



Efecto de un eje virable posterior en la maniobrabilidad y manejabilidad de una unidad de tres ejes

Oscar Flores Centeno
Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Mauricio Eliseo Cruz Acevedo
Luis Gerardo Sánchez Vela
David Vázquez Vega
José Ricardo Hernández Jiménez

**Publicación Técnica No. 601
Sanfandila, Qro, 2020**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Efecto de un eje virable posterior en la
maniobrabilidad y manejabilidad de una unidad de
tres ejes**

Publicación Técnica No. 601
Sanfandila, Qro, 2020

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el M.C. Oscar Flores Centeno, el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, el Ing. Mauricio Eliseo Cruz Acevedo, el Ing. Luis Gerardo Sánchez Vela, el M.C. David Vázquez Vega y el M.C. José Ricardo Hernández Jiménez. Su presentación es producto del proyecto EI 01/19 “Análisis del efecto del uso de un eje virable en la maniobrabilidad y manejabilidad de autobús de tres ejes”.

Se agradece la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de la CIVIE. De igual forma, se agradece el apoyo proporcionado por la empresa IRIZAR de México al facilitar el vehículo y su operador para la realización de las pruebas.

Contenido

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Sinopsis	vii
Abstract	ix
Resumen Ejecutivo	xi
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	3
Capítulo 2. Desarrollo	15
Capítulo 3. Resultados	25
Conclusiones	31
Bibliografía	33

Índice de figuras

Figura 1.1	Autobús y vehículo de carga de inicios del siglo pasado (izq.) contra unidades actuales (der.)	3
Figura 1.2	Unidades de carga circulando por calles estrechas	4
Figura 1.3	Vehículo de bomberos de principios del siglo XX con ultimo eje virable	5
Figura 1.4	Autobús con dos ejes frontales direccionables de 1922	6
Figura 1.5	Vehículo Stoewer R180 de 1936 con cuatro ruedas direccionables	6
Figura 1.6	Vehículo Mercedes Benz 170 VL	7
Figura 1.7	Autobús con dos ejes frontales direccionales	7
Figura 1.8	Vehículos japoneses con sistema de cuatro ruedas direccionales	8
Figura 1.9	Representación del giro de las llantas traseras con respecto a las delanteras	8
Figura 1.10	Vehículos de reciente modelo con sistema 4WS	9
Figura 1.11	Ejemplos de vehículos pesados con ejes virables	10
Figura 1.12	Eje virable comandado	11
Figura 1.13	Eje autovirable	11
Figura 2.1	Vista del vehículo de prueba	15
Figura 2.2	Relación de giro promedio del eje direccional y el eje trasero con respecto al volante de dirección	16
Figura 2.3	Esquema del vehículo con dimensiones	17
Figura 2.4	Antenas sobre el vehículo (izq.) y estación base (der.)	17

Figura 2.5	Sistema de medición ángulo del volante (izq.) y potenciómetro en eje virable (der.)	18
Figura 2.6	Unidad de medición inercial (izq.) y sistema de control y almacenamiento (der.)	19
Figura 2.7	Representación del área de barrido	20
Figura 2.8	Representación de las tres condiciones de viraje en un diagrama de manejabilidad	21
Figura 2.9	Vista aérea de zonas de prueba	22
Figura 2.10	Ejecución de pruebas a baja velocidad	23
Figura 2.11	Ejecución de pruebas a alta velocidad	23
Figura 3.1	Diagramas de manejabilidad durante el ascenso de velocidad en prueba de 60 m de radio	27
Figura 3.2	Diagramas de manejabilidad durante el descenso de velocidad en prueba de 60 m de radio	28
Figura 3.3	Diagramas de manejabilidad durante el ascenso de velocidad en prueba de 150 m de radio	28

Índice de tablas

Tabla 3.1	Comparativa de los radios internos obtenidos para ambas condiciones de prueba	25
Tabla 3.2	Diferencias obtenidas para el autobús B2	26

Sinopsis

En sus inicios, los vehículos automotores contaron con capacidad limitada para el transporte de mercancías y personas. Sin embargo, sus capacidades se incrementaron paulatinamente debido a la creciente demanda de sus servicios, agregando más ejes a las unidades. En algunas zonas se generó incompatibilidad con la infraestructura existente, como es el caso de los centros de las ciudades antiguas.

Los ejes virables traseros surgieron como una alternativa para poder desarrollar vehículos de carga y pasajeros con mayores dimensiones, que satisficieran la creciente demanda de transportación, permitiéndoles desplazarse por zonas con caminos estrechos. Sin embargo, es evidente que afectan el desempeño dinámico de las unidades, por lo que es necesario evaluar la conveniencia de su uso o no en alguna configuración en particular.

En este trabajo se presentan algunos resultados obtenidos de la evaluación experimental del uso de un eje virable posterior en una unidad de tres ejes, en términos del efecto en su maniobrabilidad y manejabilidad. Los resultados muestran que mientras se mejora la capacidad del vehículo para circular por zonas con poco espacio a baja velocidad, al circular a mayor velocidad se generan cambios en la condición de viraje, lo cual se debe tener en cuenta en los sistemas de control direccional para su mejor operación.

Abstract

In its beginnings, motor vehicles had limited capacity to transport goods and people. However, its capacities gradually increased due to the growing demand for its services, increasing the number of axles for supporting load. In some areas, incompatibility with the existing infrastructure was generated, such as the centers of old cities.

Rear-steering axles emerged as an alternative to develop larger cargo and passenger vehicles that would satisfy the growing demand for transportation, allowing them to move through areas with tight roads. However, it is evident that they affect the dynamic performance of the vehicles, so it is necessary to evaluate the convenience of their use or not in any particular configuration.

This paper presents some results obtained from the experimental evaluation of a three-axled vehicle unit with a rear-steering axle, in terms of the effect on maneuverability and handling. The results show that while the vehicle's ability to transit in reduced areas at low speed is improved, driving at higher speeds produces changes in its handling behavior, which must be taken into account in directional control systems better operation.

Resumen ejecutivo

Tradicionalmente, los vehículos automotores han contado con un eje con capacidad de orientar sus ruedas para definir la trayectoria a seguir, a través del accionamiento del mecanismo de dirección, comúnmente en el eje frontal. Con el propósito de mejorar su maniobrabilidad y poder contar con vehículos de mayor tamaño circulando por caminos angostos o espacios reducidos, a principios del siglo pasado surgió la innovación de colocar en ciertos vehículos más de un eje con la capacidad de virar sus ruedas en diferentes ángulos. Unos de los casos más típicos fueron los vehículos articulados de bomberos, los cuales contaban con el eje trasero virable controlado por un segundo operador, logrando de esta forma transportar escaleras más largas que les permitieran acceder a mayores alturas para sofocar los incendios.

Desarrollos posteriores permitieron accionar, a través de un solo mecanismo de dirección, tanto el eje direccional principal como el eje direccional secundario. Este sistema se implementó en autobuses con dos ejes frontales capaces de girar sus ruedas en conjunto, así como en vehículos ligeros de uso militar de dos ejes, en donde el eje trasero se orientaba en sentido opuesto al eje delantero. En este último, la función estaba disponible al circular a bajas velocidad, por lo que al aumentar la velocidad el eje posterior se desconectaba automáticamente.

Debido la complejidad de los mecanismos de accionamiento de los ejes traseros virables que, además, implicaban un aumento considerable de peso, su uso no se extendió a una gran cantidad de modelos. Es hasta la década de los 80's del siglo pasado que se desarrollaron sistemas de control hidráulicos y electrónicos, lo que permitió que se equiparan mayor cantidad de vehículos con estos sistemas, tanto ligeros como de carga pesada. En el caso de los vehículos ligeros, los sistemas de control permiten que a bajas velocidades los ejes traseros se orienten en sentido opuesto al eje delantero, logrando de esta forma reducir los radios de giro de las unidades. En contraparte, a velocidades mayores las ruedas traseras se orientan en la misma dirección que las delanteras, obteniéndose así mayor estabilidad en trayectorias de cambio de dirección. En la actualidad, dentro de este segmento, los sistemas 4WS (*Four Wheel Steering*) se encuentran en algunos modelos comerciales de pickups y vehículos deportivos.

Con respecto a los vehículos de carga pesada y autobuses, el uso de ejes virables traseros tiene la intención de reducir los espacios requeridos por estas unidades durante acciones a baja velocidad, como al virar en un cruce, en maniobras de estacionamiento y en zonas de carga y descarga de mercancías. En estos escenarios, los sistemas de control permiten que la orientación de las ruedas sea en sentido opuesto a las del eje direccional delantero. Otros beneficios reportados

del uso de estos ejes es la reducción del arrastre de las llantas, disminuyendo así tanto su desgaste como el de la infraestructura al generarse menores fuerzas laterales. Al circular a mayor velocidad (mayores a 40 km/h aproximadamente) los sistemas de control no permiten la orientación de las ruedas.

