

## Diseño y simulación del cardán para el sistema de potencia del vehículo BAJA SAE UAM 2023

Design and simulation of the gimbal for the vehicle power system BAJA SAE UAM 2023

Iván **González Uribe**<sup>1</sup>, Romy **Pérez Moreno**<sup>2</sup>, Diego Antonio **Juárez-Guerra**<sup>3</sup>, Erick Uriel **Calette Lemus**<sup>4</sup>,  
Hazel Daniel **Pablo López**<sup>5</sup>, Luis Fernando **Domínguez Correa**<sup>6</sup>

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, MÉXICO

<sup>1</sup> ORCID: 0009-0008-8435-1196 | igu@azc-uam.mx

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0009-9079-3799 | romy@azc.uam.mx

<sup>3</sup> ORCID: 0009-0001-0208-5111 | al2193041399@azc.uam.mx

<sup>4</sup> ORCID: 0009-0004-0709-7607 | al2192003055@azc.uam.mx

<sup>5</sup> ORCID: 0009-0001-8023-3298 | al2142001145@azc.uam.mx

<sup>6</sup> ORCID: 0009-0004-7585-5908 | al2182002000@azc.uam.mx

Recibido 05-06-2024, aceptado 25-07-2024.

### Resumen

En este artículo se exponen los requerimientos y el diseño de un cardán para la implementación de un sistema de transmisión 4X4, los vehículos con este sistema de transmisión de potencia son de interés para la industria automotriz, debido a que son capaces de transitar en terrenos difíciles. El problema por resolver es la implementación de este tipo de transmisión en el vehículo del ESCUADRÓN UAM 2023, esto debido a que el reglamento para la competencia BAJA SAE 2023 dicta que el tren de transmisión de potencia debe de ser 4X4. Además, en el artículo se ofrece una visión enfocada de los desafíos y consideraciones prácticas que se presentan al momento de construir un vehículo monoplaza para BAJA SAE. Se deben de diseñar todos los nuevos elementos para la transmisión de potencia a los ejes delanteros, entre ellos está el cardán, pieza fundamental pues sirve como eje de transmisión entre los ejes paralelos del vehículo ya sea de manera constante o no. Para el diseño del cardán se calcularon las fuerzas que transmitiría seguido de una selección de material y, posteriormente, realizar la simulación, tomando en cuenta la salida del motor y las reducciones que se encuentran antes del cardán. Con este artículo se espera obtener el diseño final del cardán, para posteriormente implementarlo en el vehículo para la competencia BAJA SAE MÉXICO 2023.

**Palabras clave:** BAJA SAE, cardán, diseño, ESCUADRÓN UAM 2023, simulación.

### Abstract

In this article, the requirements and design of a driveshaft for the implementation of a 4X4 transmission system are presented. Vehicles equipped with this power transmission system are of great interest because they can overcome challenging terrains. The implementation will take place in the ESCUADRÓN UAM 2023 vehicle, as the regulations for the BAJA SAE 2023 competition require a 4X4 powertrain. Furthermore, the article provides a focused view of the challenges and practical considerations that arise when building a single-seater vehicle for BAJA SAE. All new elements for power transmission to the front axles must be designed, including the driveshaft, a crucial component serving as the transmission link between the parallel axles of the vehicle, whether continuously or not. For the design of the driveshaft, forces to be transmitted were calculated, followed by material selection and subsequent simulation, considering the motor output and speed reductions that occur before the driveshaft. This article aims to obtain the final driveshaft design for subsequent implementation in the vehicle for the BAJA SAE MÉXICO 2023 competition.

