VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Desarrollo conceptual del tren motriz de un vehículo off-road

Conceptual development of the drivetrain for an off-road vehicle

Elías Rigoberto Ledesma Orozco[1], Carlos Francisco Miranda López[2], Diego Roberto Rico Ayala[2]
1Ingeniería Mecánica.
2Ingeniería Mecatrónica.
elias@ugto.mx, cf.mirandalopez@ugto.mx, dr.ricoayala@ugto.mx

Resumen

Para que un vehículo sea capaz de avanzar o de responder a distintas condiciones de operación, es necesario implementar un tren motriz, el cual recibe la energía del motor y la convierte en movimiento. Se analizaron varios tipos de transmisión, donde se realizaron distintas matrices de decisión con el propósito de identificar la alternativa que mejor se adapte a un vehículo todoterreno tipo Baja. Posterior a la selección, diferentes ajustes fueron planteados para tener una mayor eficiencia y buena respuesta, implementando electrónica para un mayor control y precisión. Además, modelos matemáticos y simulaciones fueron desarrollados pensando en diferentes modos de operación. Un modelo 3D conceptual fue elaborado para representar la propuesta de manera visual.

Palabras clave: Tren Motriz; Vehículo todoterreno; Transmisión; eCVT; Baja.

Introducción

El tren motriz es el encargado de transmitir la potencia, a través de un mecanismo, del motor a las ruedas, provocando el movimiento del vehículo. La configuración del tren motriz influye directamente en la velocidad, el par entregado, el consumo y la capacidad de respuesta a diferentes condiciones [6, 9]. En vehículos tipo Baja, estos factores adquieren una mayor importancia, ya que se suelen desplazar sobre superficies muy irregulares, pendientes y ante cambios de carga.

El diseño de vehículos tipo Baja debe considerar condiciones exigentes, donde se puede llegar a requerir valores elevados de par o potencia. Es esta la razón por la que la transmisión no debe elegirse únicamente por su velocidad pico, sino que se debe considerar eficiencia, desempeño, su complejidad, el porcentaje de control disponible y sus limitaciones. [15].

El análisis abarcó diferentes tipos de transmisión, viendo su funcionamiento y comparando mediante criterios de selección. Los criterios consideraron que la transmisión seleccionada será utilizada en un vehículo de Baja SAE, donde, además de lo anteriormente mencionado, también importan las dimensiones y el peso que se agrega con la transmisión. En este tipo de vehículos suele usarse un motor de 14 HP. [11, 14].

Desarrollo

Tren motriz

El tren motriz es el mecanismo encargado de transmitir la potencia del motor a las ruedas y permitir el movimiento del vehículo.

El tren motriz suele estar conformado por:

1. Motor
2. Transmisión
3. Ejes
4. Diferenciales

El estudio considera un vehículo con tracción trasera, por ello la configuración incluye solo los siguientes elementos:

1. Motor
2. Transmisión
3. Reducción

La reducción será el último elemento del sistema, pasando directamente a las ruedas.

Transmisión

La transmisión es uno de los elementos principales del sistema, ya que este es la encargada de llevar la potencia a las ruedas de forma eficiente, permitiendo al vehículo adaptarse a las diferentes condiciones de manejo. Aunque el motor es capaz de llevar movimiento a las ruedas, operaría bajo una carga excesiva.

Transmisión manual

La transmisión manual es la más tradicional, la cual suele tener entre cinco y seis velocidades (aunque esto puede variar según su uso). El piloto controla la relación de transmisión realizando cambios manualmente. [8, 23].

Al ser utilizada en un entorno off-road, la transmisión manual puede resultar útil, debido a que en todo momento es posible controlar la potencia entregada a las ruedas, seleccionando directamente la relación de transmisión más adecuada para la situación. Si se requiere mayor par, se coloca una marcha Baja, ya que esta cuenta con la relación de transmisión máxima; en cambio, si se requiere mayor velocidad, se coloca en una marcha alta.

Sus principales desventajas son el espacio ocupado y el peso añadido, ya que en un vehículo de Baja SAE estos parámetros son muy importantes.