Actualmente, el uso de ejes virables adicionales es extendido en autobuses y en diversas configuraciones vehiculares de carga pesada, tanto unitarias como articuladas, principalmente en Europa. Sin embargo, en México su uso es mucho más limitado, aplicándose a convertidores tipo H de dos ejes, algunos vehículos unitarios de 4 ejes y, en años recientes, a autobuses de tres ejes, donde comúnmente el último es virable. Con esto, de acuerdo a la NOM-012-SCT-2-2017 estos autobuses tienen permitido tener una longitud total de 15 m, que es un metro mayor a aquellos que no cuentan con este mecanismo.

Con el propósito de conocer de mejor manera las implicaciones en el desempeño dinámico del uso de ejes virables en estas configuraciones de autobuses de circulación en el país, se desarrolló el presente estudio. En éste se evaluó de forma experimental el desempeño en la maniobrabilidad con pruebas a baja velocidad y el desempeño en la manejabilidad de un autobús de tres ejes con el tercero de ellos virable, con la opción para activar o desactivar esta función.

Los resultados muestran que, en lo referente a la maniobrabilidad, los radios de giro de la unidad se redujeron en un intervalo de alrededor de 0,5 m a 1,6 m al tener activa la función del eje virable trasero. Esto representa disminuciones del orden del 8 al 10%, permitiendo que el vehículo pueda realizar maniobras a baja velocidad en espacios más estrechos.

Con respecto a la manejabilidad, el uso del eje virable produce cambios en la condición de viraje al incrementarse la velocidad, lo cual se debe tener en cuenta en los sistemas de control direccional para su mejor operación. En la condición analizada el eje virable gira en sentido opuesto al eje de dirección para cualquier velocidad. Por tanto, sería importante en trabajos futuros abordar el análisis que considere variantes del sistema de control, configuración y posición del eje direccional posterior.

Introducción

Es de gran importancia para el desarrollo de las naciones contar con sistemas de transporte eficientes y seguros, que satisfagan la demanda existente para el traslado de mercancías y personas. Con tal de cumplir con este propósito y considerando que la demanda es cada vez mayor debido al incremento poblacional, los vehículos han estado en constante evolución, lo cual ha permitido contar con unidades de transporte de mayores capacidades que frecuentemente conlleva mayores dimensiones. Este incremento de dimensiones y capacidades de carga de los vehículos trajo consigo la alternativa de utilizar ejes adicionales para su soporte que, a su vez, produjo dificultades en su operación por la generación de arrastre en maniobras de cambio direccional, así como algunas incompatibilidades con la infraestructura de ciertos lugares. Casos de este tipo es el de algunas ciudades que cuentan con calles y carreteras estrechas, lo que dificulta el tránsito de vehículos de gran tamaño por estas zonas.

Una manera de mejorar la capacidad de desplazamiento por calles estrechas para vehículos largos y disminuir el arrastre lateral de los ejes, es mediante la implementación de ejes virables en la parte posterior de los mismos. Estos ejes permiten reducir los espacios requeridos por las unidades vehiculares en maniobras a baja velocidad, como al virar en cruceros, durante maniobras de estacionamiento o en zonas de carga y descarga. De igual forma, se reduce el desgaste de las llantas y de las carreteras, al disminuir el arrastre de las llantas y, por ende, las fuerzas laterales sobre el camino.

En varias regiones del mundo se utilizan diversas configuraciones vehiculares de carga pesada y autobuses con más de un eje direccional. Sin embargo, en México su uso es relativamente reducido, pues prácticamente se emplean ejes direccionales solamente en convertidores H, algunas unidades de cuatro ejes y en algunos autobuses de tres ejes de hasta 15 m de longitud, siendo común una longitud no mayor de 14 m para los autobuses que no cuentan con este sistema. No obstante, no se cuenta con información técnica suficiente acerca del efecto en el desempeño dinámico de estos vehículos al utilizar ejes virables traseros.

Con el propósito de contar con mayor información acerca del efecto del uso de ejes virables en el desempeño dinámico de los vehículos, en el presente trabajo se evaluó experimentalmente el comportamiento de un autobús de tres ejes, con el tercero de ellos virable. Dicho autobús cuenta con la opción de activar y desactivar la direccionalidad en el tercer eje, siendo posible analizar bajo condición de eje fijo y bajo condición de eje direccional y determinar así las diferencias existentes. La evaluación se realizó en términos globales de maniobrabilidad y manejabilidad, ejecutando maniobras circulares a baja velocidad para determinar espacios

requeridos por el autobús a diferentes ángulos del volante de dirección, así como a la capacidad de alineamiento a la trayectoria durante conducción a mayor velocidad. El desarrollo del estudio y los resultados se describen en el cuerpo de este escrito.

1 Antecedentes

Desde su comercialización masiva a inicios del siglo pasado, los vehículos de carretera se han posicionado a nivel mundial como el principal medio de transporte, tanto de mercancías como de personas. Tan solo en México, se estima que más del 80% de la carga y pasajeros se desplazan utilizando este medio de transporte, [1]. Por razones como éstas, los vehículos de autotransporte evolucionan constantemente para satisfacer la creciente demanda por sus servicios.

Uno de los aspectos en los cuales se ha dado la evolución de los vehículos de carretera, principalmente en vehículos de carga pesada y autobuses, es en lo referente a sus dimensiones y capacidades de carga. Estos vehículos pasaron de ser vehículos de dimensiones reducidas que contaban con motores capaces de mover magnitudes de carga menores a bajas velocidades, a ser vehículos de grandes dimensiones con motores capaces de desplazar cargas mayores a velocidades también más altas. En la Figura 1.1 se muestran imágenes donde se puede apreciar las diferencias entre un autobús y vehículo de carga de inicios del siglo pasado y sus contrapartes de modelos recientes. Resultan notorios los cambios existentes entre unos y otros.



**Figura 1.1 Autobús y vehículo de carga de inicios del siglo pasado (izq.)
contra unidades actuales (der.)**

Los vehículos no han sido los únicos en evolucionar. Las carreteras también han tenido que cambiar, aunque no lo han hecho al mismo ritmo que los vehículos. Los trazos geométricos y sus procesos constructivos han debido ajustarse para poder albergar y soportar estas unidades vehiculares de mayores dimensiones y cargas más pesadas. Sin embargo, no en todos los casos esto ha sido posible, habiendo aún carreteras y caminos estrechos por los cuales no pueden circular unidades de grandes dimensiones, viéndose entonces imposibilitado su tránsito por dichas vías.

Un ejemplo muy común de caminos estrechos se presenta en los centros históricos de muchas ciudades, cuya fundación se remonta a siglos atrás. En estas ciudades, los trazados se hicieron pensando en que por las calles circularían carretas tiradas por animales y, ante la imposibilidad de cambiar el trazo y geometría de las calles, los vehículos de grandes dimensiones dificultan su tránsito por ellas. En la Figura 1.2 se observan un par de imágenes en las cuales se aprecian unidades de carga circulando por calles estrechas, donde prácticamente ocupan la totalidad del ancho de la calle, dificultándose de esta forma su tránsito.



Figura 1.2 Unidades de carga circulando por calles estrechas

1.1 Ejes virables

Con el fin de mejorar y facilitar el desplazamiento de vehículos de mayores dimensiones por calles y caminos estrechos, entre la segunda y tercera década del siglo pasado se desarrolló la tecnología de ejes virables colocados en la parte posterior de los vehículos como complemento del primer eje encargado de direccionar al vehículo. Los primeros vehículos en utilizar esta tecnología fueron configuraciones compuestas por una unidad motriz y un semirremolque destinados para el uso de los bomberos, de forma que permitió transportar escaleras más largas al trasladarse sobre las calles de las ciudades. En este caso, el eje virable

se ubicaba en el semirremolque y, durante mucho tiempo, fue necesario contar con un segundo operador que se encargara de su funcionamiento, [2]. En la Figura 1.3 se aprecia un vehículo de bomberos de principios del siglo XX, en el que se observa el segundo operador sentado en la parte posterior del semirremolque con un volante para controlar el funcionamiento del eje virable.



