiadas. (Fig. 27).



En la gráfica de la deformación unitaria el V1 posee una mayor deformación unitaria en las cargas muertas, aerodinámicas, de torsión y de giro, y el V2 en las cargas vivas, frenado y de aceleración; en la tabla 9. se encuentran todos los valores de las curvas anteriores.

Tabla 9: Tabla Comparativo V1 y V2. Valores Máximos en Casos de Carga

	V1			V2		
	VONMISES (MPa)	DESPL. (mm)	DEF.	VONMISES (MPa)	DESPL. (mm)	DEF.
MUERTA	1,10E+02	1,57E+00	4,74E-04	2,69E+02	1,45E+00	1,16E-03
VIVA	8,06E+01	1,14E+00	3,46E-04	1,44E+02	4,14E-01	6,21E-04
AERODINAMICA	8,16E+00	9,13E-02	3,51E-05	5,17E+00	2,53E-01	2,22E-05
GIRO	1,53E+02	1,52E+00	6,59E-04	1,21E+02	3,42E+00	5,21E-04
FRENADO	3,11E+01	2,83E-01	1,34E-04	5,02E+01	2,05E+00	2,16E-04
ACCELERACION	4,37E+01	3,83E-01	1,88E-04	4,88E+01	2,02E+00	2,10E-04
TORSION	5,39E+02	9,64E+00	2,32E-03	4,28E+02	7,89E+00	2,25E-03

Fuente: Autores, 2021

En la tabla 9 se observa los valores máximos de ambos modelos en todos los casos de carga de las tres pruebas realizadas, el V2 alcanza mayores esfuerzos en su estructura, sin embargo, en el caso de carga de torsión el V1 sufre el mayor esfuerzo identificado, siendo este el valor máximo en todas las pruebas de ambos vehículos, dado que al retirar las restricciones de un lado para la simulación del vehículo sobre alguna irregularidad, la consola de la suspensión y el travesaño delantero del lado opuesto se afectan, a causa de que este efecto trata de torcer la estructura.

Límite de Fluencia

Se origina cuando el material de la estructura supera el límite de esfuerzo, para cambiar su composición de elástico a plástico, y su deformación se torna permanente.

En la siguiente tabla se indica los valores de máxima tensión obtenidos en las pruebas de Von Mises. (Mott, 2009)

Tabla 12: Valores Máximos Von Mises que sobrepasan límite de Fluencia

	V1	V2
MUERTA	1,10E+02	2,69E+02
VIVA	8,06E+01	1,44E+02
AERODINAMICA	8,16E+00	5,17E+00
GIRO	1,53E+02	1,21E+02
FRENADO	3,11E+01	5,02E+01
ACELERACION	4,37E+01	4,88E+01
TORSION	5,39E+02	4,28E+02

Fuente: Autores, 2021

Los valores rojos indican los resultados que sobrepasan el valor del límite de fluencia para este material; en la prueba de la carga muerta el V2 sobrepasa la fluencia con 63,8 MPa, lo que significa que el vehículo sufriría una deformación irreversible con el peso de todos sus sistemas, elementos y componentes del mismo, la siguiente prueba que sobrepaso el límite de fluencia es la de torsión ya que en esta prueba, ambos vehículos generan resultados que duplican su valor, tomando en consideración que el presente estudio tiene un enfoque únicamente en el análisis del chasis mas no en el sistema de suspensión, siendo este sistema el que amortigua y protege a la carrocería de las irregularidades de la carretera.

Sin embargo, se identificó aceros que, con la carga aplicada, la deformación del material no sobrepase el límite de fluencia y la estructura no tenga una deformación permanente manteniéndose en el rango elástico de 2,00E+11 MPa, en sus zonas más críticas, con un factor de seguridad deseable.

Para determinar el factor de seguridad se emplea la siguiente ecuación:

[Ec. 5]

$$FS = \frac{\text{Esfuerzo de Cedencia}}{\text{Esfuerzo Permisible}}$$

Siendo el esfuerzo de cedencia el valor el límite de tensión al que llega el material previo a la deformación permanente, y el esfuerzo permisible corresponde a la tensión máxima del diseño de la estructura.

