

Proposal for the structural design of the three-wheeled vehicle to improve the quality of life of the citizen, Perú

José L. Serna-Landivar, Br¹, Madelaine Violeta Risco Sernaque, Msc², Ana Beatriz Rivas Moreano, Dr², Marleni Mendoza Damas, Msc³, Maria Ysabel Garcia-Alvarez, Dr³, Katy Sotteccani Aucchahuaque, Msc³, Daniela M. Anticona-Valderrama, Ph.D⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18101283@utp.edu.pe,

²Universidad Autónoma del Perú, Perú, arivasmor@autonoma.edu.pe, mriscese@autonoma.edu.pe.

³Universidad César Vallejo, Perú, mendozadal5@ucvvirtual.edu.pe, mgarcialv@ucvvirtual.edu.pe,

ksotteccania@ucvvirtual.edu.pe

⁴Universidad Privada del Norte, Perú, daniela.anticona@upn.pe.

Abstract— Vehicle traffic accidents are a big problem because they cause deaths and damage to citizens. To solve this problem, new vehicle designs must be better every day in terms of safety, reducing accidents, sustainable, and emitting low levels of greenhouse gases. , since this destroys and pollutes the environment. For this reason, in the present work, a pre-experimental study was carried out on the proposal of a structure for a three-wheeled vehicle to transport and improve the quality of life of people through finite element analysis using the ANSYS software. Static analysis to find deformations, stresses, and safety factors, and dynamic analysis, such as modal analysis to find natural frequencies, vibration modes, and mass participation factor, were evaluated. In addition, a harmonic analysis (superposition of modes) was carried out to estimate the deformations and stresses promoted by the sinusoidal forces generated by the loads of the passengers and vehicle components. The results show that the three-wheeled vehicle is designed with low efforts and minimal deformations; In the modal analysis, the natural frequencies of vibration mode 1 is 15.89Hz, with a mass participation of 30%, due to its low mass participation factor resonance cannot enter, in the harmonic analysis they were obtained in the same way. Low stresses and deformations. It was concluded that the structure of the three-wheeled vehicle was adequately designed to operate safely, guaranteeing its correct functioning while transporting people.

Keywords— Three-wheeled vehicle, solar panels, FEM, vehicle accidents, rickshaw.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

Propuesta de diseño estructural del vehículo de tres ruedas para el mejoramiento de la calidad de vida del ciudadano, Perú

José L. Serna-Landivar, Br¹, Madelaine Violeta Risco Sernaque, Msc², Ana Beatriz Rivas Moreano, Dr², Marleni Mendoza Damas, Msc³, Maria Ysabel Garcia-Alvarez, Dr³, Katy Sotteccani Aucchahuque, Msc³, Daniela M. Anticona-Valderrama, Ph.D⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18101283@utp.edu.pe,

²Universidad Autónoma del Perú, Perú, arivasmor@autonoma.edu.pe, mriscoase@autonoma.edu.pe.

³Universidad César Vallejo, Perú, mendozadal5@ucvvirtual.edu.pe, mgarcialv@ucvvirtual.edu.pe, ksotteccania@ucvvirtual.edu.pe

⁴Universidad Privada del Norte, Perú, daniela.anticona@upn.pe.

Abstract— *Los accidentes de tránsito de vehículos son un gran problema porque provoca muertes y daños a los ciudadanos, para solucionar esta problemática los nuevos diseños de los vehículos deben ser cada día mejores en seguridad disminuyendo los accidentes, sostenibles y emitir bajos niveles de gases de efecto invernadero, ya que esto destruye y contamina el medio ambiente. Por ello, en el presente trabajo se realizó un estudio preexperimental de la propuesta de una estructura para vehículo de tres ruedas para transportar y mejorar la calidad de vida de las personas mediante análisis de elementos finitos utilizando el software ANSYS. Se evaluó el análisis estático para encontrar deformaciones, esfuerzos y factores de seguridad, y análisis dinámicos, como el análisis modal para encontrar frecuencias naturales, modos de vibración y el factor de participación de masa. Además, se realizó un análisis armónico (superposición de modos) para estimar las deformaciones y esfuerzos fomentados por las fuerzas sinusoidales generadas por las cargas de los pasajeros y componentes del vehículo. Los resultados muestran que el vehículo de tres ruedas está diseñado con bajos esfuerzos y con deformaciones mínimas; en el análisis modal, las frecuencias naturales del modo de vibración 1 es de 15.89Hz, con una participación de masa del 30%, debido a su baja factor de participación de masa no puede entrar resonancia, en el análisis armónico de igual manera se obtuvieron bajos esfuerzos y deformaciones. Se concluyó que la estructura del vehículo de tres ruedas fue diseñada adecuadamente para operar con seguridad garantizando su correcto funcionamiento transportando personas.*

Keywords— *Vehículo de tres ruedas, paneles solares, FEM, accidentes vehiculares, rickshaw.*

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es debido a las emisiones de CO₂ de los vehículos y se ha convertido en una seria preocupación a nivel mundial. Recientemente, se han tomado diversas medidas para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la generación de energía renovable [1][2]. Además, en términos de emisiones gaseosas, el sector del transporte es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de los vehículos [3]. Por ejemplo, el 84 % de las emisiones de GEI (gases de efecto

invernadero) en Europa provienen del sector del transporte, el 28 % de las cuales están relacionadas principalmente con los vehículos de carretera, en el Perú es el 46° emisor de GEI a nivel mundial, estas emisiones de GEI del transporte contribuyen a aproximadamente el 40% (14,9Mt CO₂ equivalente) de las emisiones de energía nacionales de Perú [4]. Esto ha motivado a la industria automotriz a desarrollar vehículos de bajas y cero emisiones que puedan reemplazar a los motores de combustión interna [5].