**Index terms:** design, driveshaft, ESCUADRÓN UAM 2023, BAJA SAE, simulation.

## I. INTRODUCCIÓN

La competencia BAJA SAE es organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices a nivel internacional. Los estudiantes de ingeniería diseñan y construyen un vehículo todoterreno, en el cual ponen en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de su formación académica [1]. Dentro de este vehículo, la transmisión de potencia es uno de los elementos importantes a diseñar y de lo cual se enfoca este trabajo. El sistema de transmisión de potencia para el vehículo BAJA SAE consta de un motor conectado a una caja CVT (transmisión continua variable) [2], el diagrama de una CVT se muestra en la Fig. 1, que transmite la potencia a un diferencial con una salida para los ejes trasero y otro hacia una caja de engranes cónicos, la cual está conectada al cardán para llegar al diferencial delantero y por último a las flechas delanteras.

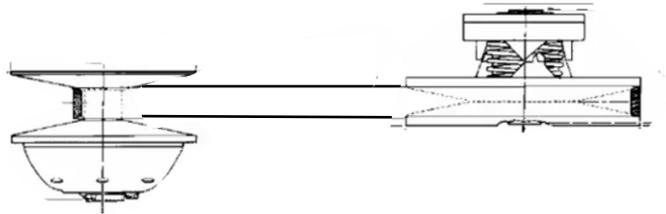


Fig. 1. Diagrama de una transmisión variable continua

El reglamento de la competencia BAJA SAE 2023 considera un cambio importante para la edición 2023, en el cual se estipula que todos los vehículos deben de contar con un sistema de transmisión de potencia 4x4 para poder competir [3]. En años anteriores, el equipo Escuadrón UAM competía con vehículos 4X2 [4, 5]. Por lo que se deberán de diseñar todos los nuevos elementos necesarios para transmitir la potencia a los ejes delanteros.

En los vehículos 4X2 utilizados para competir en ediciones anteriores, el sistema de transmisión de potencia constaba de un motor conectado a la caja CVT de la marca CVTech, que se conectaba al diferencial de la marca DANA, para transferir la potencia a las flechas traseras, lo cual se puede observar en la Fig. 2.



Fig. 2. Sistema de transmisión de potencia 4X2

Para implementar el sistema 4X4 se tomó como referencia el vehículo BAJA SAE del equipo de la Universidad VIT en la India del año 2022 [6]. Este sistema consta de las partes marcadas en la Fig. 3.

3

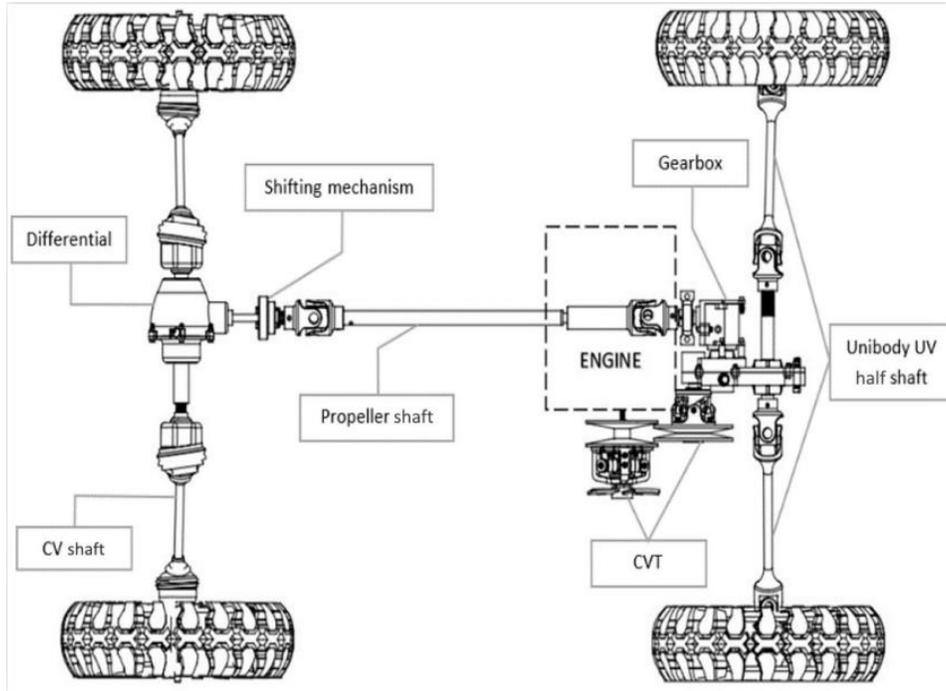


Fig. 3. Sistema de conversión 4x4 de la Universidad VIT [6]