Transmisión automática

La transmisión automática funciona con presión hidráulica. Conforme el volante de inercia empieza a girar más rápido, el convertidor de torque hace lo propio generando fuerza centrífuga, que a su vez provoca el movimiento de todos los engranes. En este tipo de transmisión, el sistema detecta cuándo debe cambiar de marcha y lo hace sin intervención del piloto. [3]

La presión hidráulica es generada por un líquido de transmisión, el cual es capaz de generar dicha presión, pero también este líquido se encarga de lubricar los engranes de la transmisión.

Para uso en off-road esta opción resulta menos conveniente, ya que estas transmisiones suelen estar diseñadas para aceleraciones más agresivas, cosa que no siempre se busca en esos entornos. En cuanto a la implementación en un vehículo Baja SAE, se tienen las mismas desventajas que la manual, un volumen y peso excesivos, pero con una desventaja extra, su complejidad, ya que su reparación es más complicada y costosa.

CVT (Transmisión Continuamente Variable)

La CVT es una de las transmisiones más modernas. Esta alternativa no cuenta con engranes como las demás, sino que usa una banda y unas poleas que van ajustando constantemente la relación de transmisión, haciendo que el cambio de velocidad sea fluido. Esta configuración permite que el motor opere cerca de su zona de mayor eficiencia. [4].

Su funcionamiento convencional se basa en que a medida que las RPM del motor aumentan, la polea primaria cambia su diámetro, esto gracias a la fuerza centrífuga generada por el giro. Cuando la polea primaria cambia su radio efectivo, la tensión de la banda provoca que la polea secundaria también cambie el suyo, por lo que nunca se mantiene en una sola relación de transmisión, sino que varía constantemente. [7].

Para un vehículo tipo Baja, la CVT resulta la opción más adecuada, ya que las dimensiones son mucho menores que las otras transmisiones y el peso agregado es menor. Además, suele ser utilizada en vehículos todoterreno como los cuatrimotos.

Su desventaja radica en el poco control que puede tener el piloto y en diferentes entornos puede llegar a ser perjudicial.

Selección de la transmisión

Una matriz de decisión permitió comparar los diferentes tipos de transmisión. No obstante, la complejidad de la transmisión automática y su bajo aprovechamiento permitió su descarte, por lo que la comparación incluyó únicamente la transmisión manual y la CVT. La matriz se presenta en el Anexo A. [19].

La matriz mostró que la transmisión más adecuada para uso en un Baja SAE es la CVT, obteniendo 414 puntos frente a 369 de la transmisión manual. Además, es la más adecuada para ese uso, ya que por el tiempo prolongado de funcionamiento, es necesario que la transmisión mantenga el motor en sus puntos óptimos y eficientes.

La transmisión manual solo resulta viable si el peso y las dimensiones fueran menores, además de que el piloto debe ser capaz de estar concentrado y de realizar los cambios constantes sin perder tracción o incluso sin dañar la transmisión.

Sin embargo, la CVT admite una optimización adicional cambiando su forma de accionamiento.

Anteriormente se mencionó que la CVT cambia su relación de transmisión debido a la fuerza centrífuga, pero este sistema puede ser cambiado por un mecanismo accionado electrónicamente, lo que permitirá tener un mayor control sobre la transmisión. [1, 12, 18, 20, 21, 22]

La comparación incorporó tres alternativas de CVT electrónicas (eCVT) y una convencional, esto mediante un QFD (Despliegue de la Función de Calidad).

Las opciones de eCVT fueron las siguientes:

1. eCVT accionada con husillo.
2. eCVT accionada mediante una leva.
3. eCVT accionada mediante un actuador (hidráulico o neumático).

El análisis del QFD mostró que la incorporación de la electrónica sí traerá ventajas, como se muestra en la Figura 1, pero esto solo si se usa con husillo o con leva. Para tener un mejor criterio de decisión, se realizó una Matriz de Pugh (Anexo B) entre los dos mejores puntajes del QFD.

Estos datos determinaron que la transmisión utilizada será una CVT controlada electrónicamente mediante un husillo que es accionado por un motor DC. Además, se eligió conservar el resorte de la convencional, debido a que puede ayudar a reducir vibraciones y en caso de falla, ayudará a regresar a la CVT a su posición inicial para que el vehículo pueda seguir moviéndose con un par suficiente, aunque con poca velocidad. [10]

Esto permitirá controlar con mayor precisión y según las condiciones en las que se encuentre el vehículo, permitiendo incluso implementar modos de manejo.