Existen intentos en modificar vehículos de tres ruedas en circulación implementando paneles solares [6], con baterías, pero este análisis no solo debe basarse en mejorar el ya existente, sino evaluarlo pre-experimentalmente, ya que se están añadiendo cargas (paneles solares, baterías, estructura) que en el primer diseño original no se contemplaban, esto suele ser costoso modificar maquinas en operación y podría que fallen o tengan accidentes.

A nivel mundial según las investigaciones realizadas por la Organización Mundial de la Salud [7], el 23% de accidentes de tránsito son provocados por vehículos de tres ruedas, de manera similar en Latinoamérica es el segundo índice de accidentes de tránsito con un 15% del total. Las tendencias actuales sugieren que, sin una acción urgente, los accidentes de tránsito serán la quinta causa de muerte para el 2030.

De manera similar en el Perú, según [8], los accidentes de tránsito de vehículos menores presentan una alta tasa de mortalidad, Estando en primer lugar las motos lineales con el 77.1%, en segunda posición se encuentran los mototaxis con el 43.6%. Siendo estos vehículos los más utilizados por los ciudadanos que viven en Lima, ya que es un medio de transporte económico.

La fabricación de estos triciclos fundamente se realizan en países como Japón, China e India, para ello se aplica los fundamentos de la ingeniería tanto en el diseño, como la construcción de estas máquinas; para que las importaciones de estos vehículos sean lo más económicas posibles, es necesario que solo se importen las partes principales, debido a esto en nuestro país, se realizan la fabricación de la estructura, que no constan con ningún análisis ingenieril que pueda garantizar la

estabilidad, el soporte, robustez y la aerodinámica del vehículo de tres ruedas.

En el Perú se utilizan como medio de transporte de pasajeros, donde gran parte de estos vehículos se encuentran ubicados en los conos de Lima metropolitana. En el mercado peruano existen tipos de mototaxi, una de ellas es la de la marca BAJAJ, el modelo torito, este modelo fue desarrollado con ingeniería japonesa, en comparación con el otro modelo comercial de mototaxi de las marcas Lifan, Zongshen, Wanxing, etc. Estas se ensamblan de manera empírica, no cuentan con un análisis de ingeniería previa respaldados con cálculos dinámicos, estáticos, estabilidad [9].

Es importante mencionar que las causas principales que provocan accidentes son los giros en curvas, volcaduras [10], se entiende por volcadura como la posición del vehículo está invertida, puede ocurrir transversal y longitudinalmente, los cuales se clasifican en tropezones, no tropezones en carretera plana o inclinada, es por ello que se necesita ofrecer la seguridad necesaria al pasajero, con la finalidad de evitar daños al conductor y a sus pasajeros, reducir los accidentes de tránsito, convirtiéndolo en un medio de transporte confiable, seguro.

Los mototaxis comenzaron a usarse a finales de los años 90, siendo unas de las ciudades pioneras en la utilización de este vehículo la ciudad de Caracas, debido a los constantes problemas de tráfico que atravesaban.

Los vehículos de tres ruedas, según Tang [11], deben de tener un diseño de mecanismo que les permita tener una buena suspensión y arrastre para mejorar la estabilidad en las curvas, para ello es importante analizar las propiedades cinemáticas y dinámicas de la suspensión, de esa manera se pueda tener estabilidad.

Según [12] en su estudio presenta un nuevo índice de vuelco para triciclos, considerando parámetros como la altura del centro de gravedad del chasis, el freno diferencial en las ruedas traseras, demostrando su eficacia en la predicción y detección del riesgo del vehículo a las volcaduras e incluso de forma estática, el análisis se realizó mediante simulaciones numéricas que describen el comportamiento dinámico utilizando el software comercial llamado CARSIM. La investigación [9] estableció el modelo dinámico espacial del vehículo para determinar la fuerza vertical F_z , para detectar el límite inminente de las volcaduras.

Es importante mencionar que los chasis deben contar con sistema de inclinación activa, que proporcione estabilidad, control óptimo y suspensión de inclinación de variable, para ello se debe evaluar minuciosamente tanto la inclinación como la estabilidad general de los vehículos, así mismo se debe realizar un sistema de inclinación que nos permite mejorar la estabilidad de los lados laterales del vehículo [13]. Es importante que el chasis tenga estabilidad en sus distintos tipos de configuraciones, así como en los ángulos de inclinación tanto de la parte delantera como trasera.

