



Desarrollo de herramienta computacional para la visualización de la maniobrabilidad de vehículos unitarios de carga pesada y autobuses

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

**Publicación Técnica No. 546
Sanfandila, Qro, 2019**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Desarrollo de herramienta computacional para la
visualización de la maniobrabilidad de vehículos
unitarios de carga pesada y autobuses**

Publicación Técnica No. 546
Sanfandila, Qro, 2019

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. José Ricardo Hernández Jiménez y el M.C. David Vázquez Vega. Su presentación es el producto resultante del desarrollo del proyecto El 18/17 “Desarrollo computacional para la visualización de la maniobrabilidad de vehículos unitarios de carga pesada y autobuses”.

Se agradece la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de la CIVIE

Contenido

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	viii
Sinopsis	x
Abstract	xii
Resumen Ejecutivo	xiv
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	5
Capítulo 2. Desarrollo de modelo matemático	13
Capítulo 3. Elaboración de herramienta computacional	23
Capítulo 4. Esquema de pruebas de validación	29
Conclusiones	47
Bibliografía	51
Anexos	53

Índice de figuras

Figura 1.1	Representación del área de barrido	6
Figura 1.2	Representación del radio de giro	6
Figura 1.3	Estructura del programa de simulación TruckSim®	7
Figura 1.4	Elementos básicos del programa HVE	8
Figura 1.5	Ejemplo de análisis de superficie de barrido con AutoTURN®	9
Figura 2.1	Representación del centro de rotación de un vehículo	14
Figura 2.2	Modelo bicicleta	15
Figura 2.3	Modelo para vehículo unitario	15
Figura 2.4	Mecanismo de enganche quinta rueda-perno rey	17
Figura 2.5	Excentricidad entre el punto de articulación y la ubicación del eje trasero	18
Figura 2.6	Modelo bicicleta con un punto de articulación	18
Figura 2.7	Modelo considerando el corrimiento del punto de articulación	19
Figura 2.8	Proyección trigonométrica	20
Figura 2.9	Dimensiones de configuración articulada	21
Figura 3.1	Diagrama de bloques (der.) y panel frontal (izq.)	23
Figura 3.2	Diagrama de bloques para la realización de cálculos	24
Figura 3.3	Diagrama de bloques para visualización de resultados y animación	25
Figura 3.4	Movimientos de rotación del vehículo para descripción de trayectoria	26

Figura 3.5	Diagrama de bloques para generación de reporte de resultados	27
Figura 4.1	Autobús de dos ejes durante medición de sus principales características	30
Figura 4.2	Dimensiones principales del autobús de dos ejes	30
Figura 4.3	Autobús de tres ejes durante registro de sus principales características	31
Figura 4.4	Dimensiones principales del autobús de tres ejes	31
Figura 4.5	Ejecución de pruebas; autobús dos ejes (izq.), autobús 3 ejes (der.)	32
Figura 4.6	Vista de ventanas del programa de introducción de datos (parte superior) y de resultados (parte inferior)	33
Figura 4.7	Esquema de configuración T3S2 con sus dimensiones principales [m]	36
Figura 4.8	Ventanas del programa para configuración T3S2	37
Figura 4.9	Resultados del programa simulación	38
Figura 4.10	Ventana del programa para configuración T3S2	38
Figura 4.11	Resultados para configuración T3S2	39
Figura 4.12	Ventanas del programa desarrollado para configuración T3S2	39
Figura 4.13	Esquema de configuración T2S2 con sus dimensiones principales [m]	40
Figura 4.14	Ventanas del programa para configuración T2S2	40
Figura 4.15	Resultados del programa simulación	41
Figura 4.16	Ventana del programa para introducción de datos de entrada de configuración T2S2	41
Figura 4.17	Ventanas de resultados para la configuración T2S2	42
Figura 4.18	Ventanas del programa desarrollado para configuración T3S2	42
Figura A1.1	Ventana de inicio	53

Figura A1.2	Ventana para selección de tipo de vehículo	54
Figura A1.3	Ventana para introducción de parámetros de vehículo ligero	55
Figura A1.4	Ventana para introducción de parámetros de configuración de carga pesada	55
Figura A1.5	Ventana para visualización de resultados	56
Figura A1.6	Vista de reporte en hoja de cálculo	56
Figura A1.7	Ventana de ayuda	57

Índice de tablas

Tabla 4.1	Comparativa de los radios internos y externos obtenidos de forma experimental y con el modelo para el autobús B3	34
Tabla 4.2	Diferencias obtenidas para el autobús B3	34
Tabla 4.3	Comparativa de los radios internos y externos obtenidos de forma experimental y con el modelo para el autobús B2	35
Tabla 4.4	Diferencias obtenidas para el autobús B2	35
Tabla 4.5	Comparativa de los radios internos y al centro del primer eje y del ángulo del punto de articulación para configuración T3S2	43
Tabla 4.6	Comparativa de los radios internos y al centro del primer eje y del ángulo del punto de articulación para configuración T2S2	44

Sinopsis

En el presente estudio se muestran los resultados obtenidos de la elaboración de una herramienta computacional para el análisis simplificado de la maniobrabilidad de vehículos unitarios y configuraciones vehiculares compuestas por dos unidades articuladas por un punto. En primera instancia, se obtienen los modelos matemáticos a partir de un análisis geométrico, considerando como base el modelo bicicleta. Posteriormente, se prepara el algoritmo de programación.

Con la finalidad de asegurar que los resultados generados por el programa desarrollado son correctos, se llevó a cabo un proceso de validación consistente en la ejecución de pruebas experimentales con autobuses de dos y tres ejes. Además, se realizó la evaluación de la maniobrabilidad de una configuración tipo T2S2 y una T3S2 mediante el uso de un par de programas comerciales.

El programa mostró un desempeño satisfactorio al presentar, para el caso de vehículos unitarios, diferencias abajo del 5% con respecto a los resultados experimentales. Con respecto a las configuraciones articuladas, los resultados son prácticamente idénticos a los del programa comercial especializado; con lo que demuestra la factibilidad para su uso en la evaluación de este tipo de configuraciones. Finalmente, para futuros trabajos se contempla extender su aplicabilidad para la evaluación de una mayor cantidad de configuraciones vehiculares.



Abstract

This study shows the results obtained from the elaboration of a computational tool for the simplified analysis of the maneuverability of unitary vehicles and vehicle configurations composed of two units joined by an articulation. In the first instance mathematical models are obtained starting from a geometric analysis, considering the “bicycle model” as a basis. Subsequently, the programming of the tool is carried out.

In order to ensure that the results generated by the developed program are correct, a validation process was carried out that consisted of the execution of experimental tests with a two-axle three-axle busses. In addition, the maneuverability assessment of a T2S2 and T3S2 type configuration was carried out using a couple of commercial programs.

The program showed a satisfactory performance presenting, for the case of unit vehicles, differences that were below 5%. With respect to vehicle configurations with a point of articulation, the model presented practically identical results as the specialized programs for this type of analysis, which supports its feasibility for use in the evaluation of this type of vehicle configurations. Finally, for future work, it is expected to extend its applicability for the evaluation of a greater number of vehicle configurations.



Resumen ejecutivo

El desempeño de maniobrabilidad de un vehículo, o configuración vehicular, se refiere a los espacios necesarios para que dicho vehículo lleve a cabo una operación. Típicamente, la referencia es a baja velocidad; que implique un giro en la orientación de las llantas del eje direccional. Estos aspectos deben ser considerados para asegurar la compatibilidad entre las características de la infraestructura y las propiedades y capacidades de los vehículos que la utilizarán.

Las características de maniobrabilidad de un vehículo generalmente se asocian a través de dos indicadores: el radio mínimo de giro y el área de barrido. El primero se refiere al radio de la circunferencia descrita por el vehículo, para el ángulo máximo de orientación de las llantas del eje direccional; mientras que el segundo corresponde a la superficie que va ocupando la configuración vehicular al desplazarse con un ángulo fijo de orientación de las llantas direccionales.

Estos parámetros son utilizados por los diseñadores de carreteras y trazado urbano para establecer la geometría de los caminos, intersecciones, áreas de maniobras, entre otras; para poder alojar a los vehículos que se espera circulen por ahí. De igual forma son de interés para operadores logísticos, quienes deben establecer las rutas para sus vehículos y que toma mayor importancia cuando consideran configuraciones vehiculares de grandes dimensiones.

Aunque la evaluación del desempeño de maniobrabilidad de un vehículo puede ser realizado de forma experimental, es decir, realizar las pruebas con el vehículo de interés y registrar los datos requeridos, esto implica tiempo y costos relativamente altos. Por esa razón, es común recurrir a la simulación con el uso de modelos matemáticos validados; que permitan tener resultados confiables en un corto tiempo y a un costo relativamente menor que si se hiciera de forma experimental.

Actualmente, se dispone de programas computacionales comercialmente disponibles que permiten llevar a cabo los análisis de maniobrabilidad; entre los cuales se pueden mencionar TruckSim[®], HVE y Auto TURN[®]. Los dos primeros tienen la capacidad de analizar de forma completa el comportamiento dinámico de los vehículos, puesto que permiten representar y evaluar gran cantidad de circunstancias de prueba, entre las que se encuentra la maniobrabilidad; por otro lado, el Auto TURN[®] es un programa diseñado especialmente para analizar la maniobrabilidad. Sin embargo, al ser programas comerciales, se requiere de un licenciamiento para su uso; lo cual limita su disponibilidad para quienes no puedan pagar por ellos.

En el presente estudio, se desarrolló un modelo para el análisis del desempeño de maniobrabilidad de vehículos, limitado en esta primera etapa a vehículos unitarios y configuraciones conformadas por dos unidades con un punto de articulación. Como base matemática, se consideró la ejecución de una maniobra circular y, partir de ella, evaluar la maniobrabilidad atendiendo, al momento de la programación, contar con una interface completamente gráfica y fácil de utilizar. Para validación de los resultados de los modelos propuestos, se llevaron a cabo pruebas experimentales con autobuses de dos y tres ejes y, complementariamente, se hicieron pruebas con los programas TruckSim® y AutoTURN® para comparar los resultados correspondientes a configuraciones con un punto de articulación.