Figura 1.3 Vehículo de bomberos de principios del siglo XX con último eje virable

A pesar de los beneficios observados en el mejoramiento en la maniobrabilidad, en esta primera parte del siglo pasado el uso de ejes virables en configuraciones vehiculares compuestas por más de una unidad no trascendió más allá de los vehículos de bomberos. Esto, debido principalmente a las implicaciones de tener dos operadores por vehículo. Sin embargo, fue en los vehículos unitarios donde se generaron algunos modelos de diferentes marcas que contaron con la tecnología de más de un eje direccionable. Tal es el caso de la empresa fabricante de neumáticos Goodyear, quien en 1922 fabricó un autobús de cuatro ejes donde los dos frontales se controlaban por un mecanismo de dirección que los hacía girar de forma similar. En la Figura 1.4 se muestra el autobús con dos ejes direccionales de Goodyear, donde es posible apreciar el movimiento de giro de los dos ejes frontales, cuyo mecanismo de dirección orientaba las ruedas en ambos ejes en el mismo sentido y en la misma proporción, [3].



Figura 1.4 Autobús con dos ejes frontales direccionables de 1922

Posteriormente, en la década de 1930 los fabricantes alemanes Stoewer y Mercedes Benz desarrollaron un par de modelos todoterreno militares, el R180 y el 170 VL respectivamente, en los cuales introducen la innovación de cuatro ruedas direccionables y motrices. De esta forma, logran mejorar la maniobrabilidad de esos vehículos, reduciendo notoriamente los espacios de maniobra requeridos y sus respectivos radios de giro. Una característica relevante es que, para transmitir el movimiento de la dirección a las ruedas posteriores, emplearon mecanismos puramente mecánicos. Además, para evitar afectaciones en la estabilidad de las unidades, a altas velocidades (a partir de los 30 km/h) los mecanismos se desconectaban. La producción de estos vehículos incluyendo este novedoso sistema se prolongó a lo largo de toda esa década. La Figura 1.5 muestra la imagen del Stoewer R180, [4].



Figura 1.5 Vehículo Stoewer R180 de 1936 con cuatro ruedas direccionables

El Mercedes Benz 170 VL se presenta en la Figura 1.6, de cuya imagen puede observarse claramente el funcionamiento del sistema de cuatro ruedas

direccionales. Puede apreciarse que las ruedas del eje trasero giran en sentido opuesto a las ruedas del eje delantero.



Figura 1.6 Vehículo Mercedes Benz 170 VL

En la década de los 60's se retoma el tema de contar con más de un eje direccionable, con la intención de mejorar el desempeño de la maniobrabilidad y poder disponer de vehículos más largos. Tal es el caso de los autobuses donde se fabrican unidades de cuatro ejes, con los dos primeros accionados por el mecanismo de dirección. Un claro ejemplo lo representó la compañía mexicana Sultana con el autobús de cuatro ejes y 12 llantas mostrado en la Figura 1.7, cuya fabricación comenzó en 1963, [5].



Figura 1.7 Autobús con dos ejes frontales direccionales

En el caso de vehículos ligeros, durante la década de los ochentas empresas japonesas como Mazda, Honda y Nissan, comercializan los modelos MX-6, Prelude y Highline, respectivamente, con cuatro ruedas direccionales. La Figura 1.8 muestra imágenes de estos modelos, presentados en el mismo orden, comenzando en la parte superior izquierda, [4].



Figura 1.8 Vehículos japoneses con sistema de cuatro ruedas direccionales

Estos vehículos introdujeron sistemas capaces de ajustar el sentido de giro de las llantas traseras. Para bajas velocidades el sistema producía que las ruedas traseras se orientaran en sentido contrario a las del eje delantero, mientras que a altas velocidades lo hacían en el mismo sentido. Lo anterior se ilustra en las imágenes de la Figura 1.9, apreciándose en el esquema de la izquierda el sentido contrario a bajas velocidades y, en el de la derecha, el giro en el mismo sentido para circular a altas velocidades (mayores a 40 km/h).

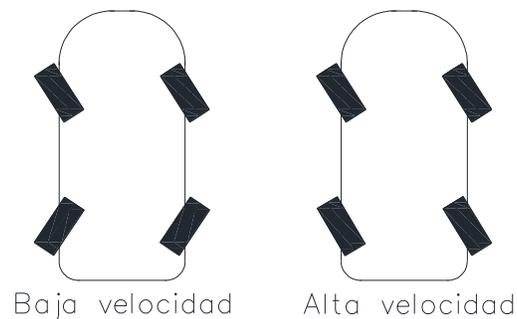


Figura 1.9 Representación del giro de las llantas traseras con respecto a las delanteras

Ya en fechas recientes, estos sistemas denominados 4WS (*Four Wheel Steering*) en vehículos ligeros, han sido incorporados por otras marcas en algunos de sus modelos. Tal es el caso de Ford y GM, que equipan vehículos tipo pick up con estos sistemas, mientras que fabricantes como Renault y Porsche, entre otros, lo

emplean en vehículos de gama deportiva. La Figura 1.10 presenta un par de vehículos de modelo reciente equipados con sistema 4WS.



Figura 1.10 Vehículos de reciente modelo con sistema 4WS

Con respecto a los vehículos de carga, los ejes virables se utilizan en una amplia variedad de configuraciones, que incluyen desde vehículos unitarios y autobuses hasta configuraciones articuladas y multiarticuladas. En este caso, los sistemas están configurados para actuar sólo a baja velocidad, mejorando así el desempeño de su maniobrabilidad, reduciendo las distancias requeridas para virar; a velocidades mayores, el sistema bloquea los ejes.

La Figura 1.11 presenta algunos ejemplos de la diversidad de configuraciones que emplean más de un eje virable. En la parte superior izquierda se muestra un tractocamión en el que sus tres ejes son virables; en el lado derecho se aprecia un autobús cuya particularidad es que sus cuatro ejes tienen capacidad de virar. Finalmente, en la parte inferior se observa el caso de un semirremolque de cuatro ejes, en el cual el primero y el último son virables. De acuerdo con la configuración geométrica y de seguimiento congruente de curvas, se define el sentido de giro de cada eje con esa capacidad.



Figura 1.11 Ejemplos de vehículos pesados con ejes virables

1.2 Funcionamiento de los ejes virables

El accionamiento de los ejes virables pasó de ser controlado mediante un segundo operador, como en los camiones de bomberos, a ser automatizado gracias a la acción de sistemas puramente mecánicos, los cuales transmitían el giro de las llantas del eje delantero hacia los ejes traseros. Posteriormente, se desarrollaron sistemas más sofisticados con accionamiento hidráulico o completamente eléctricos. Para el caso de vehículos de carga pesada, en la actualidad los sistemas más utilizados son los conocidos como dirección comandada o como de autodirección, [6].

1.2.1 Dirección comandada

En este sistema, la orientación de las ruedas del eje virable se ejecuta a una magnitud proporcional a la orientación de las ruedas del eje de dirección principal, accionado mediante medios mecánicos o a través de un sistema servo hidráulico. Esta magnitud depende de la ubicación de uno y otro eje, así como de la condición de operación del vehículo que, en ciertos escenarios puede ser bloqueada o llevada al límite. Un ejemplo de un eje virable comandado se presenta en la Figura 1.12, apreciándose al centro del eje el sistema servo hidráulico que acciona un par de barras que, a su vez, se encargan de cambiar la orientación de las llantas con respecto al eje longitudinal del vehículo, [7].

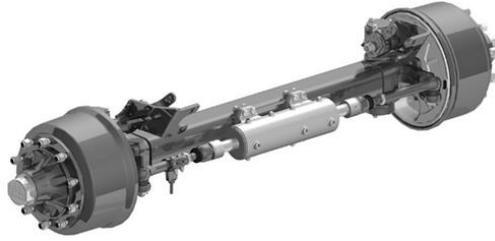


Figura 1.12 Eje virable comandado

1.2.2 Autodirección

En los ejes con autodirección, también conocidos como ejes autovirables, las ruedas cambian su orientación debido a las fuerzas laterales que se desarrollan entre las llantas y el camino. Generalmente, estos ejes no cuentan con alguna forma de control externo, salvo con un dispositivo o sistema que proporciona una fuerza restauradora para regresar el eje a la posición central. Por tanto, la magnitud del ángulo de orientación se limita a la magnitud resultante de la fuerza restauradora y de la fuerza aplicada lateralmente en su contacto con el piso. Un ejemplo de un eje autovirable se presenta en la Figura 1.13, contando con un amortiguador que facilita la restauración del eje a su posición original.