Este tipo de vehículos, tienen un amplio historial en cuánto a accidentes de tránsito se refiere, los índices de vuelcos con o sin tropezones tanto en pistas como en

carreteras, ha sido un problema que se refleja en la actualidad, es importante contar con sistema de prevención de vuelcos, para ello es necesario realizar una simulación, con la finalidad de mejorar condiciones y configuraciones [14]. Se sabe que el chasis es el armazón fabricado de acero, se tiene conocimiento que también se encarga de conectar la mayor parte de los elementos importantes de un vehículo de 3 ruedas, cumpliendo una función vital, no únicamente en fuerza y rigidez, sino como sostén de las partes más importante del vehículo.

Adicionalmente, se debe considerar los efectos de la configuración de la carretera como caminos llanos, caminos inclinados cuesta arriba o cuesta abajo u a la entrada de una carretera peraltada, por lo que se propone emplear índices dinámicos de renovación puesto que, incluyen estados del vehículo para proporcionar indicadores de vuelco más precisos para situaciones dinámicas [15]. Es necesario tomar en cuenta estas configuraciones a la hora de plasmar el modelo a trabajar en la simulación para la obtención de resultados más veraces.

Por otro lado, las normas ya establecidas para el diseño de un chasis son pautas que no se pueden obviar a la hora de elaborar un modelo del mismo puesto que, estas brindan la información necesaria para un correcto diseño dando nociones del material a utilizar, factores de seguridad pertinentes, entre otros.

Entonces en este artículo de investigación [16], se diseñó un chasis para vehículo de tres ruedas, de un material AISI 4130, realizándole análisis de elementos finitos, para evaluar su estabilidad dinámica, es vital cumplir con las normas debido a que caso contrario el diseño a realizar pierde credibilidad y prestigio quedando descartado para su posterior fabricación. Mediante el software de simulación SolidWorks, se obtuvieron los resultados óptimos del chasis de material AISI 4130, con un buen factor de seguridad.

Otro punto destacable, se presenta con la implementación del análisis por elementos finitos trabajando de manera simultánea para determinar los verdaderos efectos de carga a los que está sometido el chasis cuando el vehículo se encuentra en movimiento [9]. Se sabe que al no realizar la combinación de estos métodos los resultados a estudiar no serán los más cercanos a la realidad causando posiblemente fallas en la estructura del chasis y generando accidentes lo que pondría en riesgo el bienestar tanto del conductor como el copiloto y el entorno que los rodea. De manera similar [17], para validar un diseño de un prototipo de vehículo de tres ruedas, se realizó un análisis por elementos finitos. Sin embargo, su alcance fue un análisis estático. Se podría realizar un análisis dinámico para validar su comportamiento dinámico.

La elaboración de este estudio tiene como propósito principal analizar minuciosamente el diseño estructural, dinámico y la estabilidad, del chasis del vehículo de tres ruedas, análisis de esfuerzos, deformaciones, análisis modal, análisis armónico, para ello se debe tener en cuenta los parámetros de diseño, geometría, condiciones, material con el que está elaborado, para poder realizar la mejorar a partir de los diseños estructurados que se encuentran en el mercado,

con la finalidad de convertirlo en un medio de transporte seguro, sostenible.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo del vehículo de tres ruedas

El vehículo de tres ruedas es el objeto del estudio, este vehículo permite transportar a los ciudadanos de manera segura reduciendo los accidentes de tránsito, el vehículo está conformado por el chasis, sistema de suspensión, dos ruedas traseras, 1 rueda delantera, asiento del conductor, asiento de los pasajeros, batería eléctrica, paneles solares (ver Fig.1). Este vehículo de tres ruedas permite transportar personas de manera estable, segura y ecológica.

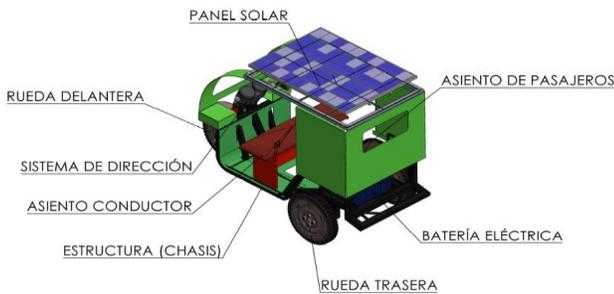


Fig. 1. Vehículo de tres ruedas.

Análisis de dirección

Al determinar la geometría del sistema de dirección, el factor más importante es cuánto giran las ruedas en las esquinas para evitar que los neumáticos rocen lateralmente. La geometría óptima teórica se obtiene calculando el ángulo de dirección, en este caso se calcularía el ángulo de giro de la rueda delantera direccional y las dos ruedas traseras son rectas sin dirección, sin embargo, también estas ruedas son las ruedas motrices. Es importante mencionar que en las curvas el vehículo tiene un radio de giro que se debe de tener en cuenta durante el diseño. En la figura 2, se observa la geometría del vehículo de tres ruedas, donde se especifican las dimensiones y ángulos. No obstante, para fines de abreviar los calculo se puede simplificar la geometría, obviando la tercera rueda y quedando solo con dos ruedas, como puede verse en la figura 3.