Adicionalmente, se consideró el vehículo Mini BAJA SAE de la Universidad Pontificia Bolivariana [7]. Este sirvió como referencia, ya que considera el uso de un motor de 10 hp debido a que es un motor similar al de la competencia de este año. La diferencia es que, en este sistema, la transmisión de potencia se realiza mediante el uso de cadenas (véase Fig. 4).

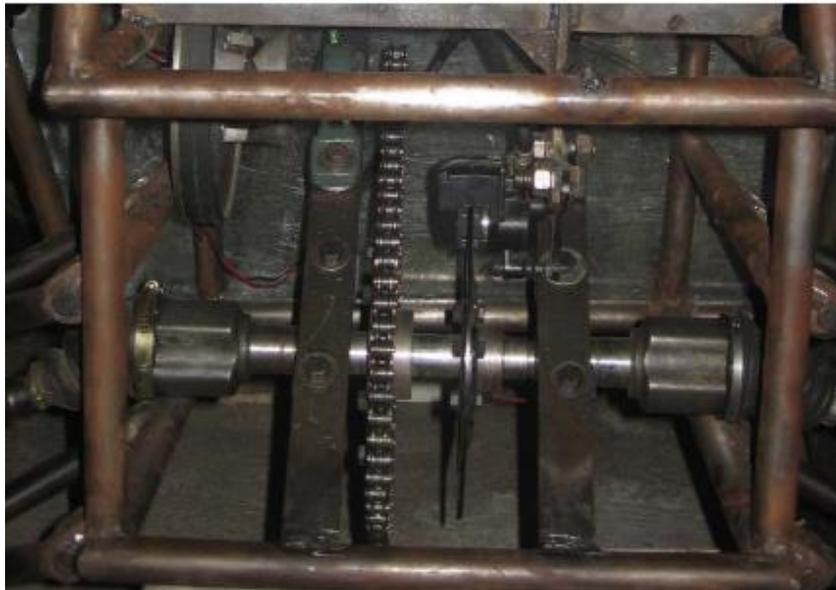


Fig. 4. Sistema de la Universidad Boliviana para la transmisión de potencia.

Para el vehículo se decidió seleccionar una caja CVT modelo Comet 790 y cambiar el diferencial DANA por un diseño propio, el cual fue maquinado mediante CNC. Este diferencial tiene un ángulo de salida de 90° que conecta el eje trasero con el diferencial delantero por medio del cardán, lo cual se puede observar en la Fig. 5.

4

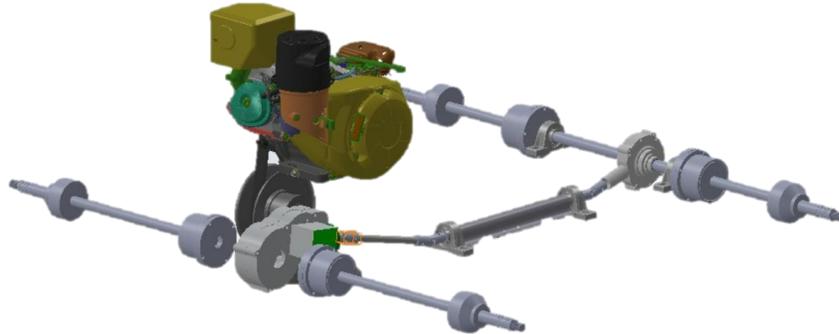


Fig. 5. Sistema de transmisión de potencia 4X4.