Figura 1.13 Eje autovirable

1.3 Efecto de los ejes virables en el desempeño dinámico de los vehículos

Resulta indudable que el comportamiento dinámico de una configuración vehicular se verá afectado al incorporar más ejes virables. En un sentido estricto, la respuesta direccional y estabilidad lateral son afectados por la capacidad de deformación lateral de las llantas lo que, a su vez, depende de sus propiedades mecánicas, de su presión de inflado (neumáticos), de su condición de carga y de su ubicación, entre otros factores. Durante la operación de un vehículo, su interacción física es sumamente variable y compleja, por lo que su respuesta presenta también complejidades en su análisis.

En diferentes regiones del mundo se han desarrollado una serie de estudios para evaluar las ventajas y desventajas de la inclusión de este tipo de ejes, esencialmente con la aplicación de modelos matemáticos. Estos estudios pueden

clasificarse de acuerdo al tipo de vehículos a los que se orientan, siendo, por una parte, los relacionados con el desempeño de vehículos ligeros y, por otra, aquéllos enfocados al análisis de configuraciones vehiculares de carga pesada y autobuses. En el caso de vehículos ligeros, los estudios se han orientado principalmente en determinar el efecto en el desempeño de los sistemas de cuatro ruedas direccionables (4WS), tanto al circular a baja velocidad, donde las ruedas del eje trasero giran en sentido opuesto al eje delantero, como al circular a alta velocidad, cuando todas las ruedas giran para orientarse en el mismo sentido.

Utbutt, [8], desarrolló un análisis mediante simulación numérica del desempeño de un vehículo con cuatro ruedas direccionables, en términos de maniobrabilidad a baja velocidad y del confort lateral al circular por autopistas a alta velocidad. Para el primer caso, simuló un par de maniobras para determinar la superficie de barrido y el comportamiento al girar en una intersección vial. Los resultados arrojaron una reducción del 14% en el área de barrido y un incremento del 12 % en el radio de curvatura para un ángulo de giro dado. Por otro lado, con respecto al desempeño a alta velocidad, los resultados mostraron reducciones en cuanto a las frecuencias causantes de molestia en los ocupantes del vehículo, del orden de 8,17% y del 18,16% con respecto a los pasajeros ubicados en el asiento trasero. Esto se debe a que las oscilaciones con respecto al eje vertical al seguir la trayectoria de cambio de carril disminuyeron.

De igual forma, Singh et al [9], desarrollaron, mediante el uso de un modelo numérico, un análisis del desempeño de un vehículo de cuatro ruedas con sistema direccionable en los dos ejes, al ejecutar una maniobra de cambio de carril para tres velocidades específicas, baja, media y alta. Los resultados obtenidos mostraron que, en bajas velocidades, con el giro de las ruedas traseras en sentido opuesto, se consiguieron giros más cerrados. Para altas velocidades, con todas las ruedas girando en el mismo sentido, se obtuvo mayor estabilidad durante el cambio de carril y menores oscilaciones del vehículo; esto, debido a que las ruedas traseras se alinean de mejor manera a la trayectoria seguida.

Con respecto a los vehículos de carga pesada, dadas las mayores magnitudes en pesos y dimensiones de los vehículos empleados, en diversas regiones del mundo se ha desarrollado gran cantidad de estudios para analizar los efectos del uso de ejes virables. Muchos de estos estudios se han enfocado principalmente a configuraciones articuladas para analizar su desempeño, considerando parámetros como la amplificación del coleo, despiste lateral y, marginalmente, abordando aspectos sobre la manejabilidad. Además, tratan cuestiones referentes a la productividad, como son los beneficios económicos al tener vehículos con mayores dimensiones y capacidad de carga, a los ahorros por menores consumos de combustible y reducción del desgaste de las llantas, [7]. En términos generales, se puede resumir de los resultados de estas investigaciones que la incorporación de ejes virables conlleva mejoras globales en el desempeño de los vehículos considerando también los aspectos de productividad, debido a los potenciales ahorros de combustible y una mayor vida útil de las llantas, [7].

En cuanto a estudios referentes a autobuses, éstos se han centrado al análisis de unidades articuladas, particularmente en entornos de operación urbana. En ese sentido, Kaneko et. al., [10], desarrollaron un sistema de control activo para un autobús articulado con todos los ejes direccionables empleando un modelo de simulación numérica combinado con pruebas reales utilizando un prototipo a escala del autobús. El propósito principal fue el de eliminar la invasión de carriles adyacentes durante maniobras de giro o de cambio de dirección, cuyos resultados reportaron como satisfactorios.

1.4 Uso de ejes virables en México

A nivel mundial, el uso de ejes virables se ha extendido a una gran variedad de vehículos y aplicaciones que incluyen desde automóviles hasta configuraciones vehiculares articuladas, pasando por vehículos unitarios de carga pesada y autobuses. En el caso del continente europeo, este tipo de ejes ha sido de gran ayuda debido a los trazados carreteros estrechos que hay en los centros antiguos de gran parte de sus ciudades.

No obstante, en México el uso de ejes virables es muy reducido, existiendo pocos casos de algunas configuraciones vehiculares que los usan. Entre esos, se pueden mencionar algunos vehículos vocacionales como las revolvedoras de cemento de cuatro ejes que circulan a nivel local, de los cuales los dos primeros son direccionales y están accionados de manera dependiente por el mecanismo de dirección. Otro ejemplo es el caso de los convertidores (*dollies*), unidades utilizadas para poder conformar configuraciones doblemente articuladas del tipo T-S-R que, en el caso común, requiere de un convertidor de dos ejes. Estos convertidores pueden ser del tipo A o H, dependiendo del tipo de enganche a la unidad precedente, con una o dos lanzas, respectivamente. Aunque el convertidor H presenta menor uso, una característica relevante es que generalmente cuenta con un eje autovirable, el cual se activa principalmente para maniobras de giro de la configuración a muy baja velocidad, pero se mantiene fijo para el resto de las operaciones. El motivo de su origen se remonta a la intención de disminuir el arrastre lateral de las ruedas y, por ende, reducir el desgaste de las llantas y el daño al pavimento.

Una de las restricciones de unidades de gran longitud son los problemas asociados a su maniobrabilidad en espacios reducidos, como el seguimiento de curvas cerradas, invasiones de carril en carreteras estrechas, giros en calles y acomodo en estacionamientos. En el caso de autobuses, la NOM-012-SCT-2-2017, establece una longitud máxima de 14 m que, para el caso de unidades de tres ejes, puede ser extendida a 15 m si se cuenta con un tercer eje direccional o movable, [11]. Con base en esta consideración, algunos fabricantes de autobuses han ofrecido unidades de tres ejes con el tercer eje virable y, así, aprovechar la máxima longitud de 15 m. Puesto que este tema es relativamente reciente en el país para este tipo de unidades, no se dispone de suficiente información que proporcione una idea de cuáles son las ventajas y desventajas del uso de estos

ejes virables en las configuraciones vehiculares de circulación en carreteras federales, de forma que se pueda disponer de información del desempeño que pueda ser de sustento para esas disposiciones y la conveniencia de su uso.

Por lo anterior, en este trabajo se presentan los resultados de la evaluación experimental del efecto del uso de un eje virable posterior en un autobús B3. Dicho análisis se hace en términos de los efectos en el desempeño de la maniobrabilidad y de la manejabilidad de la unidad, estableciendo condiciones de baja y alta velocidad, con magnitudes menores a 10 km/h y mayores a ese valor, respectivamente.

2 Desarrollo

El estudio, como se menciona anteriormente, se basa en el análisis experimental del efecto del uso de un eje virable posterior en el desempeño dinámico de un autobús B3, en términos de maniobrabilidad y manejabilidad. Con ese propósito, el vehículo se preparó para medir y registrar las principales características de interés de la unidad, empleando instrumentos de medición necesarios para registrar las variables cinemáticas del movimiento. En pista de pruebas se ejecutaron las maniobras definidas, se adquirieron los datos y se procesó finalmente la información para identificar el efecto del eje. A continuación, se describe a detalle cada uno de estos pasos.