Mediante el proceso de validación, el programa demostró un desempeño satisfactorio ya que presentó, para el caso de vehículos unitarios, diferencias marginales al comparar sus resultados con los obtenidos de forma experimental; con diferencias que siempre estuvieron por debajo del 5%. Con respecto a las configuraciones vehiculares con un punto de articulación, el modelo presentó resultados prácticamente idénticos que el programa AutoTURN® lo cual avala su factibilidad para su uso en el análisis de este tipo de configuraciones vehiculares. Sin embargo, con los resultados obtenidos con el programa TruckSIM® se pudo observar que la distribución de la carga, en conjunto con el índice de fricción de la superficie y las propiedades de las llantas, afectan la maniobrabilidad principalmente en la segunda unidad; por lo cual será importante analizar estas cuestiones y ver la posibilidad de incluirlo dentro de las consideraciones del modelo desarrollado.

En general, se puede establecer que los resultados arrojados por el programa son satisfactorios, ya que las diferencias obtenidas durante el proceso de validación son marginales; lo que demuestra su aplicabilidad para evaluar vehículos unitarios y configuraciones con hasta un punto de articulación. Además, se pueden definir las rutas por seguir en futuras etapas; como es la de extender los modelos para abarcar mayor cantidad de configuraciones vehiculares, incluyendo las doblemente articuladas, así como la realización de mayor cantidad de pruebas de validación, considerando aspectos como la distribución de la carga y la fricción del pavimento.

Introducción

Uno de los aspectos por cumplir para el logro de un adecuado tránsito por carreteras, es la compatibilidad entre las características físicas y geométricas de la infraestructura y las capacidades de los vehículos que circulan por ella. Es por esto que, desde la fase de diseño de las arterias viales y los trazados urbanos, deben ser consideradas las propiedades físicas y dimensiones relacionadas con los vehículos que se espera utilicen dicha infraestructura, [AASHTO]. Entre las cuestiones por considerar están el comportamiento de las configuraciones vehiculares, al seguir trayectorias a baja y alta velocidad. En ese sentido, el desempeño a alta velocidad es conocido como manejabilidad; mientras que para baja velocidad se denomina maniobrabilidad.

Generalmente, para describir las características de maniobrabilidad de un vehículo se emplean indicadores como el radio mínimo de giro y el área de barrido; el primero se refiere al radio de la circunferencia descrita por el vehículo para el ángulo máximo de orientación de las llantas del eje direccional, mientras que el segundo corresponde a la superficie que va ocupando la configuración vehicular al desplazarse manteniendo fijo el ángulo de orientación de las llantas direccionales. Estos parámetros permiten definir criterios para establecer el trazo geométrico de carreteras, intersecciones y áreas de maniobras, entre otras, para poder alojar a los vehículos que se espera circulen por ahí o, en su defecto, a partir de una infraestructura dada determinar si cuenta con el espacio suficiente para que cierta configuración vehicular circule por ella sin problemas.

La determinación de los parámetros de maniobrabilidad se puede hacer de forma experimental; es decir, realizar las pruebas con el vehículo de interés y registrar los datos requeridos. Aunque la ejecución de la maniobra es relativamente simple, se requiere contar con el espacio suficiente para ejecutarla; lo que puede resultar en invertir tiempo de vehículos y operadores con un costo relativamente alto. Otra forma alterna frecuentemente utilizada es mediante la simulación con modelos matemáticos o computacionales validados; lo que permite tener resultados estimados en un corto tiempo y a un costo relativamente menor que si se hiciera de forma experimental.

En el mercado existen diversos programas computacionales que permiten llevar a cabo los análisis de maniobrabilidad, entre los cuales se pueden mencionar los denominados como: TruckSim®, HVE y AutoTURN®. Los dos primeros son programas que tienen la capacidad de analizar de forma completa el comportamiento dinámico de los vehículos, dado que permiten representar y

evaluar gran cantidad de escenarios de operación, entre ellos los aspectos de maniobrabilidad; mientras que el AutoTURN[®] es un programa diseñado especialmente para analizar la maniobrabilidad. En programas de este tipo, la incertidumbre de las estimaciones depende de los alcances y criterios de análisis que los fundamentan, que pueden ser adecuados para las condiciones de estudio que se requieran en casos específicos. Su principal desventaja radica en el hecho de que, al ser programas comerciales, implica costos de licencias para su uso.

Con el objetivo de desarrollar herramientas de análisis propias, en el presente trabajo se desarrollaron los modelos matemáticos para determinar las características de maniobrabilidad de vehículos unitarios y configuraciones vehiculares conformadas por dos unidades como máximo. Posteriormente se desarrolló una herramienta computacional capaz de resolver las ecuaciones y presentar los resultados complementados con la animación del vehículo de estudio, siguiendo la trayectoria resultante. Para la validación de los resultados arrojados por los modelos propuestos, se llevaron a cabo pruebas experimentales con autobuses de dos y tres ejes, complementados con resultados obtenidos con los programas TruckSim[®] y AutoTURN[®] para comparar resultados de configuraciones con un punto de articulación. El desarrollo de los modelos, la herramienta computacional y los resultados del proceso de validación aparecen en el cuerpo de este documento.

1 Antecedentes

1.1 Maniobrabilidad

La maniobrabilidad de un vehículo se refiere a los espacios que este requiere al ejecutar una maniobra direccional; ejecutada normalmente a baja velocidad y, por tanto, sin efectos inerciales significativos. De este modo, la maniobrabilidad representa el desempeño en situaciones de movimiento relativamente lento, como al girar en intersecciones o cruces de calles, o las acciones realizadas para el acomodo en un estacionamiento o en zonas de carga y descarga, [FABELA].

El desempeño de maniobrabilidad de un vehículo, o configuración vehicular, es el resultado de la combinación de sus dimensiones globales y la ubicación de sus ejes a lo largo de su longitud; con las características de su mecanismo de dirección, principalmente. La estimación simple del radio de giro implica la suposición de que las llantas mantengan un rodamiento sin deslizar y, en esa condición, genera la trayectoria hacia donde se orienten las llantas direccionales en un ángulo determinado.

1.2 Evaluación de la maniobrabilidad

El análisis de la maniobrabilidad puede ser realizado mediante la determinación de diferentes parámetros, [TYLER], obtenidos comúnmente a través de pruebas a baja velocidad para reducir los efectos inerciales que se pudieran generar; los parámetros más utilizados son el área de barrido y el radio de giro. El área de barrido corresponde a aquella comprendida entre la trayectoria del punto más interno y la del punto más externo de la configuración vehicular, al desplazarse con un ángulo de orientación de las llantas direccionales fijo; lo que genera así una trayectoria curva (Figura 1.1). Esta medida adquiere gran importancia principalmente para configuraciones compuestas por más de una unidad, ya que las áreas para ese tipo de vehículos se incrementan y pueden producir la invasión de carriles adyacentes.

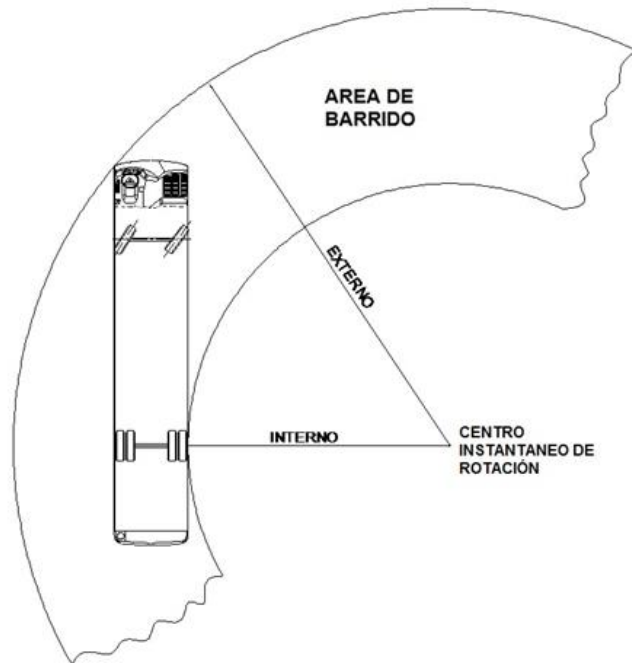


Figura 1.1 Representación del área de barrido

El radio de giro es el parámetro mayormente utilizado para describir las características de maniobrabilidad de un vehículo. Este se refiere al radio de un punto determinado (o así especificado) de la circunferencia descrita por el vehículo, generado al desplazar el vehículo con un ángulo de orientación fijo de las llantas del eje direccional. De los puntos importantes sobresale el radio mínimo de giro, obtenido desde el centro de rotación hasta la parte más interna del vehículo en dicha circunferencia y que se logra generalmente para el ángulo máximo de orientación de las llantas. La Figura 1.2 esquematiza el radio de giro medido con respecto al centro del eje direccional.

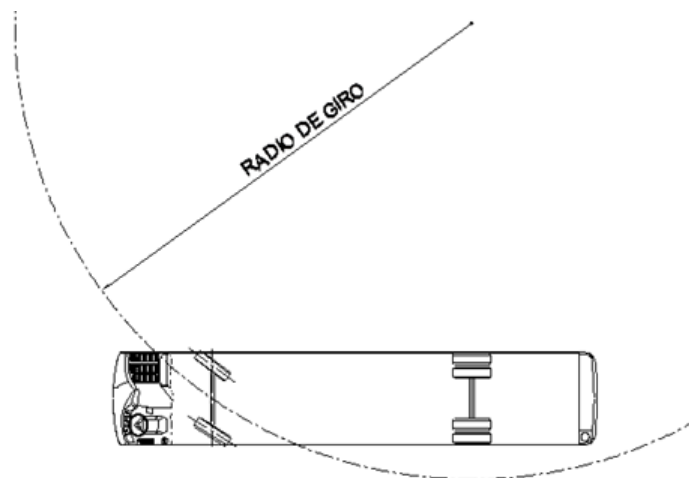


Figura 1.2 Representación del radio de giro

1.3 Programas comerciales para análisis de la maniobrabilidad

Para llevar a cabo los estudios de maniobrabilidad, los diseñadores de carreteras y de urbanización, así como los diseñadores de vehículos y encargados de logística de empresas de transporte, recurren generalmente al uso de programas de simulación numérica. En el mercado se encuentran disponibles diversos programas con ese propósito, los que permiten analizar la maniobrabilidad para diferentes tipos de vehículos; de esta forma, es posible obtener los parámetros requeridos en menor tiempo, y a un menor costo que hacerlo de forma experimental con vehículos reales. Entre los programas que brindan información al respecto se ubican los de simulación del comportamiento dinámico, de los cuales la maniobrabilidad es un tema que se deduce de la simulación, sin ser el objetivo principal; tales como el TruckSim® y el HVE®. En contraparte, hay programas orientados específicamente hacia los parámetros de maniobrabilidad, siendo uno de los representativos el denominado AutoTurn®. No obstante, a diferencia de los anteriores, este programa requiere de un programa auxiliar para su visualización, AutoCad® es el programa en el cual se apoya.