Figura 1. *Resultados del QFD realizado.*

Modos de Operación de la CVT

Debido a que la transmisión elegida es controlada electrónicamente, el sistema puede operar en diferentes modos según las condiciones en las que se encuentre un vehículo, si este necesita más par o potencia, o si debe reducir la exigencia del motor.

La curva del motor, presentada en el anexo C, permitió definir los modos de operación mostrados en la Tabla 1.

Reducción

La transmisión por sí sola puede llevar la potencia a las ruedas, pero muchas veces el par que se entrega no es suficiente, incluso para poder mover el coche, por ello es necesario añadir un mecanismo el cual pueda ayudar a incrementar ese par.

Existen reductores planetarios, de engranes, de cadena y de poleas, pero es necesario buscar aquel que se adapte mejor a las necesidades de un vehículo Baja SAE. Para esto, se realizó una comparación con ayuda de un QFD (ubicado en el Anexo D). El QFD mostró a la caja de engranes como una mejor alternativa. [17].

La caja de engranes será la más adecuada debido a las exigencias en un Baja SAE. Un reductor planetario ofrece un buen desempeño, no obstante, al momento de implementar la reversa, este se vuelve demasiado complejo. El sistema de cadena o de banda tiene la desventaja de que se dificulta hasta un punto donde deja de ser viable. Sin embargo, la caja de engranes es la manera más sencilla de agregar una reducción y además incorporarle una opción de reversa y neutro. [5].

Diferencial

Cuando un vehículo va en línea recta, todas sus ruedas giran a la misma velocidad, pero al momento de producir un giro, las ruedas exteriores deben girar más rápido para recorrer más distancia en el mismo tiempo, haciendo que el comportamiento del vehículo sea uniforme.

Para que esto sea posible, se utiliza un diferencial, lo cual permite que cada una de las ruedas gire a una velocidad independiente según las necesidades. Sin embargo, este mecanismo puede perjudicar en el desempeño de un vehículo Baja SAE, porque en ciertas ocasiones puede reducir la tracción.

Por eso mismo la configuración propuesta elimina el diferencial del tren motriz, ya que esta decisión dará mejor tracción, menor peso, mayor simplicidad y un comportamiento más predecible. Además, este tipo de vehículos suele operar sobre suelo suelto y enfrentar obstáculos donde quedan ruedas al aire, condición en la que se puede reducir la capacidad de avance.

Resultados

Modelos matemáticos

La validación comenzó con un modelo cuasiestático elaborado en MATLAB/Simulink. Este modelo considera los principales factores que influyen en el comportamiento del tren motriz, entre ellos, la curva de un motor industrial a gasolina de 4 tiempos y 14 HP, con una cilindrada de 429 cm3; a su vez incorpora las principales fuerzas de resistencia propias del entorno, resistencia aerodinámica, resistencia a la rodadura y la componente gravitacional producida por la pendiente del terreno. [2, 13]

Si bien, MATLAB/Simulink cuenta con un bloque específicamente destinado a representar el comportamiento de una CVT convencional. En el sistema propuesto se optó por controlar la polea primaria mediante un mecanismo de husillo, lo que deja obsoleta la opción de usar un bloque genérico y genera la necesidad de una función propia para representar la geometría y el cambio de relación de transmisión en este prototipo. Esto se logró mediante los modelos cinemático y dinámico desarrollados analíticamente relacionando el desplazamiento axial con los radios efectivos de la polea primaria. A partir de esta función se realizó la actualización del modelo presentado en la Figura 2, incorporando los parámetros físicos y geométricos del tren motriz junto con la implementación de los modos de conducción y un control preliminar de la eCVT basado en mantener las RPM del motor dentro del intervalo definido para cada modo.