2.1 Vehículo de prueba

El vehículo corresponde a un autobús de tres ejes con 8 llantas, del cual el tercer eje es virable del tipo comandado mediante mecanismo hidráulico. Ese eje virable, con opción de bloquear o desbloquear su capacidad de virar, correspondía al último de los ejes, justo detrás del eje tractivo con arreglo dual de llantas y que, a diferencia de éste, contaba únicamente con llantas sencillas. Su función de bloqueo y desbloqueo permitió analizar su desempeño con una y otra modalidad de operación y, de esta manera, establecer las diferencias en su desempeño dinámico. De acuerdo a la disposición de los ejes, siendo el primero y el último direccional, el sentido de orientación de las ruedas era opuesto, congruente geoméricamente con esa configuración. Una vista del autobús de prueba se presenta en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Vista del vehículo de prueba

Antes de realizar las pruebas en campo se midieron y registraron las principales características del vehículo que intervienen en la maniobrabilidad y en la manejabilidad, como su peso y dimensiones, la relación del sistema de dirección entre el volante y las llantas direccionales y la relación de giro del tercer eje, entre otras. En la condición presentada, de acuerdo a un pesaje en laboratorio se tuvo un peso total de 175,2 kN (17,86 t), con una distribución de 45,8 kN (4,671 kg) para el primer eje, 93,0 kN (9,48 t) para el segundo y 36,4 kN (3,71 t) para el tercero. La relación del sistema de dirección fue en promedio de 22,6:1 y la relación del giro del tercer eje de 0,15:1 con respecto a las llantas del eje direccional. En la Figura 2.2 se presenta gráficamente la relación del giro promedio de las llantas del eje direccional y del eje trasero virable con respecto al giro del volante de dirección, en ambos casos se identifica un comportamiento lineal para todo el intervalo de giro de la dirección, solo para el eje trasero se observa ligera pérdida de linealidad en los extremos de la gráfica.

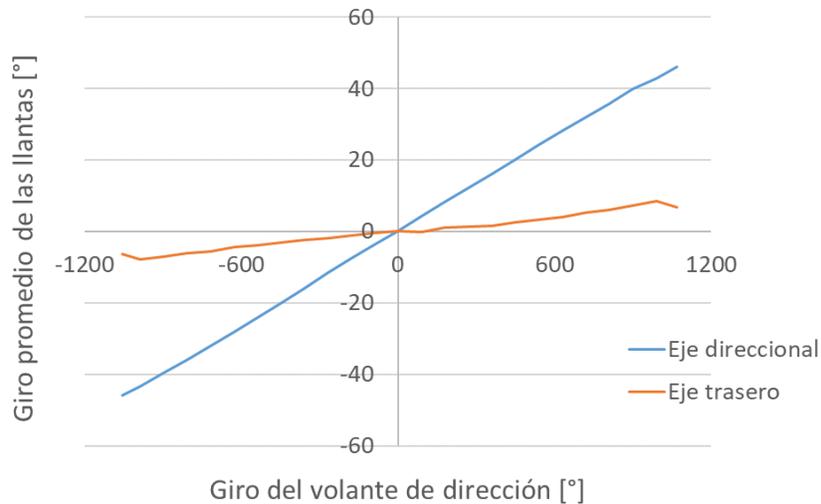


Figura 2.2 Relación de giro promedio del eje direccional y el eje trasero con respecto al volante de dirección

La Figura 2.3 muestra el esquema del vehículo de prueba con las dimensiones principales. Se observa una longitud total de 14 m, una distancia base entre ejes de 7,09 m y un ancho total (sin considerar los espejos retrovisores) de 2,57 m.

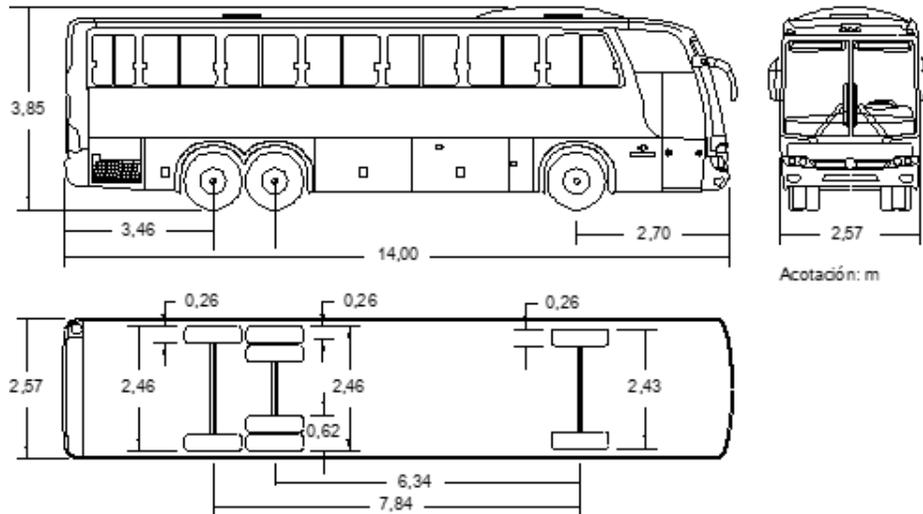


Figura 2.3 Esquema del vehículo con dimensiones

2.2 Instrumentación

Con el fin de obtener los indicadores del comportamiento dinámico del vehículo de prueba, es necesario tener el registro en tiempo de las variables cinemáticas involucradas en los parámetros de interés. Para este caso, se pueden mencionar la velocidad de avance y la trayectoria seguida por la unidad durante las maniobras de prueba. Para la medición y registro de estas variables se empleó un equipo basado en tecnología por GPS (*Global Position System*). Este equipo consiste en un par de antenas que se colocan sobre el vehículo (Figura 2.4, parte izquierda), cuyo sistema proporciona exactitudes en la medición del orden de $\pm 0,1$ km/h, con respecto a la velocidad y de ± 2 cm con respecto a la trayectoria. Esto, gracias a la sincronización de las antenas sobre el vehículo con una estación base fija, [12]. En la parte derecha de la Figura 2.4 se observa la estación base.



Figura 2.4 Antenas sobre el vehículo (izq.) y estación base (der.)

Otros parámetros de interés para medir y registrar son los relacionados al ángulo de giro de las llantas en los ejes direccionales, es decir, en el eje frontal principal y en el tercer eje, motivo principal del estudio. En el primer eje se utilizó un sistema que consta de un volante que se fija sobre el volante original del vehículo, como se

muestra en la Figura 2.5 (izq.). Este dispositivo permite tener el registro de la magnitud de giro del volante y, mediante la determinación de la relación de giro del sistema de dirección, el registro del ángulo de giro de las llantas.

Complementariamente, para medir el ángulo de orientación de las llantas del eje virable, se adaptó un medidor de desplazamiento lineal con un mecanismo retráctil. El medidor se fijó a un elemento rígido en el chasis del vehículo y el extremo del mecanismo de medición se sujetó sobre la barra transversal que transmite el movimiento lineal, que se transforma en el giro de las llantas. De esta forma, se relacionó el desplazamiento, y su cambio de voltaje, con el ángulo de orientación. En la Figura 2.5 (der.) se aprecia la colocación del dispositivo.



Figura 2.5 Sistema de medición ángulo del volante (izq.) y potenciómetro en eje virable (der.)

Adicionalmente, se colocó sobre el piso interior del vehículo una unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés), con el propósito de registrar las velocidades angulares y las aceleraciones lineales del vehículo generadas durante las maniobras de prueba, principalmente las correspondientes a alta velocidad. Esta unidad de medición se puede observar en la Figura 2.6 (izq.). La adquisición y sincronización de las señales provenientes de todos los sensores descritos se hizo mediante una unidad de control, mostrada en la Figura 2.6 (der.), la cual cuenta con una pantalla que se puede configurar para visualizar ciertos parámetros de interés durante la ejecución de la prueba. Con respecto a la velocidad de adquisición de las señales, ésta se fijó en una frecuencia de muestreo de 100 datos/s (100 Hz).



Figura 2.6 Unidad de medición inercial (izq.) y sistema de control y almacenamiento (der.)

2.3 Medidas de desempeño

Las medidas de desempeño dinámico de vehículos son parámetros estandarizados definidos para establecer criterios que permitan llevar a cabo de manera objetiva la comparación del comportamiento dinámico de un vehículo para ciertas condiciones dadas. En este estudio, para tal comparación se hace uso de la evaluación de la maniobrabilidad y de la manejabilidad. La descripción a mayor detalle de cada una de estas medidas se presenta a continuación

2.3.1 Maniobrabilidad

La maniobrabilidad se refiere a los espacios requeridos en una maniobra ejecutada normalmente a baja velocidad, de modo que representa el desempeño en situaciones de movimiento relativamente lento, como al momento de girar en intersecciones o cruces de calles, o las acciones realizadas para el acomodo en un estacionamiento o en zonas de carga y descarga, [13]. Uno de los parámetros comúnmente utilizados para evaluar la maniobrabilidad es el área de barrido, comprendida entre la trayectoria interna y externa de la configuración vehicular cuando en la maniobra se mantiene fijo el ángulo de orientación de las llantas direccionales, generando así una trayectoria circular, [14]. En la Figura 2.7 se presenta la representación del área de barrido.