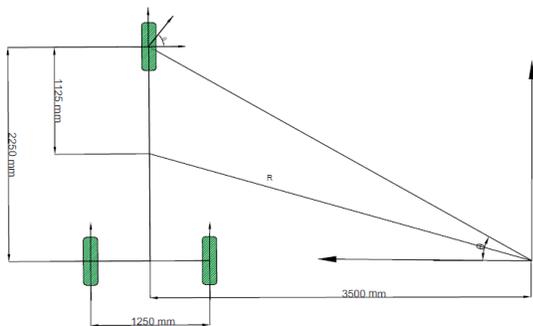


Fig. 2. Esquema de la geometría de Ackermann en el vehículo de tres ruedas.

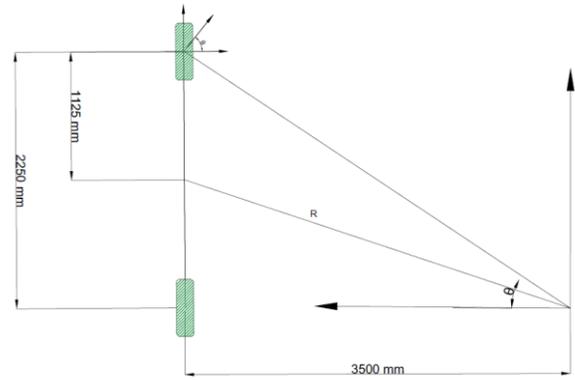


Fig. 3. Esquema simplificado de la geometría de Ackermann en el vehículo de tres ruedas.

Angulo de dirección:

El ángulo de dirección está relacionado con la proyección del ángulo de giro y la distancia longitudinal de la rueda delantera y las ruedas traseras.

$$\cot \theta = \frac{R}{L}$$

$$\cot \theta = \frac{3500 \text{ mm}}{2250 \text{ mm}}$$

$$\theta = 32.7^\circ$$

Radio de giro:

El radio de giro es una variable que explica la capacidad de un determinado vehículo para girar en las curvas.

$$R = \sqrt{(1125 \text{ mm})^2 + (3500 \text{ mm})^2}$$

$$R = 3676.4 \text{ mm}$$

Análisis de los muelles de suspensión

Masa de la estructura del vehículo: 150Kg

Factor dinámico: 2.5

Distribución de masas considerada es 50:50 (Delantera: Trasera)

Amortiguadores:

$$F = \frac{150 \text{ Kg}}{2} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 735.8 \text{ N}$$

Luego consideraremos la fuerza del resorte con el factor dinámico 2.5, es decir fuerza dinámica actuando en el resorte.

$$F_{RD} = 1840 N$$

En función de las condiciones de conducción y de la calidad de la carretera para el vehículo de tres ruedas, se estima que el recorrido óptimo de los muelles debe ser de unos 32 mm.

Por lo tanto,

$$K = \frac{1840N}{32mm}$$

$$K = 57.5 \frac{N}{mm}$$

Fuerza de aceleración

La fuerza de aceleración (Fa) es la fuerza necesaria para acelerar desde una parada hasta la velocidad máxima en un tiempo deseado. Consideraremos que el vehículo alcanza una velocidad máxima de 80Km/h, es decir 22.22m/s; y un tiempo de aceleración de 7 segundos.

$$F_a = 150Kg * 22.22m/s * \frac{1}{32.5 * 7s}$$

$$F_a = 14.7 Kg * f$$

Modelo por elementos finitos del chasis del vehículo de tres ruedas

El modelado del chasis de la propuesta es fundamental, ya que es la parte principal que sostendrá todos los componentes que conformarán el vehículo de tres ruedas (ver. Fig.4), el modelado se realizó en SolidWorks, luego la geometría se importó al software CAE ANSYS. Se utilizó el material A572 grado 50, la cual tiene buenas propiedades mecánicas y es un acero comercial, se especifica en la tabla I.

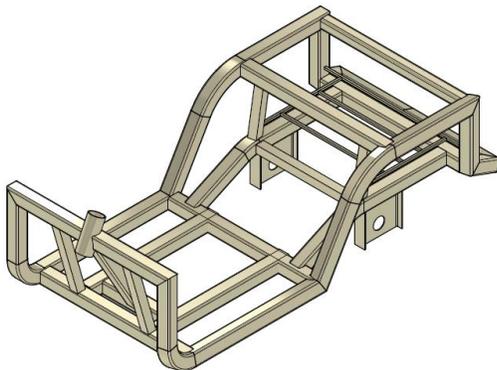


Fig. 4. Modelado 3D del chasis del vehículo de tres ruedas

TABLA I
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL BASE DEL CHASIS DEL VEHÍCULO DE TRES RUEDAS [18]–[22].

| Acero | Resistencia a la fluencia (Mpa) | Módulo de elasticidad (Gpa) | Resistencia última a la tracción (Mpa) | Ratio Poisson | Densidad (kg/m3) |
|----------------|---------------------------------|-----------------------------|--|---------------|------------------|
| A 572 Grado 50 | 345 | 200 | 450 | 0.26 | 7800 |

Se realizó el mallado de la estructura propuesta cual se realizó iteraciones hasta lograr la convergencia de malla y se obtuvieron 312712 nodos y 99727 elementos (ver. Fig.5).