## II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

La potencia suministrada al vehículo se realiza mediante un motor donado por Fundación NEMI, el cual es especificado con las siguientes características [3]. Al motor se le instalará una placa de restricción en la toma de aire, conforme al reglamento, lo que hará que la potencia de salida es de 9.4 HP establecida por el reglamento del BAJA SAE y el cual es el factor importante para la transmisión de potencia (véase Fig.6).

- a) Modelo: Kohler CH440
- b) Potencia: 14 HP, restringida a 9.4 HP
- c) Torque: 18.5 ft-lb
- d) Velocidad: 3600 rpm



Fig. 6. Motor proporcionado por Fundación NEMI

Para la selección de la caja CVT se optó por seleccionar el modelo Comet 790, debido a que su relación de transmisión de potencia cuenta con una reducción mayor a comparación de la utilizada en años anteriores, por lo que proporciona un mayor torque, el cual era un objetivo para el vehículo de este año. En la Tabla 1 se muestra una comparación de la CVT utilizada en años anteriores con el modelo Comet 790.

TABLA 1  
COMPARACIÓN CAJAS CVT

Modelo	Relación de transmisión de velocidades		
	Baja	Alta	Global
Comet 790	3.38:1	0.54:1	6.26:1
CVTech AAB	3:1	0.45:1	6.66

5

Adicionalmente, se tomó la decisión de cambiar el diferencial DANA por una caja de engranes personalizada. Esto debido a que se tiene como objetivo disminuir el peso del vehículo. Las características requeridas en la caja de engranes se muestra a continuación:

- a) Reducción al cardán: 3.27:1
- b) Reducción a los ejes traseros: 9.3:1
- c) Peso: 7 kg

Para calcular el torque que transmite el cardán, se toman en cuenta los demás componentes del sistema de transmisión de potencia, empezando con el torque máximo que entrega el motor. Para realizar esto se usará la ecuación 1 (1).

$$\tau_{Cardán} = \tau_{motor} * R_{CVT} * R_{Caja} \quad (1)$$

En donde:

$\tau_{Cardán}$ : Es el torque que llegará al cardán.

$\tau_{motor}$ : Es el torque que entrega el motor.

$R_{CVT}$ : Es la reducción de la CVT.

$R_{Caja}$ : Es la reducción de la caja de engranes.

Se debe de tomar la reducción de 3.38:1 de la caja CVT debido a que es cuando se presenta un mayor torque. Debido a que bajo esta condición se podría presentar falla en el cardán. El siguiente paso en el diseño del cardán es la selección del material. Para esto, se tiene como objetivo contar con un cardán compacto, por lo que se buscaron materiales con alta resistencia a la cedencia. Los materiales comunes para este tipo de elementos se muestran en la Tabla 2 [8]. Adicionalmente, al proponer este parámetro al tener una resistencia mayor, se espera que el diámetro del cardán disminuya y esto produzca una disminución de peso.

TABLA 2  
MATERIALES PROPUESTOS PARA EL CARDÁN

Material	Propiedades del material		
	Temperatura (*F)	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)
1030 TyR	600	799.79	620.52
1060 TyR	800	1075.58	762.32
4140 TyR	1000	951.47	834.26

Una vez seleccionado el material Acero 4140 T y R se procedió con el diseño analítico del cardán. Para ello, se utilizaron distintos criterios de falla y se despejó el diámetro de la ecuación, se propuso un factor de seguridad de 3 y se obtuvo el diámetro a utilizar en las simulaciones. Para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones [9].