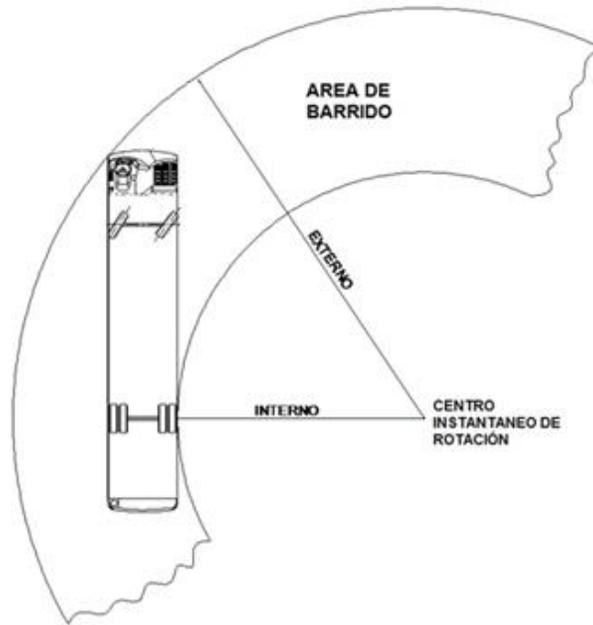


Figura 2.7 Representación del área de barrido

2.3.2 Manejabilidad

La manejabilidad, a diferencia de la maniobrabilidad, indica el comportamiento que tendrá el vehículo durante trayectorias curvas a alta velocidad, representando la capacidad del vehículo para alinearse a la trayectoria. Su representación puede ser a través de un diagrama que grafica la aceleración lateral contra la relación $\Omega_z L/V - \delta_f$. En la expresión, Ω_z es la velocidad angular respecto al eje vertical del vehículo, comúnmente conocido como coleo (yaw), L es la distancia base entre ejes, V es la velocidad de avance del vehículo y δ_f es el ángulo promedio de giro de las llantas del eje de dirección.

El diagrama de manejabilidad representa el comportamiento del viraje del vehículo, que se refiere a la respuesta de ajuste de la orientación del cuerpo del vehículo conforme a la trayectoria que siguen las llantas direccionales a una determinada velocidad. Un comportamiento con pendiente positiva indica que la respuesta del vehículo es rápida, por lo cual será necesario girar menos las ruedas direccionales para seguir la curva deseada, refiriéndose esta respuesta a una condición de sobreviraje. Si el comportamiento gráfico se describe como una pendiente vertical, es decir, infinita, se presentará una condición de viraje neutral, que se refiere a una respuesta en la alineación del cuerpo del vehículo uniforme y proporcional al giro de las ruedas direccionales independiente del valor de aceleración lateral producida. Finalmente, si el comportamiento muestra una pendiente negativa, la condición resultante será subviraje, que representa una respuesta lenta de la unidad para alinearse a la trayectoria, siendo necesario incrementar el ángulo de las llantas direccionales para poder seguir el trazo de la curva, [15]. Cabe mencionar que la condición de viraje no necesariamente es

única, sino que un mismo vehículo puede presentar diversas condiciones conforme haya cambios en la aceleración lateral que soporte la unidad. Esta situación se ejemplifica en el diagrama de manejabilidad mostrado en la Figura 2.8 donde se indican los cambios en la condición de viraje, representándose las tres condiciones en el mismo diagrama.

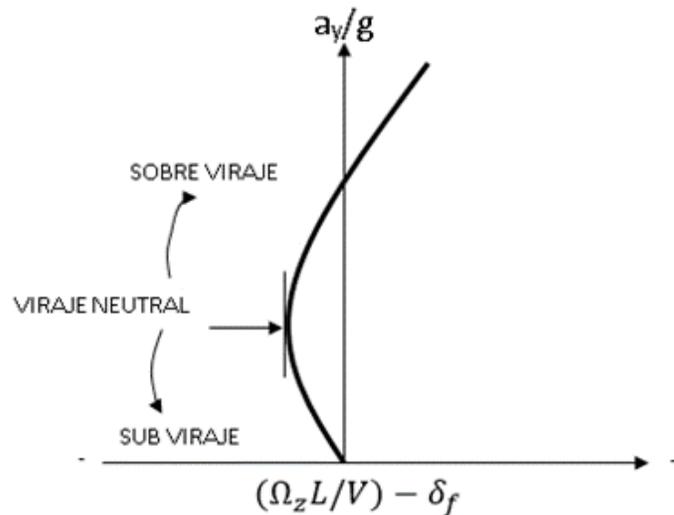


Figura 2.8 Representación de las tres condiciones de viraje en un diagrama de manejabilidad

2.4 Ejecución de maniobras de prueba

Con el fin de obtener los parámetros necesarios para establecer las medidas de desempeño seleccionadas para hacer la evaluación del comportamiento dinámico del autobús, se ejecutaron dos maniobras de prueba diferentes, una a baja velocidad y otra a mayor velocidad. En ambos casos, las maniobras describieron una trayectoria circular, las cuales se ejecutaron en la Pista de Pruebas del Instituto Mexicano del Transporte.

2.4.1 Área de pruebas

Estas maniobras se desarrollaron sobre tres zonas de la pista de pruebas del IMT. La maniobra a baja velocidad se llevó a cabo sobre una plataforma plana cuasi-ovalada con dimensiones de 90 m por 60 m aproximadamente, donde el autobús se pudo desplazar libremente. La maniobra a alta velocidad se ejecutó sobre un par de tramos circulares con radios de 60 m y 150 m. Cabe señalar que estos tramos cuentan con una pendiente transversal de 2% con inclinación hacia el centro, cuyo propósito es evitar la acumulación del agua sobre la superficie. Tal

pendiente se considera de efecto poco significativo sobre el desempeño del vehículo en las maniobras de evaluación. Una vista aérea de las tres zonas de prueba se puede apreciar en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Vista aérea de zonas de prueba

2.4.2 Giro a baja velocidad

Esta maniobra, desarrollada sobre la plataforma plana, consistió en aplicar un giro al volante a un ángulo definido y, así, sobre las ruedas direccionales principales, manteniéndolo fijo mientras el vehículo se desplazaba a baja velocidad (por debajo de 5 km/h). Como resultado de ese desplazamiento se generó una trayectoria circular, cuya superficie barrida por la unidad se obtuvo a través de la determinación del radio interno y del externo de las trayectorias descritas respectivamente por la rueda posterior interna y la rueda delantera externa al giro. Las pruebas se realizaron a tres ángulos definidos de giro del volante, correspondientes a la máxima amplitud de giro del volante permitida por el mecanismo de dirección, a dos vueltas de giro (720°) y a vuelta y media (540°), realizadas en ambos sentidos: giro a derecha (en sentido del reloj, CW) y en giro a izquierda, (CCW) se omitió la prueba a 540° debido a falta de espacio para lograr dar la vuelta completa para la condición de eje bloqueado. La maniobra se ejecutó, en cada situación, manteniendo el tercer eje con la dirección activa, en un caso, como con la dirección bloqueada, en el caso alterno. En la Figura 2.10 se observan imágenes durante la realización de las pruebas con el eje bloqueado (izquierda) y con el eje libre para virar (derecha).



Figura 2.10 Ejecución de pruebas a baja velocidad

2.4.3 Seguimiento de curva a alta velocidad

La maniobra de seguimiento de curva a alta velocidad se ejecutó en las pistas circulares del IMT. Su desarrollo requiere partir del reposo e incrementar gradualmente la velocidad mientras se sigue la trayectoria circular, hasta alcanzar la velocidad impuesta como objetivo, en la cual el operador mantiene el control direccional del vehículo de manera segura. Posteriormente, se libera el pie del acelerador y se permite que el vehículo continúe sobre la misma trayectoria mientras se reduce la velocidad paulatinamente hasta alcanzar el reposo o una velocidad muy baja, comúnmente debajo de los 10 km/h. La maniobra se ejecutó en ambos sentidos de circulación y para ambas condiciones de prueba; es decir, con el eje direccional posterior bloqueado y con dirección activa. De esta maniobra se obtuvieron los parámetros necesarios para elaborar los diagramas de manejabilidad. En la Figura 2.11 se encuentran un par de vistas del autobús realizando la maniobra en ambos sentidos de circulación.



Figura 2.11 Ejecución de pruebas a alta velocidad

3 Resultados

Después de realizar las maniobras de prueba, se procedió a llevar a cabo el procesamiento de los datos generados. A partir del análisis se establecieron las medidas de desempeño seleccionadas sobre el comportamiento del autobús, tanto al tener el tercer eje virable libre, como bloqueado y, así, establecer el efecto del uso de este tipo de ejes. Los resultados se presentan de manera comparativa con base en las medidas de desempeño para cada caso de estudio y las diferencias existentes entre sí. En primera instancia se muestran los resultados para la maniobrabilidad y, posteriormente, el caso de la manejabilidad.