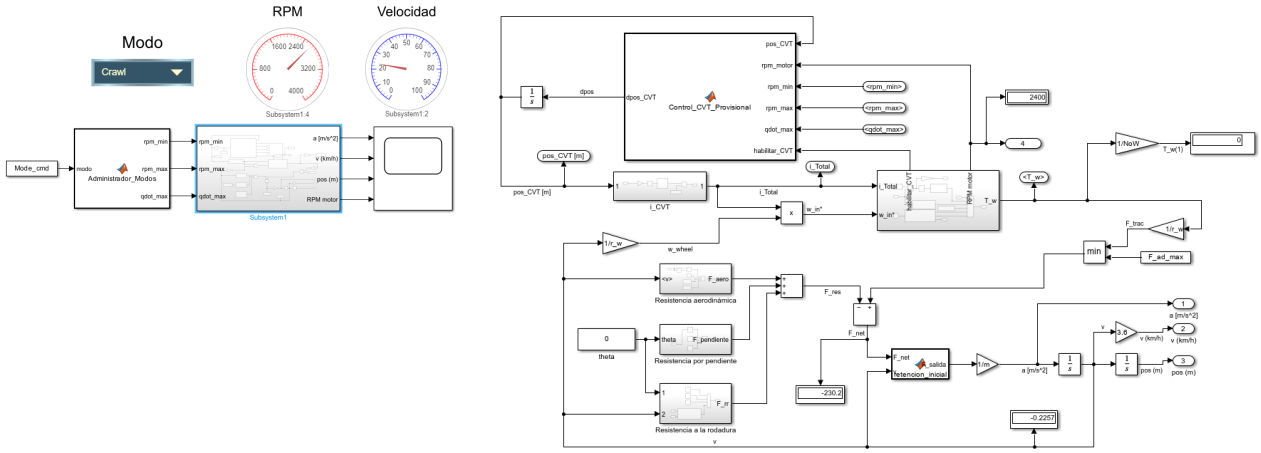
Este modelo supone un patrón de movimiento trapezoidal para el recorrido axial de la polea primaria, lo cual permite un movimiento más realista y evita un frenado abrupto del sistema, además, se introdujeron los parámetros geométricos obtenidos durante la optimización, así como las propiedades de la banda, la reducción final y los parámetros dinámicos del vehículo. Una vez establecida la estructura del modelo, la simulación evaluó los tres escenarios más críticos, poniendo especial cuidado en los valores numéricos de la carrera axial, la relación de transmisión del tren motriz, la aceleración, la velocidad, la posición longitudinal del vehículo, las RPM del motor y la trayectoria de operación sobre la curva de torque. [16].

Tabla 1. *Modos de operación de la eCVT.*

Modo	Rango de Operación (RPM)	Descripción
Race	2900 - 3200	Mantiene el motor cerca de la zona de máxima potencia, permitiendo tener mayor aceleración y una respuesta más rápida del vehículo. Los cambios de relación son más agresivos para lograr mantener el desempeño.

Crawl	2400 – 2600	Tiene como prioridad el par máximo del motor para poder superar obstáculos, pendientes pronunciadas, etc.
Endurance	2600 – 3000	Busca equilibrio entre par, potencia y eficiencia, esto manteniendo al motor cerca de su punto de máxima eficiencia, reduciendo el desgaste, la temperatura y el consumo. Este modo está pensado para un uso prolongado del vehículo.
Secuencial	Varias	El piloto tiene la opción de seleccionar manualmente las relaciones de transmisión predefinidas por el usuario, simulando así una transmisión secuencial.
Failsafe	*N/A*	Modo de respaldo en caso de falla electrónica, liberando el sistema electrónico de la CVT y dejando el mecanismo libre, permitiendo al vehículo continuar operando.

Las gráficas revelan que los tres escenarios son muy parecidos debido a que se usaron las mismas condiciones, sin embargo, la diferencia más sustancial se ve en el intervalo de RPM mantenidas. Los resultados muestran que la posición de la polea primaria no tiene la necesidad de recorrer toda su carrera para generar el funcionamiento óptimo, sumado a esto, los modos de Race y Endurance produjeron tiempos de aceleración razonables para la categoría en que se encuentran. Sin embargo, el modelo también permitió identificar uno de los mayores retos al continuar con este prototipo, siendo necesario reducir el tiempo de arranque del vehículo, más específicamente al comportarse virtualmente como un embrague en la primera etapa del sistema de control, así como optimizar el cambio en la relación de transmisión para generar inicialmente una mayor velocidad. En resumen, la simulación permitió comprobar la coherencia general del modelo, comparando los modos de conducción, así como una verificación general de la geometría preliminar del tren motriz.



(a) Administrador de modos e interfaz de monitoreo. (b) Modelo cuasiestático del tren motriz.