Tabla 13: Factor de seguridad Aceros Alta Resistencia

Acero	V1		V2	
	MPa	TOR.	TOR.	MU.
AISI 1340 OIL QUEN.	834	1,55	1,95	3,10
AISI 4027 WATER QUEN.	917	1,70	2,14	2,69
AISI 4140 QUENCHED	986	1,83	2,30	3,67
AISI 4340 NORMALIZED	862	1,60	2,01	3,21
AISI 5140 OIL QUEN.	841	1,56	1,96	3,13
AISI 8630 WATER QUEN.	910	1,69	2,12	3,39

Fuente: Autores, 2021

La tabla 13 indica algunos aceros de alta resistencia recomendables para la simulación del diseño de los vehículos analizados, especialmente para las piezas y fragmentos de las zonas más afectadas en las pruebas de Torsión y en la Carga Muerta en el caso del V2, considerando que en el resto de pruebas de los casos de carga estos aceros otorgan un factor de seguridad de más de 3 cumpliendo con los criterios de seguridad; independientemente del material seleccionado se debe contemplar el método de soldadura y verificar que el material de aporte reduzca la cantidad de oxígeno para evitar grietas ocasionadas por las aleaciones metálicas (Monsalve, 2013), los aceros de la tabla se encuentran en la lista de materiales del software de SimSolid, aun así este posee la capacidad de importar nuevos materiales, puesto que al tratarse de vehículos extranjeros que se acogen a diferentes normativas, hay la opción de colocar distintos materiales con las propiedades mecánicas necesarias para el estudio.

Conclusiones

Actualmente los fabricantes de vehículos se acogen a las normativas para el cumplimiento de fabricación de chasis con aceros especiales de altas resistencias con aleaciones metálicas que comprendan la capacidad de proporcionar resistencia a la rotura, un alto límite de fluencia, dureza y tenacidad. Se considera el proceso de soldadura, los tratamientos térmicos y el material de aporte seleccionado para la construcción de una estructura óptima.

Se logró efectuar el diseño y modelado de las de los chasis tubulares de dos vehículos eléctricos categoría L7e, su simulación y análisis estructural, en función de condiciones externas a las que la

estructura de un vehículo está sometida, para determinar su resistencia en los peores escenarios estáticos.

Se analizó el comportamiento de los materiales y sus propiedades, ensayados en el simulador SimSolid.

Para el análisis Von Mises el V1 con el acero estándar de SimSolid, posee una tensión máxima de $1,10E+02$ MPa en las cargas muertas lo que proporciona un Fs de 1,86 en las cargas vivas la tensión máxima es de $8,06E+01$ MPa con un Fs de 2,54, en las cargas aerodinámicas el valor máximo es de $8,16E+00$ MPa y un un Fs de 2,51, en las cargas de giro su tensión máxima es de $1,53E+02$ MPa y un Fs 1,34, en las cargas de frenado el valor máximo obtenido es de $3,11E+01$ MPa con un Fs de 6,60 siendo este el valor más alto de Fs en las pruebas del v1, para la cargas de aceleración se obtuvo $4,37E+01$ MPa y un Fs de 4,69 y para las cargas de Torsión un valor máximo $5,39E+02$, sobrepasa el límite de fluencia con 334 MPa y un Fs sumamente bajo de 0,38; puesto que al colocar las cargas vivas y muertas y retirar las restricciones de un lado el valor resultante revela que la consola de la suspensión y el travesaño delantero del lado opuesto llegan a una rotura.

En el análisis Von Mises del V2, la tensión máxima en las cargas muertas es de $2,69E+02$ MPa brindando un Fs de 0,70 en las cargas vivas la tensión máxima es de $1,44E+02$ MPa con un Fs de 1,42, en las cargas aerodinámicas el valor máximo es de $5,17E+00$ MPa y un un Fs de 3,96 en las cargas de giro su tensión máxima es de $1,21E+02$ MPa y un Fs 1,69, en las cargas de frenado el valor máximo obtenido es de $5,02E+01$ MPa con un Fs de 4,08, para la cargas de aceleración se obtuvo $4,88E+01$ MPa y un Fs de 4,20, el valor más alto de Fs en las pruebas del v2 y para las cargas de Torsión un valor máximo $4,28E+02$ con un Fs de 0,47 y de igual manera en esta prueba el V2 llega a su máxima tensión en los largueros opuestos indicando su rotura.