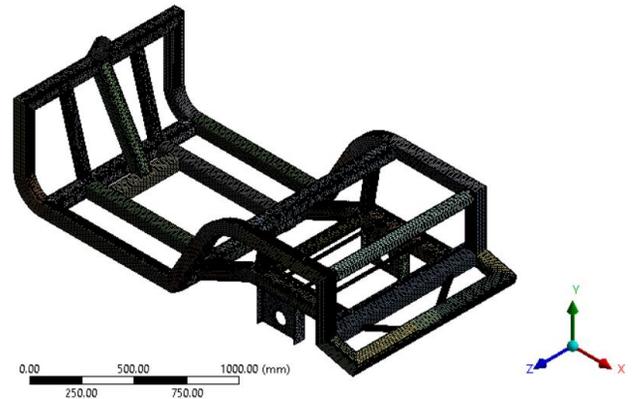


Fig. 5. Mallado del chasis del vehículo de tres ruedas

En las condiciones de borde para la estructura propuesta, se consideró los puntos de apoyos del eje trasero, dos resortes en la parte delantera con una rigidez de 57.5 N/mm, se planteó una fuerza con un valor de 10840 N, ver Fig. 6, de esta manera obtendremos las deformaciones máximas, los esfuerzos máximos y los factores de seguridad, esto comprende al análisis estático.

De manera similar se utilizará el análisis modal, sin embargo, no se considerará la fuerza externa, ni el amortiguamiento, ya que es un análisis libre para determinar las propiedades dinámicas del chasis en evaluación. Se consideró 10 modos de vibración y se evaluó el factor de participación de masa.

Por último, el análisis armónico se utiliza el método de superposición de modos, es decir se apoya en el análisis modal para resolver la ecuación diferencial dinámica. De esta manera, se considera las mismas condiciones de borde del análisis estático y adicionalmente una fuerza senoidal que está inducida por la carga dinámica a la que está sometida la estructura del vehículo de tres ruedas. Obtuvimos los desplazamientos máximos, esfuerzos máximos y sus puntos críticos de la estructura.

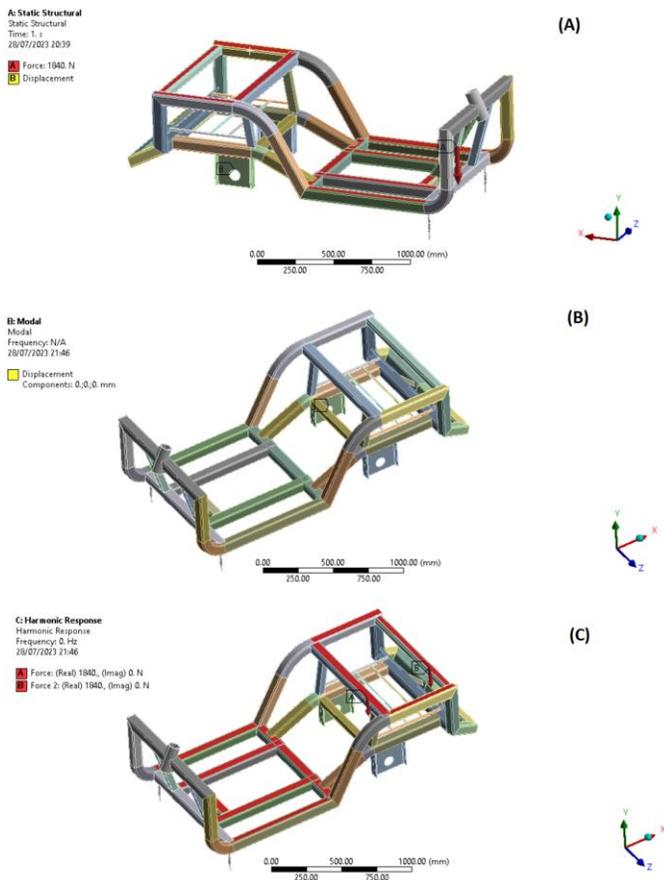


Fig. 6. Condiciones de borde del chasis del vehículo de tres ruedas (A) análisis estático. (B) análisis modal. (C) análisis armónico.

III. RESULTADOS

Análisis estático del chasis del vehículo de tres ruedas

Los resultados obtenidos en las deformaciones del análisis estático tenemos en la Fig.7 un valor máximo de 0.891 mm. Además, se observa una gradiente de color rojo en la máxima deformación en la parte delantera de la estructura estudiada.