Figura 2. *Modelo cuasiestático del tren motriz en MATLAB/Simulink.*

Escenario A: Crawl

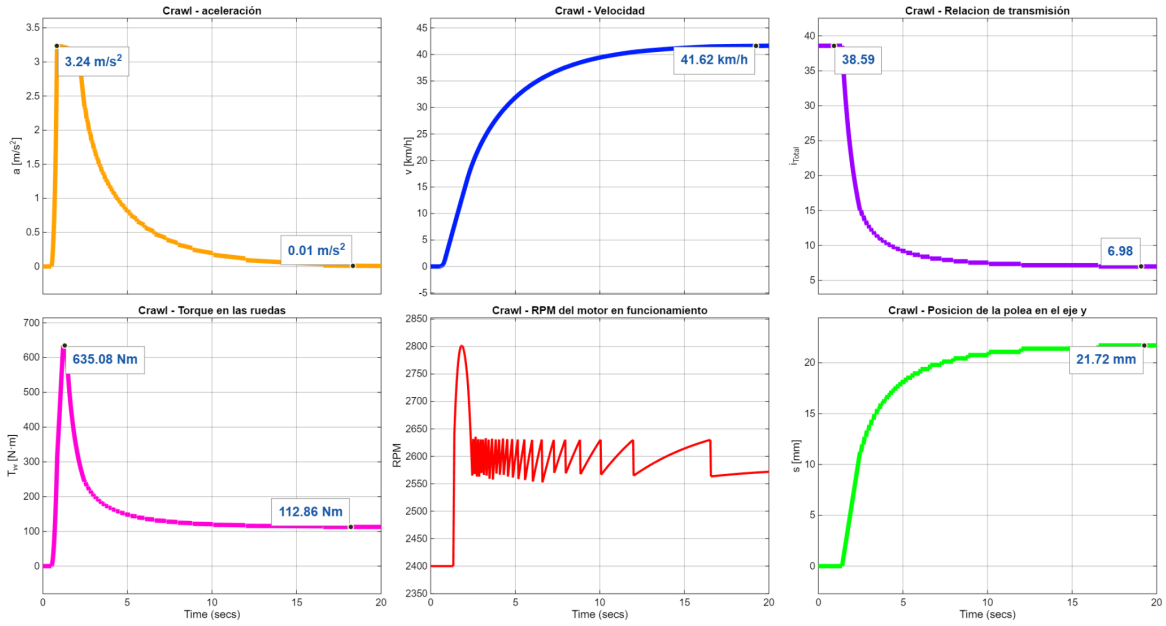


Figura 3. Resultados del escenario A: Crawl en terreno plano.