1.3.1 Programa comercial TruckSIM®

Este es un programa muy completo, que permite crear modelos detallados en tres dimensiones para analizar la respuesta de configuraciones vehiculares multiarticuladas ante diferentes condiciones de conducción y entornos del medio por el que se desplazan. Su formulación considera las características y propiedades mecánicas de los principales componentes de los vehículos; permite representar gran variedad de maniobras, tanto a alta como baja velocidad, y así obtener la repuesta de la configuración mediante el historial en el tiempo de las variables cinemáticas y dinámicas, [TRUCKSIM]. Además, es posible obtener una animación de la configuración vehicular ejecutando la maniobra establecida. En la Figura 1.3 aparecen algunas ventanas del programa representativas de cada una de las etapas del proceso de análisis.

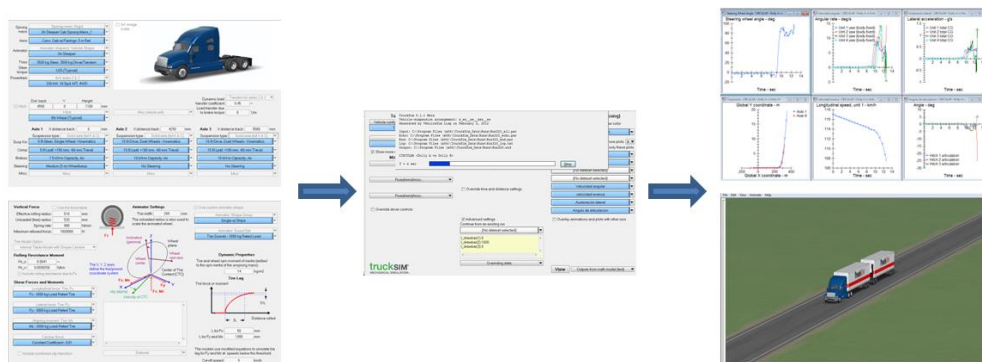


Figura 1.3 Estructura del programa de simulación TruckSim®

1.3.2 Programa comercial HVE®

El HVE (Human-Vehicle-Environment), similar al programa TruckSim, tiene la capacidad de evaluar el desempeño de vehículos; aunque extiende sus alcances al considerar el estudio de las interacciones entre humanos, vehículos y el medio ambiente. Esto fundamenta sus capacidades para análisis complementarios durante eventos de choque entre vehículos o contra mobiliario carretero, incluyendo el efecto sobre los ocupantes de los vehículos o, incluso, peatones. Además, es posible evaluar el funcionamiento de los sistemas de seguridad, [HVE]. En la Figura 1.4 se muestran ejemplos de pantallas de los tres elementos básicos del programa.

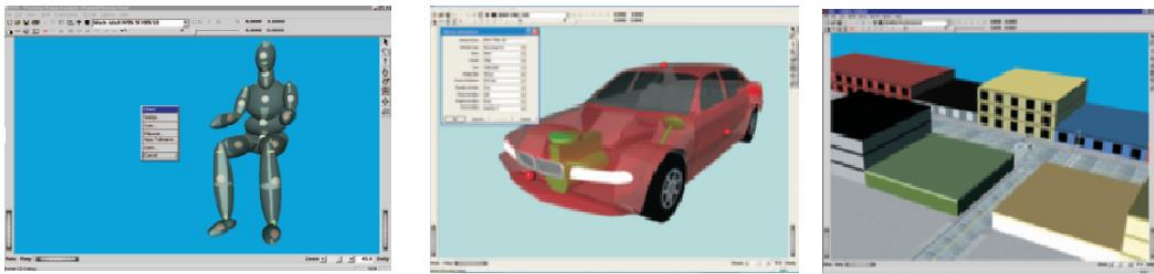


Figura 1.4 Elementos básicos del programa HVE

Cabe mencionar que tanto en TruckSim® como en HVE pueden llevarse a cabo análisis para determinar las características de maniobrabilidad de configuraciones vehiculares, como son el radio de giro y el área de barrido; sin embargo, estos datos no son proporcionados de forma directa, sino que es necesario llevar a cabo un procesamiento de datos para llegar a dichos resultados. Lo anterior no sucede con el siguiente programa, que ha sido diseñado específicamente para esta clase análisis.

1.3.3 Programa comercial AutoTURN®

Es un programa especializado para la simulación del comportamiento de vehículos durante maniobras que implican el giro del volante direccional, lo que permite el análisis de las áreas de barrido. Enfocado al análisis de la maniobrabilidad de vehículos, el programa requiere como datos de entrada las dimensiones principales y la ubicación de los ejes del vehículo por analizar. El AutoTURN® está basado en CAD y sus desarrolladores ofrecen, entre sus características de uso, el ahorro de tiempo; y así analizar y evaluar maniobras de vehículos para proyectar intersecciones, rotondas, terminales de autobuses, muelles de carga o cualquier obra que implique maniobrabilidad, espacio libre y acceso, [AUTOTURN]. Un ejemplo de un estudio de la superficie de barrido realizado con AutoTURN® puede ser observado en la Figura 1.5.

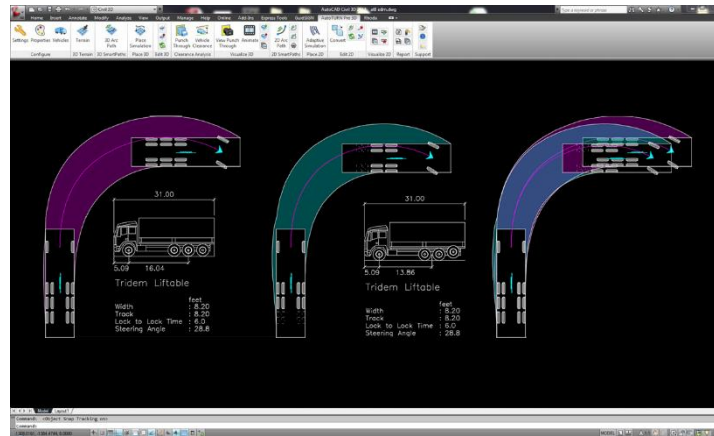


Figura 1.5 Ejemplo de análisis de superficie de barrido con AutoTURN®

Existen algunos otros programas capaces de realizar este tipo de análisis, aunque los mencionados aquí son de los más conocidos y utilizados a nivel internacional. Estas herramientas, como se menciona, son de gran utilidad debido al ahorro en tiempo y, por tanto, de recursos a la hora de llevar a cabo estudios de maniobrabilidad. Sin embargo, su principal inconveniente es que, al ser programas comerciales, es necesario contar con licencias para su utilización, las cuales generalmente tienen altos costos; lo que limita su uso más extenso.

Por lo anterior, es importante desarrollar herramientas de análisis que permitan llevar a cabo estudios de maniobrabilidad de forma sencilla y rápida con resultados que presenten un adecuado nivel de precisión e impliquen menores costos. Así mismo, se pueden lograr aplicaciones orientadas a condiciones específicas que no requieran de toda la amplitud que pudiese ofrecer un programa comercial y, por tanto, que sea subutilizado.

Considerando aspectos como los anteriores, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de modelos para el análisis de la maniobrabilidad de vehículos unitarios y configuraciones vehiculares con hasta una articulación, correspondientes a una primera etapa de un proyecto de mayor alcance; así como la creación de una herramienta computacional capaz de resolver las ecuaciones y presentar los resultados en un entorno completamente gráfico. Por ello, los modelos en esta etapa se basan principalmente en la geometría y en suposiciones de rodamiento puro y equivalencia de ejes simples, combinados con la generación de trayectorias circulares. Para la validación de los modelos desarrollados y los resultados mostrados por la herramienta computacional, se realizaron pruebas experimentales utilizando autobuses de dos y tres ejes. Complementariamente, para verificar los resultados del modelo para vehículos articulados, se efectuaron simulaciones para una configuración T3S2 utilizando los programas TruckSim® y AutoTURN®. Asimismo, se emplearon como referencia los datos sobre la superficie de barrido para una configuración T2S2, mostrados en el Manual de Políticas para el Diseño Geométrico de Carreteras y Autopistas de la AASHTO. De esta forma, se corroboró la buena proximidad entre

los resultados arrojados por los modelos desarrollados y los de referencia, con disensos poco significativos de apenas algunos centímetros.

2 Desarrollo de modelo matemático

La metodología seguida para la obtención de los resultados presentados en este documento consistió básicamente de tres etapas. En la primera, se aplicó el modelo bicicleta, para establecer los modelos de maniobrabilidad para vehículos unitarios y con hasta un punto de articulación; con base en un análisis geométrico de las trayectorias descritas por los vehículos durante una maniobra circular. Para lograrlo, se consideró el análisis geométrico del principio de Ackerman y determinar las expresiones matemáticas aplicables al modelo de maniobrabilidad.

En la segunda etapa, se elaboró la herramienta computacional para la solución de las ecuaciones obtenidas de los modelos; teniendo como requerimientos el contar con una interface completamente gráfica y de fácil uso para los posibles usuarios, principalmente. Por último, para validar los resultados arrojados por el programa computacional, se llevaron a cabo pruebas experimentales de referencia con unidades tipo autobús; considerando sus características dimensionales, la distribución de carga por eje y las relaciones de los mecanismos de dirección. Esta etapa fue complementada con la ejecución de corridas de simulación con una configuración del tipo T3S2; para lo cual se establecieron las características de la configuración necesarias para llevar a cabo el estudio.

2.1 Principio de Ackerman

El principio de Ackerman permite establecer geoméricamente la trayectoria que seguirán las ruedas de un vehículo, dependiendo de sus dimensiones y la orientación de las ruedas direccionales. De manera inversa, conociendo los parámetros geométricos de la trayectoria generada, es posible determinar el ángulo requerido en las ruedas direccionales de un vehículo en particular.