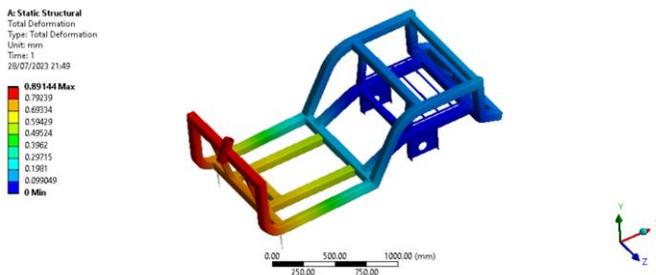


Fig. 7. Deformación total del chasis del vehículo de tres ruedas

En la Fig.8, se observa que el esfuerzo máximo obtenido es de 80.928 MPa, ubicados en las uniones de los perfiles cuadrados y en los apoyos del eje de las ruedas en la estructura propuesta, ya que se concentran las mayores fuerzas a la que estará sometida la estructura.

En ese sentido la relación entre el límite de fluencia y el esfuerzo máximo obtenido en la estructura da como resultado el factor con un valor de 4.26. de modo que el criterio del factor de seguridad debe de tener suficiente margen como para soportar las cargas adicionales a la cual podría estar sometida la estructura.

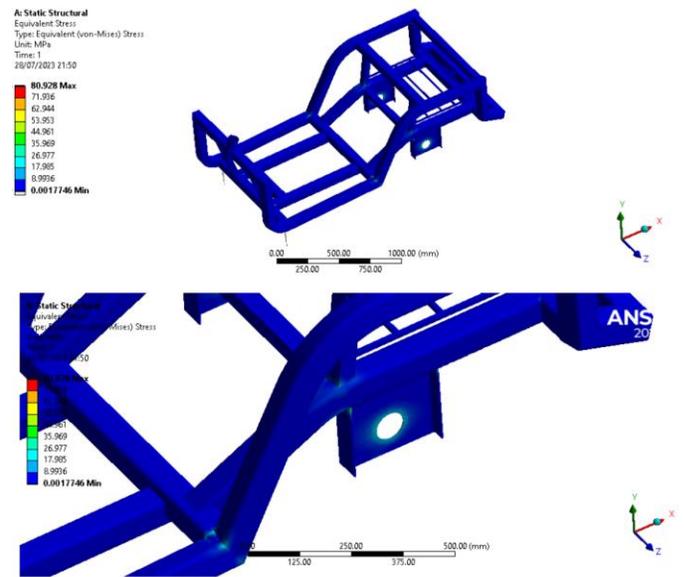


Fig. 8. Esfuerzos máximos de la estructura del vehículo de tres ruedas

Análisis modal de la estructura del vehículo de tres ruedas

Los resultados obtenidos en el análisis modal utilizando ANSYS que se muestran en la tabla II y Fig. 9, se observa que el rango de frecuencias naturales es 15.89 Hz y 90.96 Hz, las cuales están dentro del rango de trabajo del motor eléctrico del vehículo de 3 ruedas. La frecuencia relevante para nuestro objeto de estudio es el modo de vibración 1, con una frecuencia natural de 15.89 Hz, este modo de vibración tiene un comportamiento fluctuante en el eje Y, desplazamientos hacia arriba y hacia abajo, ver Fig. 10, similar a la cual tiene en condiciones reales el vehículo, y el ratio de factor de participación de masa es baja 30% de la masa total de la estructura.

El modo de vibración 5 y 6, se aproximan a la frecuencia operativa del motor eléctrico del vehículo de 3 ruedas, pero es muy poco probable que se active, ya que el factor de participación de masa es muy bajo y el modo de vibración no es el que se esperaría durante la operación del vehículo.

Los modos de vibración restantes de los 10 en total, tienen similares modos de vibración diferentes, pero no son relevantes para evaluar en la estructura propuesta.

Tabla II
Análisis modal de la estructura del vehículo de tres ruedas

| MODO DE VIBRACIÓN | A 572 Grado 50 Frecuencia (Hz) |
|-------------------|--------------------------------|
| 1 | 15.892 |
| 2 | 18.42 |
| 3 | 37.552 |
| 4 | 38.028 |
| 5 | 40.27 |
| 6 | 69.804 |
| 7 | 74.201 |
| 8 | 82.993 |
| 9 | 88.063 |
| 10 | 90.962 |

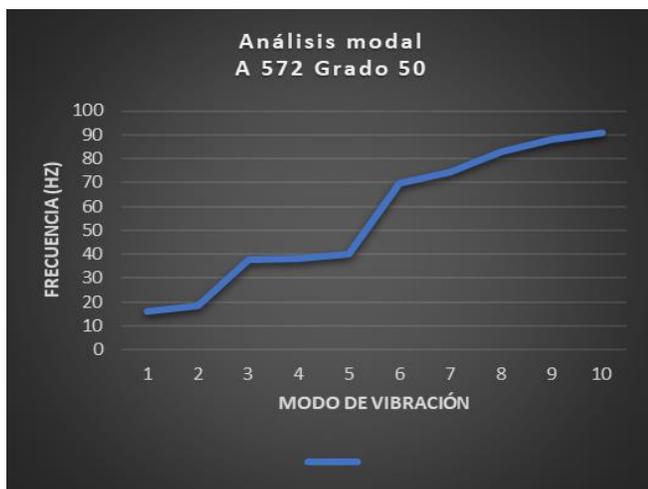


Fig. 9. Relación entre el modo de vibración y las frecuencias naturales del vehículo de 3 ruedas.