Escenario B: Endurance

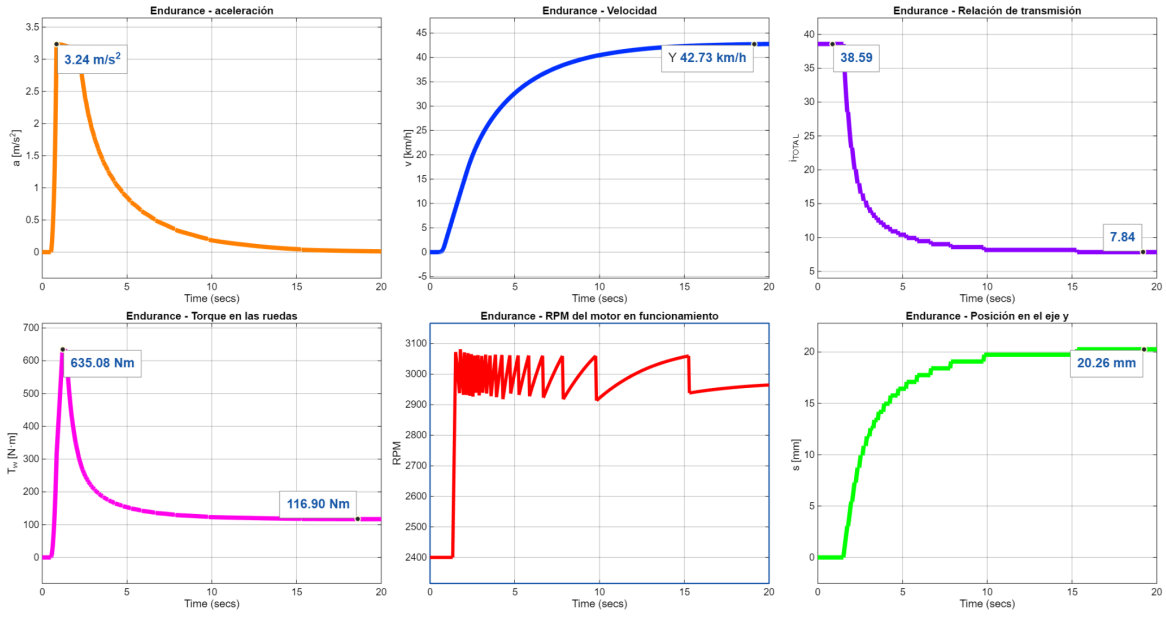


Figura 4. Resultados del escenario B: Endurance en terreno plano.

Escenario C: Race

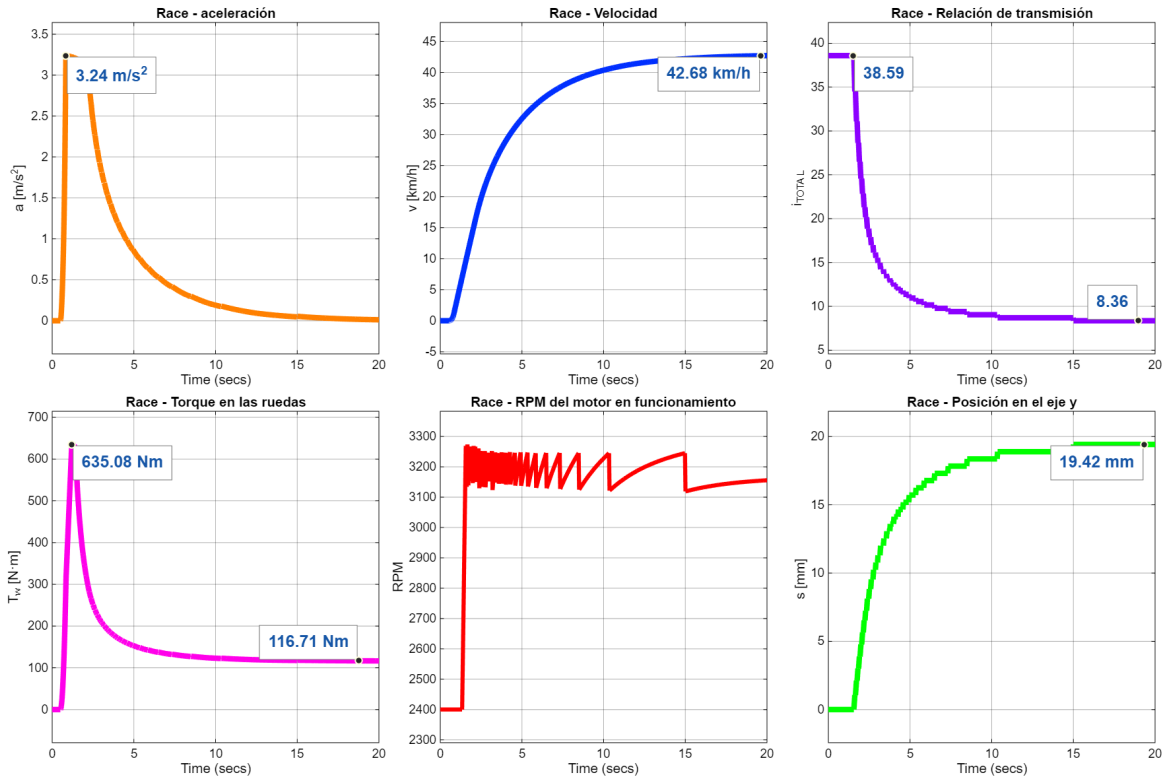


Figura 5. Resultados del escenario C: Race en terreno plano.

Modelos CAD conceptuales

A continuación, se muestran los resultados de los modelos 3D elaborados como propuesta para implementarse en el tren motriz.

eCVT

El diseño de la eCVT incorpora un motor DC y un husillo. Estos elementos accionan únicamente la polea primaria de la CVT.