ED-Goodman (Ecuación 2 (2)):

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^3 \quad (2)$$

ED-Gerber (Ecuación 3 (3)):

$$d = \left( \frac{8nA}{\pi S_e} \left\{ 1 + \left[ 1 + \left( \frac{2BS_e}{AS_{ut}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Variables del criterio de ED- Gerber (Ecuación 4 (4) y Ecuación 5 (5)):

$$A = \sqrt{4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2} \quad (4)$$

$$B = \sqrt{4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2} \quad (5)$$

ED-ASME elíptica (Ecuación 6 (6)):

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ 4 \left[ \frac{K_f M_a}{S_e} \right]^2 + 3 \left[ \frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right]^2 + 4 \left[ \frac{K_f M_m}{S_y} \right]^2 + 3 \left[ \frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right]^2 \right\}^{1/2} \right)^{1/3} \quad (6)$$

ED-Soderberg (Ecuación 7 (7)):

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{yt}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^3 \quad (7)$$

Posteriormente, para el análisis del cardán se utilizó un software de simulación por método de elemento finito (ANSYS). El primer paso fue realizar el discretizado de la pieza, el cual se muestra en la Fig. 7. Este elemento consta de dos ejes conectados por juntas universales y los ejes están sostenidos por dos chumaceras. Debido a esto, el discretizado se realizó de manera libre y con elementos de alto orden. Adicionalmente, se hicieron elementos del tamaño de 5 mm con el fin de obtener un resultado confiable y considerando el tamaño de las piezas.



Fig. 7. Discretizado del cardán.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis del modelo, se sometió el cardán a las condiciones y resultados establecidos en la ecuación 1. De esta manera se obtuvieron los esfuerzos, desplazamientos, deformaciones unitarias y los factores de seguridad estáticos y a la fatiga producidos en el cardán. En la Fig. 8, se muestran los desplazamientos bajo las condiciones descritas anteriormente.

7



Fig. 8. Desplazamientos presentes en el cardán [mm].

En la Fig. 9 se muestran los esfuerzos generados en el sistema.



Fig. 9. Esfuerzos presentes en el cardán [MPa].

Por último, se determinó el factor de seguridad estático y dinámico para el cardán con el fin de determinar si los elementos soportarán las fuerzas a las que estarían sometidos. Los resultados de estas simulaciones se pueden observar en la Fig. 10 y Fig. 11.



Fig. 8. Factor de seguridad estático presente en el cardán.



8

Fig. 11. Factor de seguridad dinámico presente en el cardán.

Al calcular el diámetro del cardán con los diferentes criterios de falla y proponiendo un factor de seguridad 3, las ecuaciones nos dieron un valor aproximado de una pulgada de diámetro para el cardán, por lo que se utilizó este valor para realizar las simulaciones. Al aplicar en la simulación el torque que recibirá el cardán por medio del engrane cónico al cual está conectado. Se determina que el desplazamiento radial a lo largo de la pieza es mínimo. El intervalo de valores se encuentra entre 0.14 mm y 0.79 mm. Los esfuerzos presentados por la simulación que tendrá el cardán tienen variaciones desde los 90.44 MPa a 454.6 MPa. Por último, los resultados del factor de seguridad estáticos y dinámicos obtenidos por la simulación en el cardán son de 6.9585 y 3.3125 respectivamente en la zona del cardán, estos valores coinciden con los calculados teóricamente. Cabe mencionar que no se realizó una comparación de los datos analíticos y los numéricos, ya que las simulaciones fueron realizadas en conjunto de todos los elementos y no de manera individual. Una vez que se terminó toda la fase de diseño se procedió a construir e implementar el sistema en el Vehículo 4x4 como se muestra en la Fig. 12.



Fig. 12. Implementación del sistema de potencia

En la Fig. 13 se muestra el vehículo completamente armado y arrastrando una camioneta comercial sin problema.



Fig. 13. Implementación del sistema de potencia.