Tanto el V1 como el V2 en la última prueba sobrepasan el límite de fluencia con 334 MPa y 223 MPa, un Fs bajo de 0,38 y 0,47 concluyendo que las estructuras en esta prueba sobrepasan incluso el límite de resistencia a la tracción lo que significa que el material no solo se deformaría permanentemente, también daría origen a una rotura; por tal motivo se presentó varias opciones de aceros de alta resistencia con un factor de seguridad mayor de 1,50 para esta prueba, siendo esta el caso de carga más drástico para la estructura. El presente estudio no hace referencia al sistema de suspensión, puesto que con este sistema la estructura y sus soldaduras tienen menor afectación.

Referencias

1. Abreu, J. L. (2012). Hipótesis, método & diseño de investigación (hypothesis, method & research design). *Daena: International Journal of Good Conscience*, 7(2), 187-197.
2. Altair Engineering, I. (2021). Simcolid Análisis estructural para iteraciones rápidas de diseño. (Altair SimSolid™) Recuperado el 1 de Enero de 2021, de <https://www.altair.com/es/company/>
3. Bobeth, S., & Kastner, I. (2019). *Buying an electric car: A rational choice or a norm-directed*. Berlin: International Psychoanalytic University Berlin.
4. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. (2016). En Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, por la que se aprueba la Norma 3.1- (págs. 1-231). Madrid.
5. Capellan, G. C. (2017). Caracterización del tren de potencia de un vehículo eléctrico de categoría L7 tipo Smart. Creative Commons.
6. Cepeda, J. L. (2006). "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DEL AUTOBUS FELINE PARA LA EMPRESA CARROCERA MIRAL BUSES". 1-364.
7. Condor Romero, K. B. (2019). Control autónomo del Renault Twizy y su modelo 3D en gazebo. Sevilla.
8. Dianelis, R., Rotaris, L., & Giansoldati, M. (2020). Drivers' preferences for electric cars in Italy. . Trieste: Dipartimento di Scienze Economiche.
9. Doblado, B., & Marin, J. (2017). *Vehiculos electricos e hibridos*. Asturias : Graficas Summa.
10. Dumon, A. (1992). Formar a los estudiantes en el método experimental:¿ Utopía o problema superado?. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 25-31.
11. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. (2009). En NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1323:2009. VEHICULOS AUTOMOTORES. CARROCERIAS DE BUSES. (págs. 1-10). Quito.
12. intercar. (2019).
13. Lojacar. (s.f.). Lojacar. Recuperado el 14 de 09 de 2020, de <https://www.lojacar.com.ec/es/renault-twizy>
14. Macció, Á. S. (2018). Comparativa del Renault Twizy con diferentes trenes de potencia.

15. Márquez, M. C. (2014). "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CHASIS TUBULAR PARA UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN TIPO SUPERCROSSCAR". 34-35.
16. Monsalve, M. A. (7 de Octubre de 2013). Aceros de alta resistencia. Recuperado el 22 de Febrero de 2021, de <https://es.slideshare.net/marcoandresmonsalve/aceros-de-alta-resistencia>
17. Mott, R. (2009). En Resistencia de Materiales Aplicada. Mexico : Pearson educación.
18. NTE INEN. (2016). Normativa NTE INEN 2656.
19. Pellicer, E. L. (1997). Automóviles Eléctricos. Zaragoza: INO Reproducciones SA.
20. REGLAMENTO (UE) No 168/2013 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. (2013). Diario Oficial de la Unión Europea, 1-77.
21. REGLAMENTO (UE) No 168/2013 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativo a la homologación de los vehículos de dos o tres ruedas y los cuatriciclos, y a la vigilancia. (2013). Diario Oficial de la Unión Europea, 1-77.

© 2020 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/>)