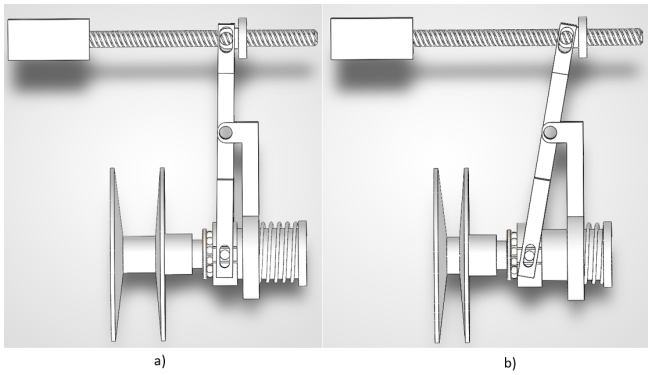


Figura 6. Modelo 3D de la polea primaria. a) Polea abierta. b) Polea cerrada.

En cuanto a la polea secundaria, se optó por un modelo comercial, el cual se muestra en la Figura 7.

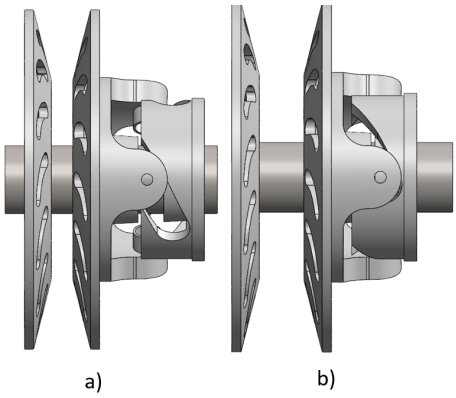


Figura 7. Modelo 3D de la polea secundaria. a) Polea cerrada. b) Polea abierta.

La Figura 8 presenta el modelo de la caja de engranes.

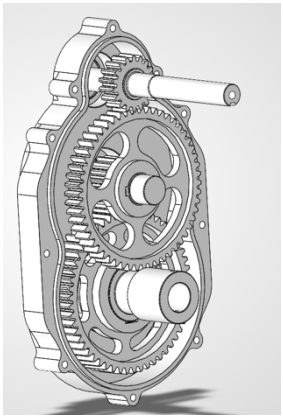


Figura 8. Modelo 3D de la caja de engranes.

La Figura 9 muestra el ensamble completo del tren motriz.

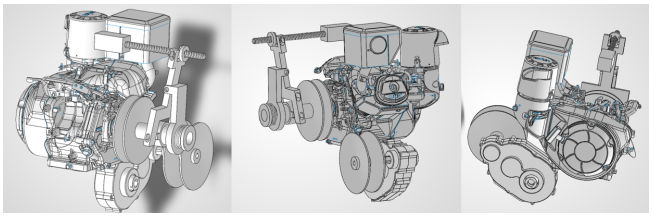


Figura 9. *Modelo 3D completo.*

Conclusión

El análisis permitió determinar la mejor configuración de un tren motriz para un vehículo todoterreno tipo Baja. La configuración implementa electrónica para lograr un mayor control en la relación de transmisión y adaptar el funcionamiento a distintos escenarios. El trabajo futuro buscará implementar mejoras a la transmisión, incorporando sensores que permitan el monitoreo de las variables del sistema e incorporará reversa a la caja de engranes.

Referencias

[1] Abbott, C. (s. f.). *Electronic CVT system.* https://coleabbott.xyz/ecvt

[2] Alakshendra, V., & Hahn, C. (2019, 5 de abril). *Modeling of a continuously variable transmission (CVT) BAJA all-terrain vehicle (ATV)* [Video]. MathWorks. https://la.mathworks.com/videos/modeling-a-vehicle-with-continuously-variable-transmission-1554467867519.html

[3] Bardahl México. (2020, 10 de julio). *¿Por qué los todoterreno siguen usando transmisión automática?* https://www.bardahl.com.mx/por-que-todoterreno-usan-transmision-automatica/

[4] Beachley, N. H., & Frank, A. A. (1979). *Continuously variable transmissions: Theory and practice* (Informe técnico UCRL-15037). Lawrence Livermore National Laboratory. https://doi.org/10.2172/5529813

[5] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's mechanical engineering design* (10th ed.). McGraw-Hill Education. https://glencoe.mheducation.com/sites/0073398209/information_center_view0/