Para que un vehículo de carretera pueda cambiar de trayectoria, es necesario que cuente con al menos un eje direccional, comúnmente el eje delantero, en el cual las llantas tengan libertad para orientarse angularmente en un cierto intervalo, con respecto a su eje vertical. Cuando un vehículo vira, el giro se produce con respecto a centros instantáneos de rotación; si el ángulo de orientación de las llantas del eje direccional es constante, entonces el punto de rotación también lo es. En la Figura 2.1 se observa el esquema de un vehículo de dos ejes que gira con respecto al punto C, [FABELA].

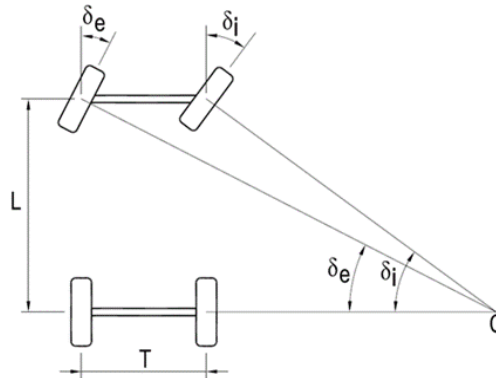


Figura 2.1 Representación del centro de rotación de un vehículo

Para que un vehículo pueda girar libremente; es decir, sin arrastre lateral de las llantas, debe cumplir con el principio de Ackerman, lo que implica que los ángulos de orientación de las llantas del eje direccional (δ_e y δ_i) deben ser diferentes. Para esta condición, debe cumplir la siguiente relación [FABELA], donde T es la entrevía y L la distancia entre ejes:

$$\cot \delta_e - \cot \delta_i = \frac{T}{L} \quad (2.1)$$

Como se observa, el comportamiento de maniobrabilidad puede ser realizado bajo ciertas suposiciones, mediante el análisis de modelos geométricos.

2.2 Modelo para vehículos unitarios

El modelo bicicleta permite realizar el análisis de maniobrabilidad de forma simplificada con respecto a un centro de rotación C, a partir de un ángulo de orientación de la llanta del eje direccional y la distancia longitudinal entre ejes (L). Este modelo consiste en suponer una sola llanta por eje, situada al centro del mismo, considerando así que el vehículo no cuenta con ancho, [FABELA]. En la Figura 2.2 aparece el modelo bicicleta de un vehículo unitario de dos ejes.

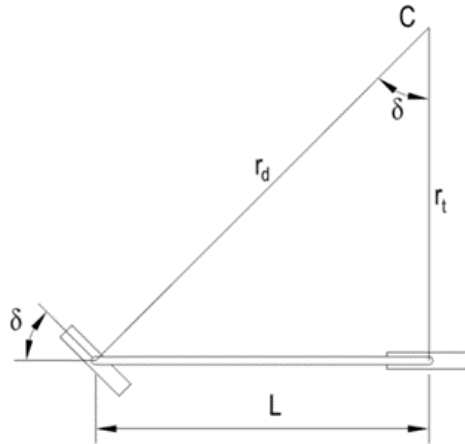


Figura 2.2 Modelo bicicleta

Del análisis geométrico del modelo, es posible determinar las relaciones para obtener las trayectorias de las llantas delantera y trasera, a partir de los radios de giro con respecto al punto C; es decir, r_d y r_t , como se observa en la Ecuación 2.2:

$$r_d = \frac{L}{\text{sen}\delta}; r_t = \frac{L}{\text{tan}\delta} \quad (2.2)$$

A partir de esos radios, de la entrevía del vehículo y de su ancho, se determina el área de barrido. Esta superficie de barrido circular corresponde a la sección anular definida entre el radio más interno (r_i), que corresponde al extremo de la proyección de la carrocería por encima del eje trasero, y el radio más externo (r_e), asociado comúnmente con la esquina exterior delantera del vehículo. Estos radios pueden ser visualizados en la Figura 2.3, que corresponde al modelo de un vehículo unitario en el que se representa como VT al volado trasero; es decir la distancia del eje trasero hasta el extremo posterior de la carrocería del vehículo, mientras que VD es el volado delantero y AN el ancho total.

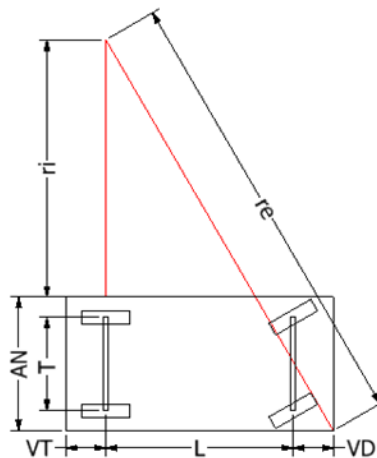


Figura 2.3 Modelo para vehículo unitario

Combinando las expresiones de la ecuación (2) con la representación en la Figura 2.3, con base en el desarrollo del modelo bicicleta se obtienen las ecuaciones 2.3 y 2.4 que determinan los radios interno y externo para un ángulo dado de orientación de las llantas del eje direccional.

$$r_i = \tan^{-1} \left(\frac{L + VD}{r_t + AN/2} \right) \quad (2.3)$$

$$r_e = \sqrt{(r_t + AN/2)^2 + (L + VD)^2} \quad (2.4)$$

Donde:

r_i : radio interno

r_e : radio externo

r_t : radio del eje trasero para el modelo bicicleta

L : distancia de separación entre ejes

AN : ancho de la carrocería del vehículo

VD : volado delantero (distancia entre el eje delantero y la parte frontal de la carrocería)

De forma inversa, para determinar el ángulo de orientación de las llantas del eje direccional necesario para cubrir un radio interno r_t dado, lo cual es de utilidad para establecer si un vehículo con ciertas características podrá o no circular a través de una infraestructura que ya está construida, el análisis para tal caso arroja las siguientes ecuaciones para los ángulos de las llantas interna y externa.

$$\delta_i = \tan^{-1} \left(\frac{L}{r_t - AN/2} \right) \quad (2.5)$$

$$\delta_e = \tan^{-1} \left(\frac{L}{r_t + AN/2} \right) \quad (2.6)$$

Conocida la relación del sistema de dirección del vehículo; es decir, cuánto se debe girar el volante de dirección por cada grado de orientación de las llantas, es posible establecer el giro necesario en el volante para poder llevar a cabo la maniobra para el radio establecido.

2.3 Modelo para configuraciones con un punto de articulación

Para el caso de configuraciones vehiculares de carga pesada conformadas por dos unidades unidas entre sí por un punto de articulación, la más ampliamente utilizada consiste de un tractocamión (con dos o tres ejes) y un semirremolque (también con dos o tres ejes). El mecanismo de acoplamiento entre las unidades consiste de un elemento conocido como quinta rueda, el cual va colocado en la parte posterior del tractocamión, encima del eje o ejes traseros, y otro elemento llamado perno rey, que va en la parte inferior frontal del semirremolque. La Figura 2.4 muestra la quinta rueda y el perno rey, así como un esquema de las unidades que conforman la configuración con la ubicación de los componentes del mecanismo de enganche.



Figura 2.4 Mecanismo de enganche quinta rueda-perno rey

Es posible llevar cabo el análisis de los espacios requeridos por una configuración de este tipo, agregando las unidades adicionales con el punto de articulación en el modelo bicicleta; para lo cual es posible tener dos casos con respecto a la ubicación longitudinal del punto de enganche. En el primero, la ubicación del punto de articulación coincide con el punto medio del conjunto de ejes en la parte trasera del tractocamión, si posee dos o más ejes de carga, o justo sobre el eje trasero, si fuera solamente uno. En el segundo caso, existe una distancia de separación longitudinal “e” entre el punto de enganche y el punto medio geométrico de los ejes traseros del tractocamión. Estos dos casos son ilustrados en la Figura 2.5; coinciden con el esquema de la izquierda en el punto de enganche justo encima de la ubicación longitudinal del eje trasero, que es donde se considera para este vehículo de dos ejes la medición de su distancia base ente ejes; mientras que en el de la derecha existe un corrimiento longitudinal. A continuación, se presenta el

análisis y la obtención de las ecuaciones para cada uno de los casos mencionados.

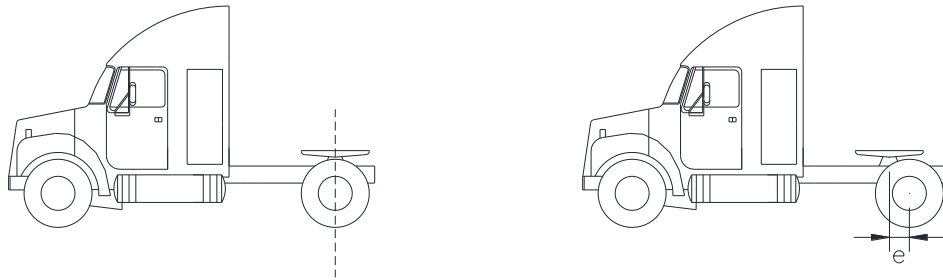


Figura 2.5 Excentricidad entre el punto de articulación y la ubicación del eje trasero

2.3.1 Articulación sobre el eje

Para este caso, el punto de articulación se encuentra sobre el punto de medición de la distancia base entre ejes de la primera unidad. El modelo bicicleta adaptado para considerar la segunda unidad de la configuración, aparece en la Figura 2.6. La distancia R es medida a partir del punto de articulación hasta el eje de la unidad o del centro de los ejes, si hubiere más de uno.