3.1 Maniobrabilidad

En la Tabla 3.1 se presenta la comparativa de los resultados obtenidos para los radios internos y externos producidos por el autobús durante la maniobra a baja velocidad para ambos casos de prueba; es decir, con el eje virable libre y fijo. Lo anterior, para cada magnitud de giro del volante de dirección probado en ambos sentidos de rotación. De igual forma, se presenta el giro promedio real de las llantas del eje direccional y el ángulo de orientación resultante de las llantas del eje virable (para la condición de eje libre). En este caso, se hace la indicación del sentido de giro y se observa que los giros son en sentido opuesto al giro del eje direccional.

Tabla 3.1 Comparativa de los radios internos y externos obtenidos para ambas condiciones de prueba

Sentido de giro	Giro del volante [°]	Giro eje direc, [°]	Giro 3er eje [°]	Radio interno [m]		Radio externo [m]	
				Eje fijo	Eje libre	Eje fijo	Eje libre
CCW	1080	47.9	6.9 (CW)	6.29	5.76	11.98	11.36
	720	32.6	5.2 (CW)	11.31	10.21	15.99	14.97
CW	1080	47.0	6.4 (CCW)	6.56	6.04	12.2	11.69
	720	32.4	5.7 (CCW)	11.66	10.56	16.42	15.35
	540	24.5	4 (CCW)	16.7	15.06	21.1	19.39

Las diferencias para los radios internos y externos son presentadas en la Tabla 3.2, expresadas de manera absoluta y de manera relativa. Se puede destacar que para ambos sentidos de giro del volante se presentan valores similares y que las diferencias van desde alrededor de 0,5 m hasta poco más de 1,7 m, lo cual representa alrededor del 8% al 10% de reducción en el radio interno y del 4% al 8% para el radio externo, al permitir que el eje virable gire.

Tabla 3.2 Diferencias obtenidas para los radios internos y externos

Sentido de giro	Giro del volante [°]	Radio interno		Radio externo	
		Diferencia [m]	Diferencia [%]	Diferencia [m]	Diferencia [%]
CCW	1080	-0.53	-8.43	-0.62	-5.18
	720	-1.10	-9.73	-1.02	-6.38
CW	1080	-0.52	-7.93	-0.51	-4.18
	720	-1.10	-9.43	-1.07	-6.52
	540	-1.64	-9.82	-1.71	-8.10

Con estos resultados se cuantifica el mejoramiento del desempeño de maniobrabilidad del autobús al utilizar un eje virable en la parte posterior de la unidad, en la configuración y separación del autobús utilizado. Esta información permite establecer si el vehículo puede o no circular por alguna zona en específico, que tenga limitaciones de espacio disponible para tal efecto.

3.2 Manejabilidad

La determinación del desempeño de manejabilidad del autobús se obtuvo de la información recabada de las pruebas en círculo incrementando y disminuyendo gradualmente la velocidad. A partir de estos datos se establecieron los diagramas de manejabilidad que permiten definir la condición de viraje. Como se menciona anteriormente, las pruebas a alta velocidad se llevaron a cabo en dos secciones circulares de diferentes dimensiones, una con radio de 60 m y otra con radio de 150 m. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada caso.

3.2.1 Prueba en círculo con radio de 60 m

Puesto que la maniobra inicia del reposo acelerando el vehículo hasta alcanzar un máximo de velocidad y, posteriormente, se desacelera hasta que vuelve al reposo, es posible analizar cada repetición de la prueba en dos fragmentos, uno con respecto al ascenso de velocidad y otro con respecto al descenso. En la Figura 3.1 se observan los diagramas correspondientes a la parte de ascenso de velocidad. Se indica en la imagen izquierda el diagrama obtenido durante la prueba cuando el eje virable se mantuvo fijo y en la imagen derecha cuando el eje permaneció libre.

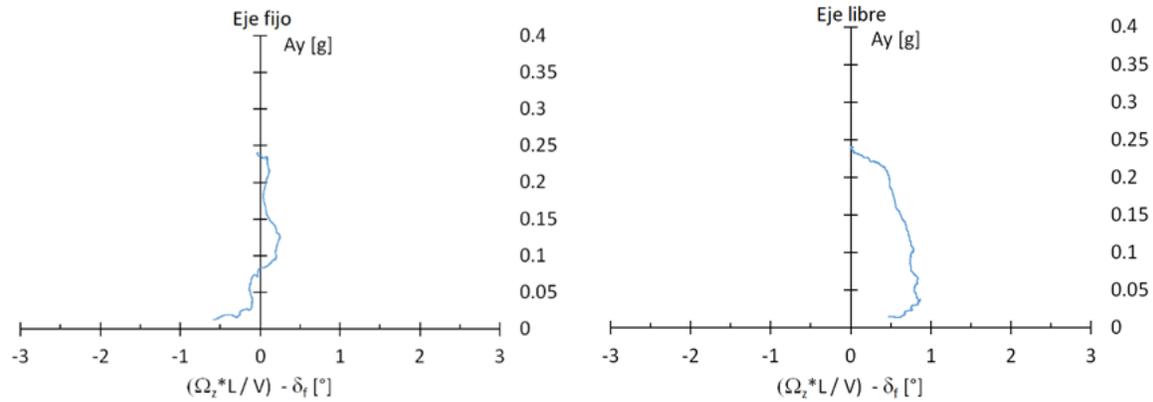


Figura 3.1 Diagramas de manejabilidad durante el ascenso de velocidad en prueba de 60 m de radio

En el primer diagrama se observa que para bajas velocidades se genera sobreviraje que cambia alrededor de 0,1 g's con tendencia al viraje neutral, principalmente. Conforme se fue incrementando la velocidad se presentan algunas oscilaciones menores que pueden deberse a las correcciones en el volante que el operador realizó. Para el segundo diagrama, la gráfica inicia en el cuadrante de sobreviraje y a bajas velocidades tiende a mayor sobreviraje, es decir, el vehículo responde más rápido a entradas en el volante de dirección, hasta alrededor de 0,05 g's. Posteriormente, conforme se incrementa la velocidad (y por ende la aceleración lateral que experimenta el vehículo), la pendiente del diagrama cambia gradualmente para representar subviraje.

Los diagramas de manejabilidad correspondientes a la segunda parte de la maniobra, donde la velocidad se va reduciendo paulatinamente sin el uso del sistema de frenos del autobús, se presentan en la Figura 3.2. De nueva cuenta, el diagrama de la parte izquierda corresponde a la prueba con el eje virable fijo, mientras que el diagrama en la parte derecha corresponde a la prueba con el eje libre.

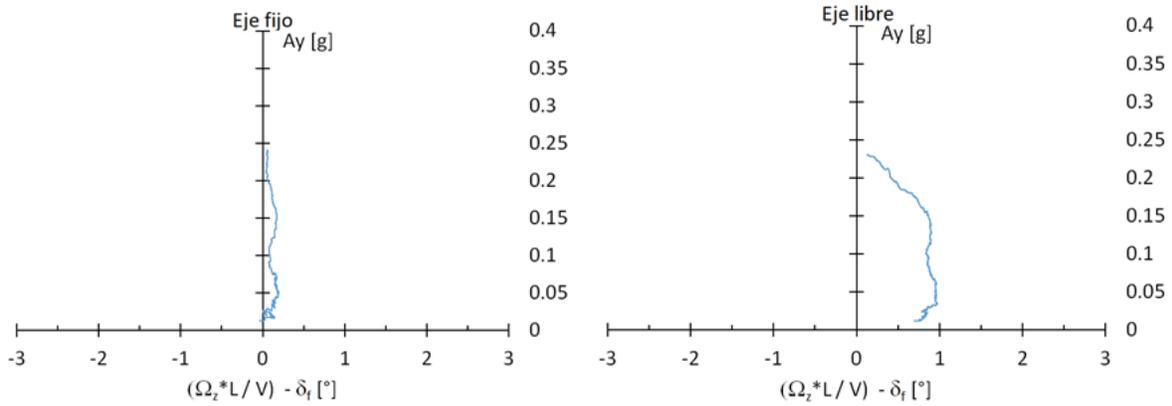


Figura 3.2 Diagramas de manejabilidad durante el descenso de velocidad en prueba de 60 m de radio

Como se aprecia, estos diagramas son muy similares a los correspondientes a la primera parte de la prueba durante el incremento de la velocidad. De igual forma, cuando el eje se mantuvo fijo se confirma la tendencia al viraje neutral, para este caso prácticamente durante todo el intervalo de la aceleración lateral. Por otro lado, para la segunda parte de la prueba con el eje libre, nuevamente se observa la tendencia al sobreviraje para niveles bajos de aceleración lateral, condición que va cambiando al subviraje para niveles mayores de velocidad, pasando por un intervalo de viraje neutral entre 0,05 y 0,15 g's.