[6] Cascajosa Soriano, M. (2015). *Ingeniería de vehículos: Sistemas y cálculos* (4.ª ed.). Editorial Tébar Flores. https://www.tebarflores.com/ingenieria/15-ingenieria-de-vehiculos-sistemas-y-calculos-4ed.html

[7] Conjuring *the most out of your continuously variable transmission (CVT) system.* (2020). [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=pUILsWvvIu0

[8] Fodsports. (s. f.). *Cuál es el mejor: ATV automático vs. manual vs. semiautomático.* https://fodsports.com/es/blog/atv-autom%C3%A1tico-vs-manual-vs-semiautom%C3%A1tico/

[9] Guerrero Moreno, J., & Nieto Carmona, L. (2018). *Tipos de transmisiones para el automóvil, y sus beneficios en eficiencia energética.* Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/313832/transmision.pdf

[10] Gürocak, H. (2016). *Industrial motion control: Motor selection, drives, controller tuning, applications.* Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118403211

[11] Kelley, J., Karg, R., Jorgenson, T., Najmy, J., & Brunmeier, K. (2019). *SAE Mini Baja: Frame & drivetrain* [Diapositivas de PowerPoint]. Northern Arizona University. https://sce.nau.edu/capstone/projects/ME/2019/19F8_SAEBajaVehicle/FR_DT_Presentation%203%20%281%29.pdf

[12] Maloney, L. (s. f.). *E-CVT.* https://www.lmaloney.com/project-page/e-cvt

[13] MathWorks. (s. f.). *Simulink Onramp* [Curso en línea]. MATLAB Academy. https://matlabacademy.mathworks.com/es/details/simulink-onramp/simulink

[14] Michigan Technological University. (2024). *103: Blizzard Baja Enterprise* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=q1KRup7IQuU

[15] Pano Sanjuan, C. (2020). *Evaluación de un vehículo tipo Baja SAE ante escenarios de impacto* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. https://ru.dgb.unam.mx/items/121cc8da-630c-49b5-9af2-6a6e6ea83024

[16] Rao, S. S. (2009). *Engineering optimization: Theory and practice* (4th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470549124

[17] Sah, A. M., & Farooqui, N. A. H. (2020). Design and analysis of gearbox for SAE BAJA competition. *International Journal of Engineering Research & Technology, 9*(5), 1029–1032. https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS050719

[18] Starkey, J. M., Manes, E. N., & Rumley, B. J. (2010). *Devices for electrically assisting and actuating continuously variable transmissions* (U.S. Patent No. 7,771,300 B2). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US7771300B2/en

[19] Tacle Humanante, D. A., Buenaño Moyano, L. F., Lema Tugtaguano, R. A., & Orozco Manya, R. J. (2021). Selección del motor y diseño de transmisión para un karting de competición interuniversitaria. *TECH Carlos Cisneros*, (2), 31–46. https://doi.org/10.59540/tech.vi02.11

[20] Tardif-Leblanc, R., Guilbeault-Sauvé, A., St-Martin, D., Lasnier, M., & Maurais, S. (2018). *Electromechanically actuated continuously variable transmission system and method of controlling thereof* (U.S. Patent Application Publication No. 2018/0172150 A1). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US20180172150A1/en

[21] Tardif-Leblanc, R., Guilbeault-Sauvé, A., St-Martin, D., Lasnier, M., & Maurais Filteau, S. (2020). *Electromechanically actuated continuously variable transmission system and method of controlling thereof* (U.S. Patent No. 10,711,888 B2). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US10711888B2/en

[22] University of Arizona College of Engineering. (2021). *21025—Electronic continuous variable transmission for Baja race car* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=5hqFz4WHBxI

[23] Verdeja, L. (2025, 28 de julio). *Transmisión manual, automática, CVT y más: ¿Qué tipo de transmisión es mejor para ti?* Radial Llantas. https://radialllantas.com/blogs/blog/%E2%9A%99%EF%B8%8F-transmision-manual-automatica-cvt-y-mas-que-tipo-de-transmision-es-mejor-para-ti

Anexos

Anexo A. Matriz de decisión de transmisión.

Matriz de Decisión - Transmisión.xlsx

Anexo B. Matriz de Pugh.

Matriz_Pugh.xlsx

Anexo C. Curva del motor.

Kohler-Baja_SAE_Engine_Performance_(1).pdf

Anexo D. QFD reductor.

QFF_Reductor.xlsx