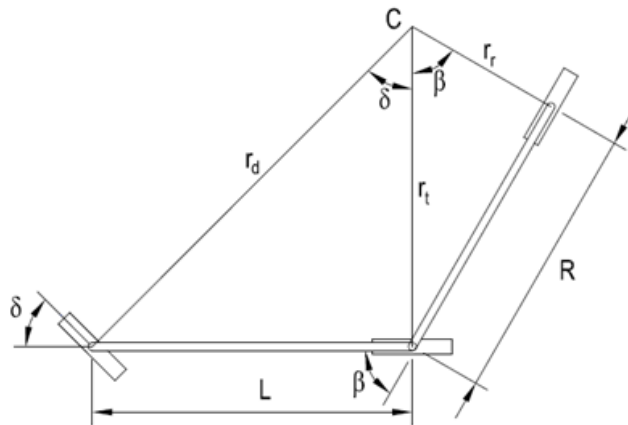


Figura 2.6 Modelo bicicleta con un punto de articulación

Como muestra la figura anterior, el ángulo δ denota la orientación en las llantas direccionales de la unidad tractiva; mientras que el ángulo β corresponde al ángulo entre ambas unidades. De acuerdo con la distancia L de la unidad tractiva y la distancia R de la unidad remolcada, los radios generados son los de las ecuaciones siguientes.

$$r_d = \frac{L}{\text{sen}\delta}; r_r = \frac{R}{\tan\beta}; r_t = \frac{L}{\tan\delta} = \frac{R}{\text{sen}\beta} \quad (2.7)$$

Derivado de las expresiones anteriores, la estimación del ángulo β es obtenida de la siguiente manera.

$$\beta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{R}{L} \tan \delta\right) \quad (2.8)$$

En este análisis considera que el punto de articulación entre el vehículo tractivo y la unidad arrastrada está ubicado justo encima del eje trasero de la unidad tractiva, como extremo de medición de la distancia base entre ejes (L) de la primera unidad. Sin embargo, en la práctica es común encontrar combinaciones vehiculares articuladas, cuyo punto de articulación presenta un ligero corrimiento de la ubicación respecto al eje de las llantas.

2.3.2 Articulación con desfase longitudinal

Considerando que el punto de articulación se ubica longitudinalmente a una distancia "e" del eje trasero (o de la parte media del conjunto de ejes), se tiene el arreglo mostrado en la Figura 2.7. Similar a la representación anterior, la distancia rr corresponde al radio mínimo interno de la configuración con respecto al centro instantáneo de rotación.

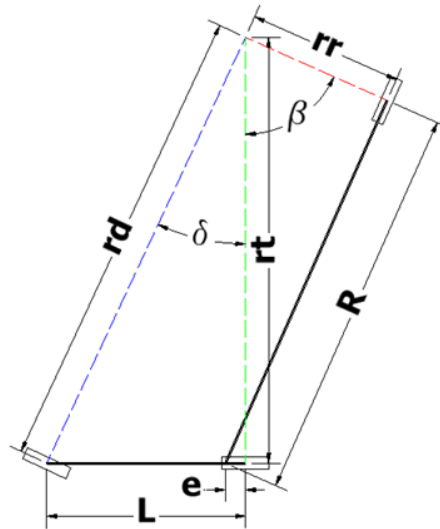


Figura 2.7 Modelo considerando el corrimiento del punto de articulación

Para determinar la distancia rr y el ángulo β , se utilizan las variables ya conocidas y estableciendo tres variables más de apoyo. Una de ellas corresponde a la distancia entre el punto de articulación y el centro instantáneo de rotación, indicada por C , así como dos ángulos de apoyo para el análisis, indicados como Θ y Φ . La Figura 2.8 muestra el esquema de referencia para el modelo.

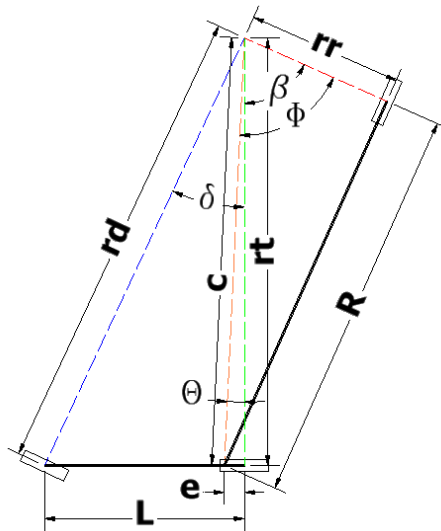


Figura 2.8 Proyección trigonométrica

Del análisis, se deduce que la expresión para determinar C queda de la siguiente forma:

$$C = \sqrt{e^2 + rt^2} \quad (2.9)$$

Conociendo el valor de C, el ángulo θ es obtenido por:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{e}{C}\right) \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{e}{rt}\right) \quad (2.10)$$

El valor del ángulo ϕ surge a partir de las siguientes expresiones:

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{R}{C}\right) \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{rt}\right) \quad (2.11)$$

Finalmente, el valor del ángulo β corresponde a la diferencia de θ y ϕ :

$$\beta = \phi - \theta \quad (2.12)$$

Para determinar los radios máximos y mínimos generados por una configuración vehicular con un punto de articulación, se toma de referencia el esquema en la Figura 2.9. El análisis está basado en el modelo bicicleta para el vehículo articulado.

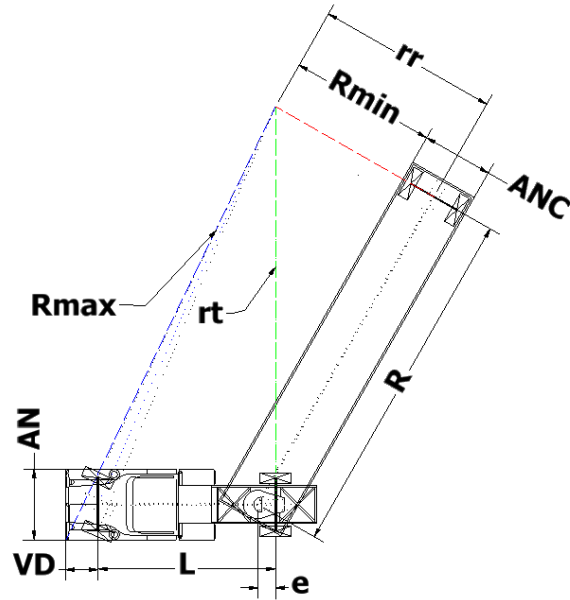


Figura 2.9 Dimensiones de configuración articulada

Los radios mínimo (R_{min}) y máximo (R_{max}) descritos por la configuración vehicular, que permiten determinar el área de barrido, surgen como:

$$R_{max} = \sqrt{(L + VD)^2 + \left(rt + \frac{AN}{2}\right)^2} \quad (2.13)$$

$$R_{min} = rr - \frac{ANC}{2} \quad (2.14)$$

Desde el enfoque teórico geométrico, los modelos presentados desarrollados a partir del modelo bicicleta, permiten obtener los radios de giro y el espacio de barrido; considerando exclusivamente las dimensiones del vehículo. Las suposiciones para estos modelos, son que no existe algún otro efecto de variables del movimiento ni de las asociadas a la masa de las unidades ni propiedades mecánicas de componente alguno.

3 Elaboración de herramienta computacional

Una vez establecidos los modelos y sus correspondientes ecuaciones para el análisis de maniobrabilidad, tanto de vehículos unitarios como configuraciones con hasta dos unidades, se procedió a realizar una herramienta computacional para la solución de las mismas. Esto fue bajo la premisa de lograr un programa con una interface completamente gráfica, que resultara amigable y fácil de utilizar para cualquier usuario y que, además, proporcionara animación del movimiento del vehículo.

Para cumplir con lo anterior, se eligió desarrollar el programa utilizando LabVIEW, debido básicamente a la experiencia previa en su uso y a sus capacidades para realizar de forma simple representaciones gráficas. Este programa permite llevar a cabo la programación mediante un lenguaje grafico a través de la inclusión e interconexión de iconos con funciones definidas en un panel llamado diagrama de bloques. La interface con el usuario se genera de una manera simple en el panel frontal a través de lo establecido en el diagrama de bloques. Es posible generar diversos diagramas de bloques que interactúen entre sí, estableciendo funciones específicas por desarrollar por cada uno de ellos, [LABVIEW]. En la Figura 3.1 se observa un ejemplo de un diagrama de bloques (esquema de la derecha) con su consecuente panel frontal (esquema parte izquierda); este corresponde a una función simple de adquisición de señales de algún instrumento de medición, en el cual se dispone de la pantalla para iniciar o detener la adquisición y la visualización de la señal adquirida.

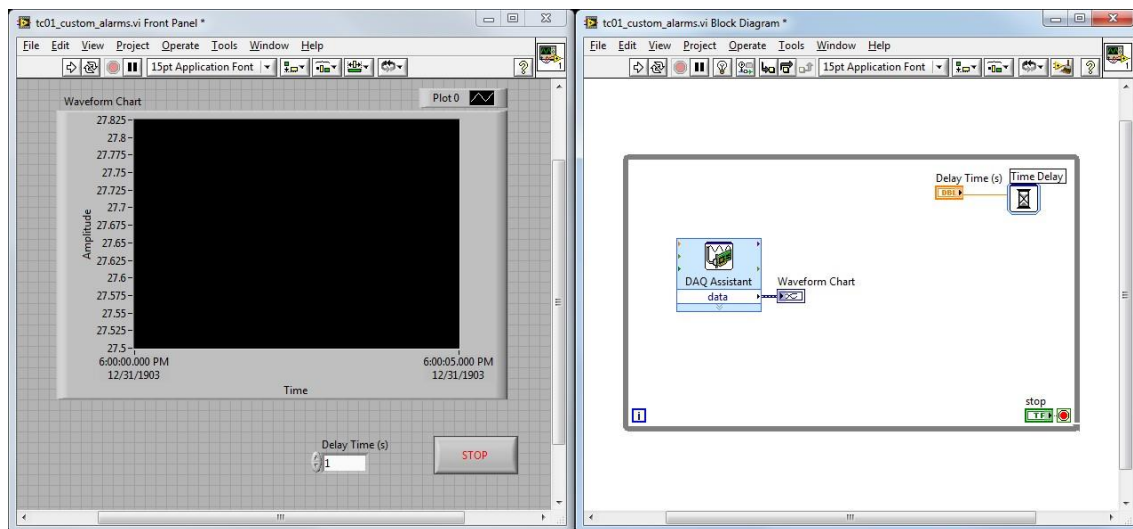


Figura 3.1 Diagrama de bloques (der.) y panel frontal (izq.)

La herramienta computacional desarrollada está conformada por tres subprogramas (diagramas de bloques); cada uno lleva a cabo funciones específicas y, a la vez, comparte información con los otros subprogramas. De acuerdo con sus funciones, los subprogramas son identificados de la siguiente manera: subprograma de cálculos, subprograma de animación y desplegado de resultados, y, finalmente, subprograma de generación del reporte. A continuación, se describe brevemente cada uno de ellos y es presentada una vista general de sus componentes.

3.1 Subprograma para cálculos

Este subprograma es el encargado de gestionar la información que el usuario proporciona para el análisis: el tipo de vehículo, dimensiones requeridas, ángulo de giro de las llantas, etc. Con base en esta información, se determina el conjunto de ecuaciones por resolver, ya sea las correspondientes al modelo de vehículos unitarios o las de configuraciones simplemente articuladas; para, posteriormente, llevar a cabo las operaciones matemáticas necesarias. Una vez que se tienen los resultados, estos son compartidos a los otros dos subprogramas para la generación de la pantalla de visualización de resultados y para la obtención del reporte en formato de hoja de cálculo.