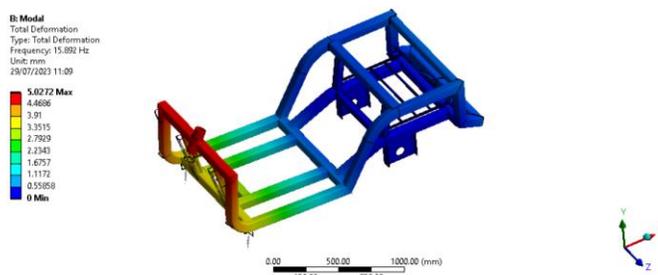


Fig. 10. Modo de vibración 1.

Análisis armónico del vehículo de tres ruedas

Los resultados del análisis armónico en la estructura propuesta tuvieron esfuerzos máximos y deformaciones, en la Fig. 11, se observa que con un ángulo de fase de 180° tuvo un esfuerzo máximo de 2.37 MPa; y deformación máxima con un valor 0.04mm (ver Fig.12), siendo ambos valores mínimos y aceptables para el correcto funcionamiento del vehículo de tres ruedas.

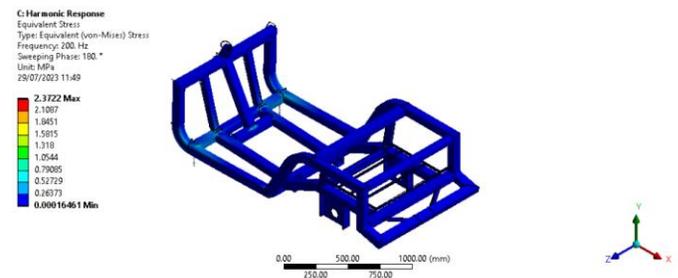


Fig. 11. Esfuerzos máximos del análisis armónico del vehículo de 3 ruedas.

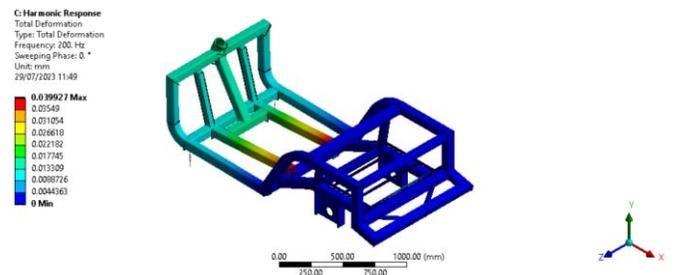


Fig. 12. Deformaciones máximas del análisis armónico del vehículo de 3 ruedas.

Cabe resaltar que estas frecuencias no corresponden a modos vibracionales en los que participa más la masa, por lo que la frecuencia no es importante. Después de esta frecuencia, la amplitud disminuirá gradualmente hasta cero.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio toma principalmente la estructura propuesta para el vehículo de tres ruedas para transportar personas de manera segura, ecológico y sustentable, dado que, al funcionar con motor eléctrico, utiliza paneles solares y baterías eléctricas, este vehículo no emitirá gases tóxicos y nocivos de efecto invernadero como el CO2. Se realizó un análisis por elementos finitos para validar el diseño propuesto, para el análisis estático se obtuvo una deformación máxima de 0.89mm y un esfuerzo máximo de 80.9 MPa, siendo su factor de seguridad de 4.26, siendo un valor aceptable y cumple con los criterios de diseño.

En cuanto al análisis modal, se obtuvieron las frecuencias naturales y los modos de vibración, se evaluó con el factor de participación de masa y se determinó que el modo de

vibración 1 es el que tiene un comportamiento similar al que la estructura del vehículo tendría en funcionamiento real, su participación de masa del 30% del total de la masa de la estructura y su frecuencia natural es de 15.89Hz, lo que podría activarse la resonancia cuando opere a bajas velocidades. En consecuencia, en el análisis armónico se obtuvo un esfuerzo máximo de 2.37 MPa, siendo un valor bajo y la resonancia no se activa cuando actúa la fuerza senoidal durante el análisis.

Finalmente, la estructura geoméricamente está correctamente dimensionada, el ángulo de convergencia, su radio del círculo de giro, su sistema de suspensión, quedan validadas mediante el análisis por elementos finitos, por lo que el diseño propuesto funciona de manera segura y confiable.

Para futuros trabajos se podría evaluar la estructura del vehículo de tres ruedas, se haría un análisis explícito, considerando cargas laterales y frontales, simulando los choques de impacto por vehículos y/o barreras.