3.2.2 Prueba en círculo con radio de 150 m

En este caso, solo se analizó la parte de ascenso de velocidad de la prueba lográndose una velocidad máxima de avance ligeramente mayor a los 80 km/h. los diagramas de manejabilidad obtenidos de esta prueba se presentan, en el mismo orden que la prueba anterior, en la Figura 3.3.

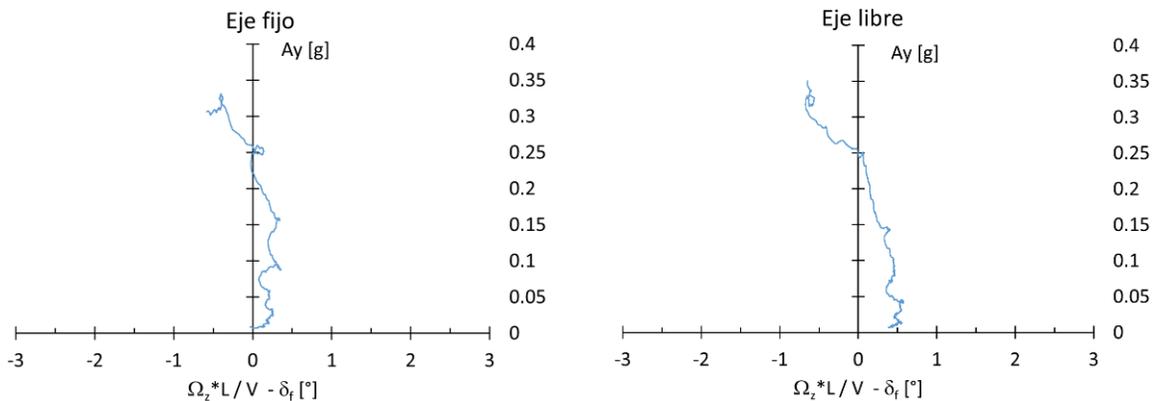


Figura 3.3 Diagramas de manejabilidad durante el ascenso de velocidad en prueba de 150 m de radio

De nueva cuenta se distingue en el diagrama correspondiente a la prueba cuando el eje se mantuvo fijo (imagen de la izquierda) tendencia de viraje neutral para niveles bajos de aceleración lateral con un cambio alrededor de 0,25 g's hacia el subviraje. Analizando el diagrama correspondiente a la condición de eje libre, la curva inicia oscilando con tendencia a viraje neutral que, alrededor de 0,05 g's, cambia paulatinamente a subviraje, para posteriormente presentar un cambio con mayor acentuación en alrededor de 0,25 g's.

De esta forma se pueden establecer las diferencias en la manejabilidad generadas por la condición de uso del eje virable. Para el caso del uso fijo del eje el comportamiento tiende mayormente al viraje neutral, con ligeros cambios al inicio y al fin del diagrama. Mientras que cuando el eje es libre, se perciben mayores cambios de tendencia en la condición de manejabilidad, ya que los diagramas se desarrollan principalmente en la región del cuadrante 1 que corresponde al sobreviraje y, paulatinamente conforme se va incrementando el nivel de aceleración lateral, se dirigen a la condición de subviraje.

Al analizar el historial de la magnitud del ángulo de orientación de las llantas del eje direccional y del eje virable durante las pruebas en las que se mantuvo libre, se estableció el ángulo promedio para cada eje. Esta magnitud fue alrededor de 6° para el eje direccional y de 2° para el eje virable, en sentido opuesto al eje direccional para todo el intervalo de velocidad. Esta relación no coincide con la obtenida durante el proceso de caracterización del sistema de dirección, lo cual se puede deber a que dicho proceso se realizó con el vehículo estático y el comportamiento varía cuando la unidad está en movimiento, respondiendo el sistema de control a la presencia de fuerzas laterales sobre las llantas, entre otros factores.

4 Conclusiones

Los ejes virables son una opción para desarrollar vehículos de carga y pasajeros con mayores dimensiones, permitiéndoles desplazarse por zonas con caminos estrechos. Sin embargo, es necesario evaluar su efecto sobre el desempeño dinámico global de las unidades que los utilizarán y, de esta forma, determinar la conveniencia de su uso o no en alguna configuración en particular.

En cuanto a la maniobrabilidad, se observó una mejora en el desempeño del autobús con el uso del eje virable, ya que los radios generados durante las pruebas se redujeron en un intervalo de alrededor de 0,5 m a 1,6 m, lo que representa disminuciones del orden del 4% al 10%. Así, el vehículo podrá realizar maniobras a baja velocidad en espacios más estrechos.

Con respecto a la manejabilidad, el uso del eje virable genera cambios en la condición de viraje conforme se incrementa el nivel de aceleración lateral, lo cual lo hace más sensible al control direccional por el operador ante giros en el volante. Estos cambios en la manejabilidad se pueden atribuir a que el eje virable gira en sentido opuesto al eje de dirección para cualquier velocidad.

En términos generales, se puede establecer que para maniobras a baja velocidad es recomendable el uso del eje virable. Por otro lado, circular a velocidades mayores con el eje virable activo, se modifica la manejabilidad de la unidad, promoviendo en este caso incremento en la tendencia al subviraje. No obstante, este desempeño depende del sistema de control, lo cual no fue alcance del presente estudio.

Finalmente, se considera interesante llevar a cabo una evaluación con atención al sistema de control del eje virable, parametrizando el comportamiento para determinar la magnitud y las condiciones en las que se podría modificarse la relación de giro de los ángulos de orientación entre el eje direccional principal, frontal, y el trasero, así como la posición de éste. Esto podría considerar incluso la configuración para el sentido de giro de las ruedas en este eje de acuerdo a su posición en la parte posterior de la unidad.

Bibliografía

- [1] Martínez Antonio, J. J., et al, “Manual Estadístico del Sector Transporte 2012”, Instituto Mexicano del Transporte, Qro, México, 2013.
- [2] Martorell, G., “Porqué los camiones de bomberos Americanos necesitan dos conductores”, El Motor, 2016.
- [3] Greenlees, D., “Goodyear Four-Wheel-Steer-Four-Wheel-Drive Transit Bus”, The Old Motor, september 1 2018.
- [4] Martínez Román, L., Serrano, J., “Coches con dirección a las cuatro ruedas: todo lo que tienes que saber”, autopista.es, España, mayo 2016
- [5] BPW “LL self-steering axle” pagina web www.hkta.com/bpw/index.html, fecha de consulta: marzo (2005).
- [6] Cebon, D. “Handbook of Vehicle-road Interaction’, Engineering Department, Cambridge University, England, ISBN 90 265 1554 5 (1991).
- [7] Romero Navarrete, J. A., et al, Investigación del efecto vial de los ejes virables en vehículos articulados: revision de la literature, Publicación Técnica No. 263, Instituto Mexicano del Transporte, Qro., México, 2004.
- [8] Utbult, J., “Rear Wheel Steering a Study on Low-Speed Maneuverability and Highway Lateral Comfort”, Master’s thesis in Automotive Engineering, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Sweden, 2017.
- [9] Singh, A., et. al., “Study of 4 wheel steering systems to reduce turning radius and increase stability”, International Conference of Advance Research and Innovation, ISBN 978-93-5156-328-0, 2014.
- [10] Kaneko, T., et. al., “Steering control for advanced guideway bus system with all-wheel steering system”, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, pages 741-746 volume 44, 2006
- [11] Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con las que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal”. DIARIO OFICIAL. Martes 26 de diciembre de 2017. México, D. F.
- [12] Racelogic VBOX, User’s Manual, UK.

[13] Fabela Gallegos M.J., Aspectos básicos aplicables a la evaluación de la maniobrabilidad de vehículos de carretera, Boletín Notas Instituto Mexicano del Transporte, marzo-abril 2013, México.

[14] Tyler, G., et. al, Evaluating the Manoeuvrability of Theoretical Tractor-Trailer Combinations and Extended Trailer Configurations on Winnipeg Truck Routes, presented at Conference of the Transportation Association of Canada Montreal, Quebec, 2014.

[15] Wong, J. Y., Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1993.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>