La Figura 3.2 presenta una vista general del diagrama de bloques del subprograma de cálculos, en la que se pueden identificar diversas áreas. En la parte superior central se encuentran una serie de recuadros orientados en forma horizontal que contienen las dimensiones introducidas por el usuario; esta información alimenta la calculadora localizada en la parte central del diagrama, en la que están definidas las ecuaciones de los modelos desarrollados. Después de llevar a cabo los cálculos, los resultados son comunicados a los siguientes subprogramas, lo que se lleva a cabo con la programación establecida a la derecha del diagrama.

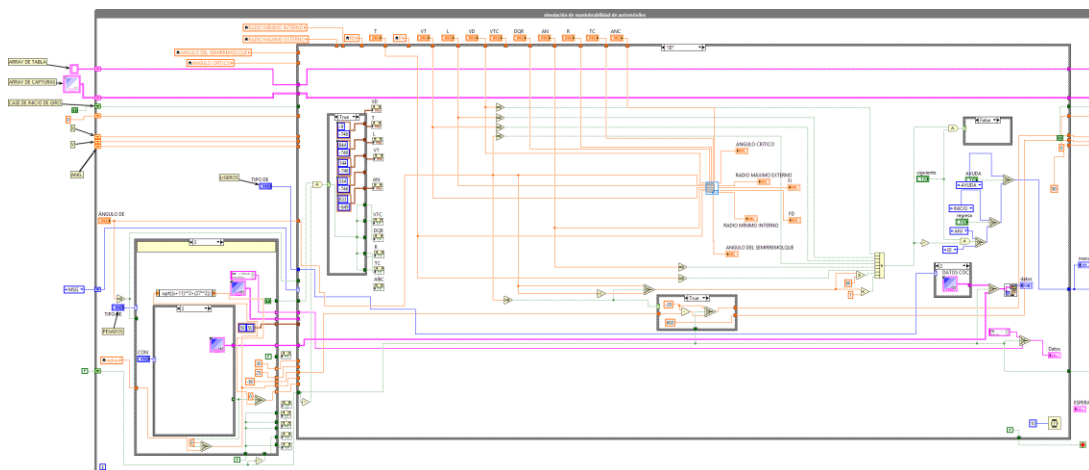


Figura 3.2 Diagrama de bloques para la realización de cálculos

Finalmente, en la región izquierda del diagrama se encuentran los códigos que despliegan las diferentes pantallas de inicio y de introducción de datos de entrada, así como la base de datos de las imágenes referentes a los diferentes tipos de vehículos.

3.2 Subprograma para animación y resultados

Una vez realizadas las operaciones necesarias para la obtención de los parámetros de maniobrabilidad, se procede a la generación de la pantalla de visualización de estos, así como de la animación del vehículo que describe la trayectoria resultante. Estas funciones se llevan a cabo en el subprograma denominado animación.

El diagrama de bloques desarrollado para cumplir con estas tareas aparece en la Figura 3.3. Iniciando en la parte izquierda, se tiene la gestión de las imágenes, que son desplegadas de acuerdo con las instrucciones que se van recibiendo de los demás componentes del diagrama. En la parte central se encuentra la programación para la generación de la pantalla y los demás componentes restantes son los encargados de la generación de la animación.

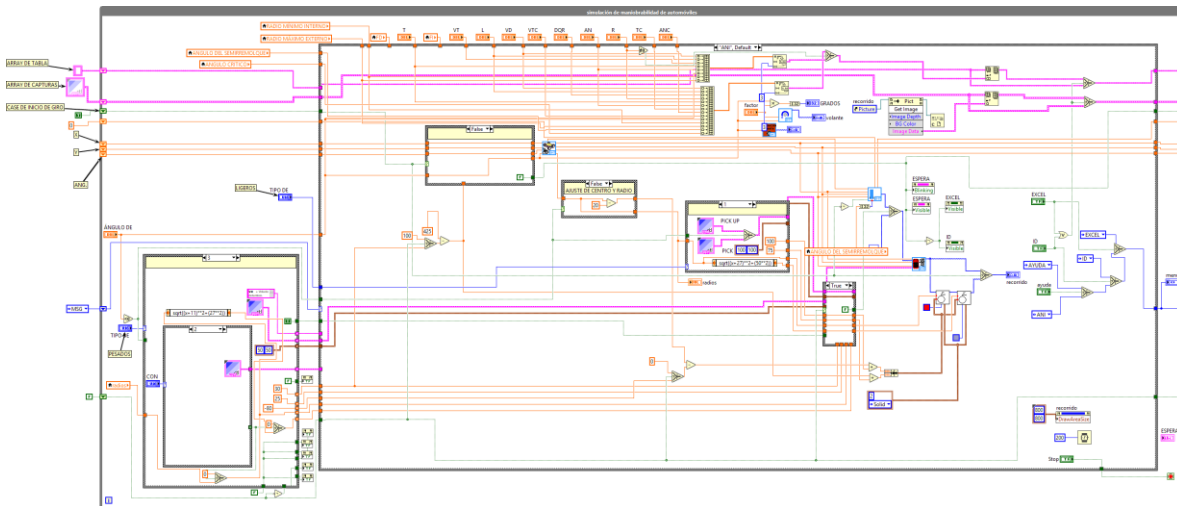


Figura 3.3 Diagrama de bloques para visualización de resultados y animación

La generación de las animaciones se lleva a cabo a partir de la representación de los vehículos, en una vista área mediante figuras en dos dimensiones. Para la descripción de la trayectoria, se les asignan dos movimientos a las figuras representativas de los vehículos, una rotación con respecto a un punto fijo y una rotación con respecto al eje vertical de la figura. En el primer caso, la rotación se logra mediante la asignación de las coordenadas establecida a partir de la ecuación del círculo, mientras que en segundo caso se establece una velocidad de rotación.

En la Figura 3.4 se puede apreciar la descripción de ambos movimientos rotatorios. En la parte izquierda aparece el punto inicial de la animación y la designación del sistema coordenado para establecer el recorrido con respecto a un punto fijo, mientras que la figura derecha representa el movimiento de alineación del vehículo con respecto a esa trayectoria circular.

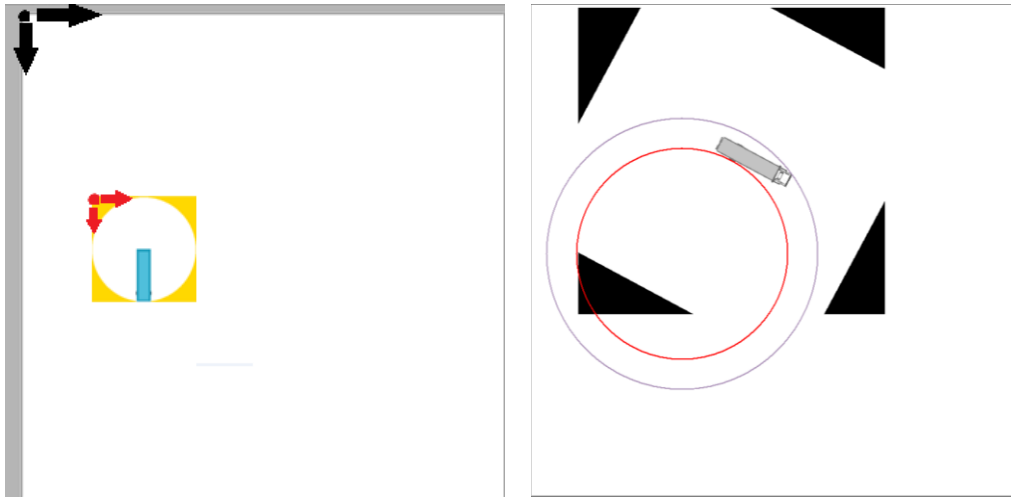


Figura 3.4 Movimientos de rotación del vehículo para descripción de trayectoria

3.3 Subprograma para reporte

Esta subrutina del programa se encarga de almacenar todos los datos introducidos por el usuario, así como los generados por el subprograma de cálculos al resolver las ecuaciones de los modelos matemáticos. Una vez presionado el botón “generar reporte” en la ventana de visualización de resultados y la animación del seguimiento de la trayectoria, esta subrutina genera el reporte con todos los datos almacenados por medio de un documento del tipo de hoja de cálculo. Esto, con el fin de que el usuario pueda conservar dicha información y, si así lo requiere, hacer una manipulación de estos datos de una forma simple y rápida.

El diagrama de bloques de la subrutina para la generación del reporte de resultados aparece en la Figura 3.5. En la parte superior se encuentra el almacenamiento de los datos, que fluyen a la parte central donde se van creando las diferentes tablas en la hoja de cálculo a partir de la cantidad de datos almacenados. En la región inferior izquierda, son resguardadas las figuras que le dan forma a la parte del formato de presentación del documento de reporte.

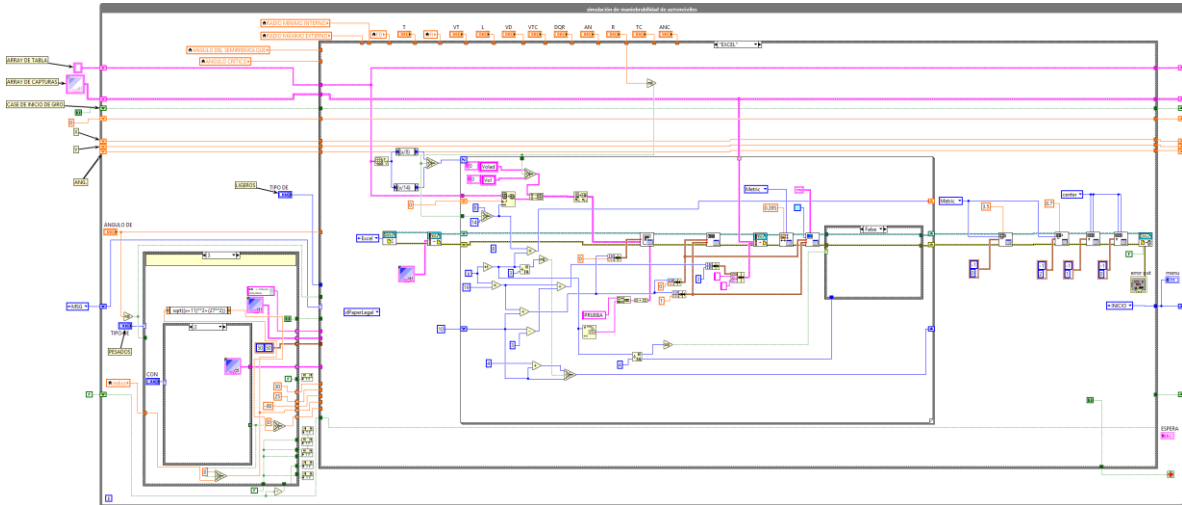


Figura 3.5 Diagrama de bloques para generación de reporte de resultados

En el Anexo 1 de este documento, se presenta el manual de uso de la herramienta computacional para el análisis de la maniobrabilidad, en el cual se explica detalladamente cada una de las ventanas desplegadas por el programa, desde el inicio hasta la obtención del reporte final.