REFERENCES

- [1] K. S. Reddy, S. Aravindhan, and T. K. Mallick, "Techno-Economic Investigation of Solar Powered Electric Auto-Rickshaw for a Sustainable Transport System," *Energies*, vol. 10, no. 6, 2017, doi: 10.3390/en10060754.
- [2] A. Maennel and H.-G. Kim, "Comparison of Greenhouse Gas Reduction Potential through Renewable Energy Transition in South Korea and Germany," *Energies*, vol. 11, no. 1, 2018, doi: 10.3390/en11010206.
- [3] S. Feng and C. L. Magee, "Technological development of key domains in electric vehicles: Improvement rates, technology trajectories and key assignees," *Appl. Energy*, vol. 260, p. 114264, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114264>.
- [4] Y. Romero, N. Chicchon, F. Duarte, J. Noel, C. Ratti, and M. Nyhan, "Quantifying and spatial disaggregation of air pollution emissions from ground transportation in a developing country context: Case study for the Lima Metropolitan Area in Peru," *Sci. Total Environ.*, vol. 698, p. 134313, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134313>.
- [5] Z. Qin, Y. Luo, K. Li, and H. Peng, "Optimal design of a novel hybrid electric powertrain for tracked vehicles," *Energies*, vol. 10, no. 12, 2017, doi: 10.3390/en10122141.
- [6] A. S. Mohammed, A. Olalekan Salau, B. Sigweni, and A. M. Zungeru, "Conversion and performance evaluation of petrol engine to electric powered three-wheeler vehicle with an onboard solar charging system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 20, p. 100427, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100427>.
- [7] Organización Mundial de la Salud, "Seguridad de los vehículos de motor de dos y tres ruedas: Manual de seguridad vial para decisores y profesionales," Ginebra, 2017. [Online]. Available: <http://www.who.int/publications/guidelines/es/>.
- [8] INEI, "Estadísticas de la criminalidad, seguridad ciudadana y violencia," LIMA, 2021. [Online]. Available: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/estadisticas_d_e_criminalidad_seguridad_ciudadana_abr-jun2021.pdf.
- [9] D. Sampayo, P. Luque, D. A. Mantaras, and E. Rodriguez, "Go-kart chassis design using finite element analysis and multibody dynamic simulation," *Int. J. Simul. Model.*, vol. 20, no. 2, pp. 267–278, 2021, doi: 10.2507/IJSIMM20-2-555.
- [10] M. Ataei, C. Tang, A. Khajepour, and S. Jeon, "Active camber system for lateral stability improvement of urban vehicles," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 233, no. 14, pp. 3824–3838, 2019, doi: 10.1177/0954407019832436.
- [11] C. Tang, L. He, and A. Khajepour, "Design and analysis of an integrated suspension tilting mechanism for narrow urban vehicles," *Mech. Mach. Theory*, vol. 120, pp. 225–238, 2018, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.09.025.
- [12] M. A. R. Licea, E. A. V. Rodríguez, F. J. P. Pinal, and J. P. Olivares, "The rollover risk in delta tricycles: A new rollover index and its robust mitigation by rear differential braking," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2018, no. 1, pp. 140–155, 2018, doi: 10.1155/2018/4972419.
- [13] C. Tang, M. Ataei, and A. Khajepour, "A reconfigurable integrated control for narrow tilting vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 1, pp. 234–244, 2019, doi: 10.1109/TVT.2018.2882382.
- [14] M. Ataei, A. Khajepour, and S. Jeon, "A general rollover index for tripped and un-tripped rollovers on flat and sloped roads," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 233, no. 2, pp. 304–316, 2019, doi: 10.1177/0954407017743345.
- [15] M. Ataei, A. Khajepour, and S. Jeon, "Rollover stabilities of three-wheeled vehicles including road configuration effects," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 231, no. 7, pp. 859–871, 2017, doi: 10.1177/0954407017695007.
- [16] M. Palanivendhan, S. Devanand, J. Chandradass, J. Philip, and S. Sajith Reddy, "Design and analysis of 3-wheeler chassis," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 6958–6968, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.417.
- [17] M. Blatnický, M. Sága, J. Dižo, and M. Bruna, "Application of light metal alloy EN AW 6063 to vehicle frame construction with an innovated steering mechanism," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 4, 2020, doi: 10.3390/ma13040817.
- [18] H. C. Ho *et al.*, "Determination of a full range constitutive model for high strength S690 steels," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 174, 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.106275.
- [19] Z. Guo, X. Jia, and W. Qiao, "Mechanical Properties of Butt Weldments Made with Q345B Steel and E5015 Electrodes at Different Temperatures," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 9, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002845.
- [20] T. M. D. Borba, R. S. Oliveira, H. R. Gama, M. F. O. Caizer, and L. O. Turani, "Weldability evaluation of sincron EN 10025-4 S355M steel applied in wind tower manufacturing welding with high efficiency process," *Soldag. e Insp.*, vol. 22, no. 4, pp. 413–428, 2017, doi: 10.1590/0104-9224/SI2204.12.
- [21] H. U. Sajid and R. Kiran, "Influence of high stress triaxiality on mechanical strength of ASTM A36, ASTM A572 and ASTM A992 steels," *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 129–134, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.018.
- [22] S.-H. Lee and B.-J. Choi, "Mechanical properties of astm a572 grades 50 and 60 steels at high temperatures," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 24, 2021, doi: 10.3390/app112411833.