#### IV. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto se pudo diseñar, calcular y simular las dimensiones para el cardán del equipo Escuadrón UAM 2023, teniendo siempre en mente el objetivo de tener un cardán compacto. Adicionalmente, con el factor de seguridad establecido de 3 se garantiza que el elemento funcionara adecuadamente y será liviano en comparación si se utilizaran factores superiores a este el cual es un requerimiento para el diseño de vehículos. Se optó por el acero 4140 T y R para el cardán debido a sus propiedades mecánicas permiten obtener una resistencia adecuada y disminuir el peso y volumen del material, de esta manera se logra cumplir con uno de los objetivos el cual es disminuir el peso del vehículo. Si se compara el modelo de la universidad VIT con este diseño propuesto, se puede apreciar claramente una disminución en el tamaño de los elementos y se eficiente el sistema al seleccionar elementos como se las juntas y las cajas diferenciales propuestas. En comparación al sistema de la Universidad Boliviana, al cambiar de cadenas a un sistema de engranajes, se tiene una mejor tracción y no existe un tiempo de retardo como sucede al usar cadenas. Por lo cual este sistema tiene un mejor desempeño que los anteriores.

Por último, se realizaron las simulaciones para corroborar los valores calculados teóricamente. Una vez que se diseñó, se encontraron factores de seguridad superiores a tres lo que permite determinar que el componente funciona adecuadamente y por lo cual el sistema de potencia cumple con los requerimientos de diseño. En algunos puntos de la simulación se encontraron factores menores a uno, cabe destacar que donde se presentaban estos datos eran en las partes del sistema de transmisión que se compraron y no se fabricaron, esto se debe a que la mayoría de estos elementos no se contaban con las especificaciones y solo eran demostrativas en el elemento. Cuando se implementó y se construyó el sistema y vehículo, se pudo determinar que el sistema funcionaba muy bien ya que pudo cumplir con las pruebas establecidas en la competencia BAJA SAE.

Adicionalmente, se puede saber que los objetivos se cumplieron ya que se obtuvo un reconocimiento por parte de BAJA SAE en el cual se demuestra que el diseño de todos los elementos del vehículo fue el mejor (véase Fig. 14).



Fig. 14. Reconocimiento por el mejor desempeño

Cabe mencionar que no se realizó una comparación de los datos analíticos y los numéricos ya que las simulaciones fueron realizadas en conjunto de todos los elementos y no de manera individual.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, a la Rectoría General, a la Rectoría de Unidad, a la División de CBI, a la División de CyAD, al Departamento de Energía, al Departamento de Materiales y al Departamento de Electrónica por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] A. Adam, A. Austin A., B. Ian, B. Greg, C. Kyle, D. Ethan, G. Jonathan, K. Noah, L. Dandan, "USD Baja SAE, Reporte de Proyecto", Department: Shiley Marcos School of Engineering, 2024.
- [2] J. Martínez, D. Corona, S. Diaz, R. Boccardo, "Characterization of an Adjustable Centrifugal Continuously Variable Transmission for a Baja SAE Prototype. No. 2010-01-0861", *SAE Technical Paper*, 2010.
- [3] *Society of Automotive Engineers, 2023*, BAJA SAE Mexico Rules 2023, pp. 22-23.
- [4] C. R. Franco Suárez, D. García Mendoza, R. Saavedra Moreno, "Diseño e implementación del sistema de potencia ligero para el vehículo BAJA SAE UAM 2022," Proyecto de Integración, Universidad Autónoma Metropolitana, pp. 48-88, 223.
- [5] *Society of Automotive Engineers, 2018*, BAJA SAE Rules 2018, pp. 19.
- [6] C. Kannan, B. Ashok, D. Harshad, S. Agarwal, D. Kapoor, K. Akshat, A. Mathew, "Design, Analysis, and Simulation of a Four-Wheel-Drive Transmission for an All-Terrain Vehicle", *SAE technical paper series*. pp. 3-10, 2022.
- [7] C. A. Calderón Acuña, J. C. Ortiz Lievano, C. F. Patiño Castillo, O. F. Rodríguez Pico, "Diseño y construcción de un prototipo mini-baja SAE", Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2008, pp. 71-74.
- [8] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, McGraw Hill, Tabla A-21, 2012.
- [9] R. L. Mott, V. G. Pozo, S. S. Sánchez, A. H. Fernández, J. V. Sánchez, *Diseño de elementos de máquinas*, 2006.