4 Esquema de pruebas de validación

Cuando es realizada la simulación del algún fenómeno físico mediante un modelo matemático, es importante que dicho modelo sea validado para tener la certeza de que los resultados que proporciona sean útiles dentro del contexto de su utilización. Con la intención de determinar el grado de aproximación de las estimaciones que pudieren resultar del uso de los modelos y la herramienta computacional presentados, se tomaron resultados de pruebas a escala real con autobuses de dos y tres ejes, en las cuales son estimados los parámetros de su maniobrabilidad. Las pruebas base fueron ejecutadas para diferentes ángulos de giro en las llantas del eje direccional, de forma que sea posible comparar los resultados alcanzados con los obtenidos de la aplicación del modelo para vehículos unitarios.

En lo referente a configuraciones vehiculares con un punto de articulación; debido a las dificultades de contar en su momento con vehículos articulados para realizar pruebas a escala real, se optó por llevar a cabo la simulación del comportamiento de una configuración tipo T3S2 utilizando los programas TruckSim y Auto TURN. Complementariamente, se utilizaron los datos sobre los radios de giro de una configuración tipo T2S2, mostrados en el Manual de Políticas para el Diseño Geométrico de Carreteras y Autopistas de la AASHTO, [1].

4.1 Vehículos unitarios

Como se menciona anteriormente; para validar los resultados del modelo para vehículos unitarios, se realizaron pruebas para determinar las características de maniobrabilidad de dos autobuses, uno de dos ejes (denominado B2) y otro de tres ejes (denominado B3). Antes de realizar las pruebas en campo, las principales características de cada uno de ellos que intervienen en la maniobrabilidad: sus dimensiones, la distribución del peso por cada eje y la relación del sistema de dirección entre el volante y las llantas direccionales.

4.1.1 Vehículo de dos ejes

Para el autobús B2, se registró una relación del sistema de dirección de 22:1; es decir, que por cada 22 grados de giro en el volante las llantas viran 1 grado, mientras que la distribución del peso por eje indicó que en el eje delantero se concentran 46.83 kN de peso (4774 kg) y en el eje trasero 94.95 kN (9679 kg). La Figura 4.1 muestran imágenes del proceso de medición de los parámetros.



Figura 4.1 Autobús de dos ejes durante medición de sus principales características

En cuanto a las dimensiones, el autobús tenía una longitud de 12,80 m, con un volado delantero de 2,67 m, una distancia entre ejes de 7,54 m, entrevía delantera de 2,16 m y la entrevía trasera de 1,84, con un ancho de carrocería de 2,60 m. La Figura 4.2 muestra un esquema del autobús con sus principales dimensiones.

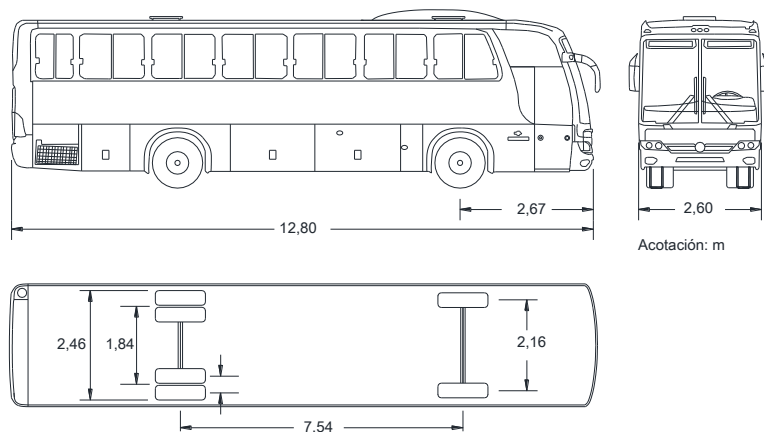


Figura 4.2 Dimensiones principales del autobús de dos ejes

4.1.2 Vehículo de tres ejes

Para el caso del autobús con tres ejes, se registró una relación del sistema de dirección de 22:1, similar a la del B2. En cuanto a la distribución del peso por eje; en el primero se obtuvo un peso de 45,82 kN (4671 kg); en el segundo, 92,97 kN (9477 kg); y en el tercero, 36,43 kN (3713 kg). En la Figura 4.3 se observa el autobús de tres ejes durante el proceso de registro en laboratorio.



Figura 4.3 Autobús de tres ejes durante registro de sus principales características

De igual forma, se registraron las siguientes dimensiones: largo total de 14,98 m, volado delantero de 2,75 m, distancia entre el primer eje y el segundo de 7,42 m, distancia entre el segundo eje y el tercero de 1,46 m, volado trasero de 3,35 m, entrevía delantera de 2,15 m y la entrevía trasera de 1,87, ancho total de la carrocería de 2,54 m. El esquema del autobús con sus dimensiones aparece en la Figura 4.4.

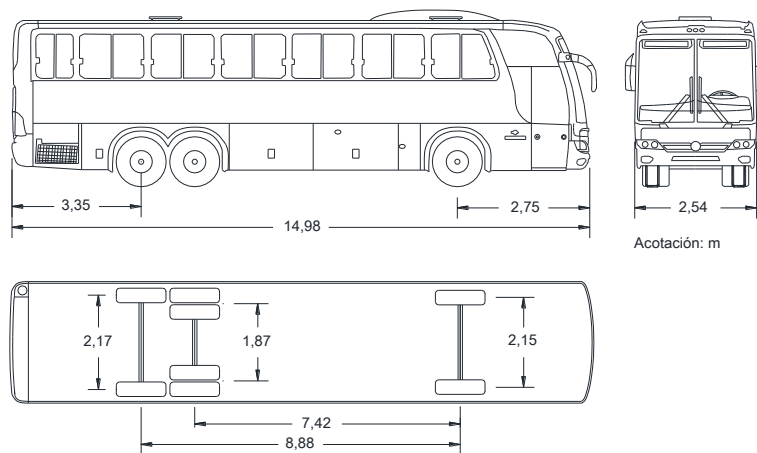


Figura 4.4 Dimensiones principales del autobús de tres ejes

4.1.3 Ejecución de pruebas con vehículos unitarios

Para este tipo de vehículos, fue posible realizar pruebas experimentales a escala real, así como las simulaciones con el programa desarrollado. A continuación, se describen brevemente las pruebas realizadas.

4.1.3.1 Pruebas experimentales

Las pruebas consistieron en ubicar los autobuses en una superficie plana, con espacio suficiente para permitir su libre desplazamiento. Posteriormente, se giró el volante a un ángulo específico manteniéndolo fijo y el vehículo es desplazado a baja velocidad (menos de 5 km/h) para describir una trayectoria circular y posteriormente determinar los radios internos y externos descritos por el vehículo, para estimar el área de barrido.

Estas pruebas fueron ejecutadas para tres condiciones de giro del volante, en ambos sentidos (derecha e izquierda); el ángulo máximo de giro de la dirección fue de dos vueltas completas en el volante (720°) y una y media vueltas (540°). En la Figura 4.5 se observan imágenes durante la realización de las pruebas para ambos vehículos utilizados.



Figura 4.5 Ejecución de pruebas; autobús dos ejes (izq.), autobús 3 ejes (der.)

4.1.3.2 Simulaciones con programa desarrollado

A partir de las dimensiones y demás parámetros registrados de los vehículos de prueba, el programa fue alimentado y se replicaron las pruebas ejecutadas de forma experimental. En la parte superior de la Figura 4.6 se presentan las ventanas del programa en donde fueron introducidas las dimensiones y demás información de cada vehículo; mientras que en la parte inferior se pueden observar las ventanas correspondientes a los resultados y a la animación del seguimiento de la trayectoria resultante. Las ventanas colocadas en la parte izquierda corresponden al autobús de dos ejes; las del lado derecho, al autobús de tres ejes.

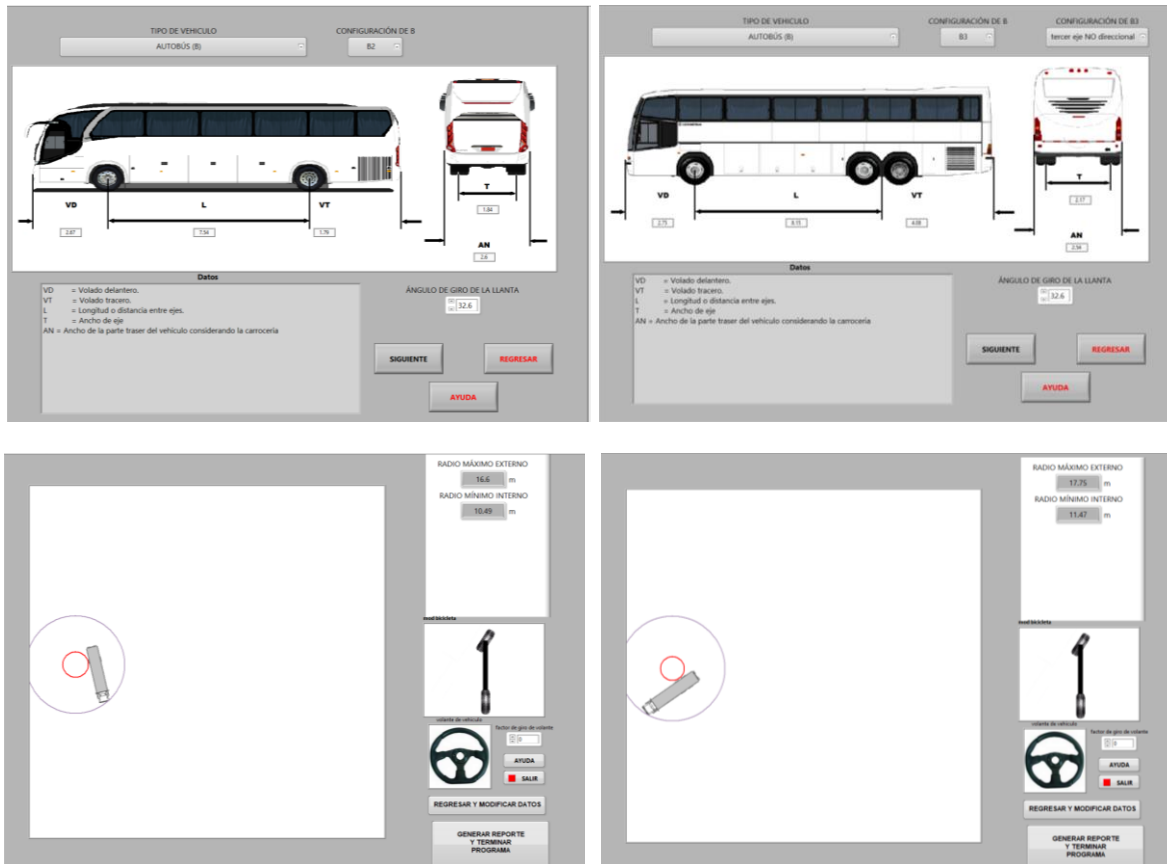


Figura 4.6 Vista de ventanas del programa de introducción de datos (parte superior) y de resultados (parte inferior)

4.1.4 Resultados de vehículos unitarios

Una vez concluidas las pruebas experimentales y la ejecución de las simulaciones con el programa, se procedió a obtener los parámetros de maniobrabilidad, como son los radios máximo y mínimo generados por la descripción de la trayectoria circular seguida por los vehículos para cada condición de giro promedio de las llantas del eje direccional, mediante el uso de los modelos propuestos. Las características de modelación correspondieron a las mismas condiciones de prueba, cuyos resultados obtenidos por ambos métodos fueron comparados para determinar las diferencias existentes. A continuación, se presentan las comparativas de los resultados para cada vehículo, así como las diferencias existentes entre sí.

4.1.4.1 Autobús B3

La Tabla 4.1 muestra los resultados para el autobús de tres ejes (B3), en cuanto a los radios interno y externo, que representan el área de barrido para cada condición de giro en el volante y en cada sentido de giro. Se observa que los

valores registrados en las pruebas de campo y los obtenidos con el programa son muy cercanos entre sí, con diferencias de solamente algunos centímetros.

Tabla 4.1 Comparativa de los radios internos y externos obtenidos de forma experimental y con el modelo para el autobús B3

Sentido de giro	Giro del volante [°]	Giro de las llantas [°]	Experimental		programa	
			ri[m]	re[m]	ri[m]	re[m]
Izquierda	1080	47,9	6,29	13,98	6,26	13,81
	720	32,6	11,31	17,56	11,64	17,71
Derecha	1080	47,0	6,56	14,15	6,53	14,04
	720	32,4	11,66	17,84	11,76	17,80
	540	24,5	16,70	22,04	16,76	21,97

La Tabla 4.2 presenta las diferencias existentes entre ambos resultados. Se observa que la diferencia menor es de 3 cm y la diferencia máxima de 33 cm; lo que representa en porcentaje el 0,5 y el 2,9 %, respectivamente.

Tabla 4.2 Diferencias obtenidas para el autobús B3

Sentido de giro	Giro del volante [°]	Giro de las llantas [°]	Diferencia [m]		Diferencia [%]	
			ri	re	ri	re
Izquierda	1080	47,9	0,03	0,17	0,48	1,22
	720	32,6	-0,33	-0,15	-2,92	-0,85
Derecha	1080	47,0	0,03	0,11	0,46	0,78
	720	32,4	-0,1	0,04	-0,86	0,22
	540	24,5	-0,06	0,07	-0,36	0,32

4.1.4.2 Autobús B2

Para el caso del autobús de dos ejes (B2), los resultados aparecen en la Tabla 4.3. De igual forma, estos datos corresponden a la comparativa para los radios interno y el externo descritos por el vehículo durante la trayectoria circular, seguida para cada condición de giro promedio de las llantas del eje direccional

Tabla 4.3 Comparativa de los radios internos y externos obtenidos de forma experimental y con el modelo para el autobús B2

Sentido de giro	Giro del volante [°]	Giro de las llantas [°]	Experimental		Modelo	
			ri[m]	re[m]	ri[m]	re[m]
Izquierda	1080	46,8	5,82	13,18	6,00	13,17
	720	32,6	10,48	16,53	10,70	16,55
	540	24,5	14,80	20,11	15,46	20,50
Derecha	1080	47,0	5,83	13,19	5,95	13,13
	720	32,9	10,61	16,64	10,56	16,45
	540	24,6	15,09	20,36	15,36	20,48

La Tabla 4.4 muestra las diferencias existentes. Es de notar que la mayoría son diferencias negativas, lo que indica que la distancia generada por el programa es menor que la registrada durante las pruebas experimentales. No obstante, de nueva cuenta las diferencias son pequeñas, con una mínima de 1 cm correspondiente apenas al 0,1% y una diferencia máxima de 66 cm, que corresponde a 4,5 %.

Tabla 4.4 Diferencias obtenidas para el autobús B2

Sentido de giro	Giro del volante [°]	Giro de las llantas [°]	Diferencia [m]		Diferencia [%]	
			ri	re	ri	re
Izquierda	1080	46,8	-0,18	0,01	-3,09	0,08
	720	32,6	-0,22	-0,02	-2,10	-0,12
	540	24,5	-0,66	-0,39	-4,46	-1,95
Derecha	1080	47,0	-0,12	0,06	-2,06	0,45
	720	32,9	0,05	0,19	0,47	1,14
	540	24,6	-0,27	-0,12	-1,79	-0,59

El área de barrido, como se mencionó, está comprendida por los radios interno y externo descritos por un vehículo, al momento de realizar una maniobra con cambio de dirección; por lo que a partir de los datos mostrados en las Tablas 1 y 3 es posible establecer estas áreas para cada caso de prueba.

La cercanía entre los datos obtenidos de forma experimental y con el programa desarrollado permite establecer la certidumbre en el modelo para ser utilizado como elemento de estimación durante la evaluación del desempeño de maniobrabilidad en vehículos unitarios. Esto puede aplicarse, con la reserva

correspondiente, para determinar si en una infraestructura dada el vehículo de interés tendrá el espacio necesario para realizar alguna maniobra de viraje, si invadirá carriles adyacentes o algún otro espacio que no pertenezca al área de tránsito establecida, entre otros; considerando que se realice a muy baja velocidad.

4.2 Configuraciones con un punto de articulación

Debido a la imposibilidad de contar con configuraciones vehiculares con un punto de articulación para realizar pruebas y validar los resultados arrojados por el programa propuesto, se llevó a cabo la simulación del comportamiento de una configuración denominada T3S2, mediante los programas TruckSim® y AutoTURN®. Además de utilizar los datos mostrados, con respecto a la maniobrabilidad de una configuración tipo T2S2, en el Manual de Políticas para el Diseño Geométrico de Carreteras y Autopistas de la AASHTO, [1]. A continuación, se presentan las principales características dimensionales de estas configuraciones vehiculares simplemente articuladas.

4.2.1 Configuración vehicular T3S2

Esta configuración está formada por un tractocamión de tres ejes, al cual le fue enganchado, por medio de un mecanismo de quinta rueda, un semirremolque de dos ejes. Las dimensiones principales de la configuración aparecen en el esquema de la Figura 4.7. Para el análisis, se consideró un Peso Bruto Vehicular (PBV) de 420,14 kN (42828 kg); de los cuales, 57,45 kN (5857 kg) están soportados en el primer eje; 101,27 kN (10323 kg), en el segundo; 101,45 kN (10341 kg), en el tercero; y 79,98 kN (8153 kg), en cada uno de los ejes del semirremolque. Para el sistema de dirección, se estableció una relación de 23,6:1 típica de este tipo de vehículos.

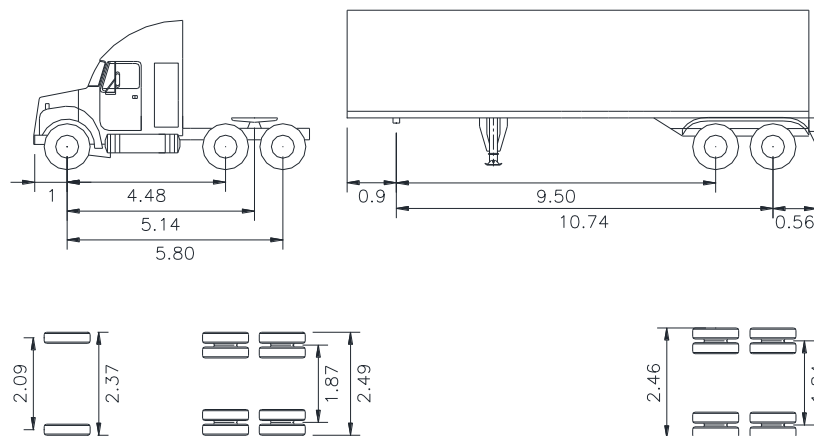


Figura 4.7 Esquema de configuración T3S2 con sus dimensiones principales [m]

4.2.2 Ejecución de pruebas con vehículo T3S2

Como se menciona anteriormente, ante la imposibilidad de contar con configuraciones vehiculares simplemente articuladas, se llevaron a cabo simulaciones numéricas de pruebas de maniobrabilidad con programas comerciales ampliamente validados; para de esta forma contar con información con la cual poder comparar los resultados arrojados por el programa desarrollado y poder establecer su factibilidad de uso.

A continuación, se describe brevemente el proceso de simulación seguido para cada programa comercial empleado, así como para el programa desarrollado.

4.2.2.1 Ejecución de simulaciones con TruckSim®

La Figura 4.8, muestra un par de ventanas del programa de simulación, correspondiendo la izquierda al tractocamión y la derecha al semirremolque. Esta interface gráfica facilita el reconocimiento e introducción de los diferentes parámetros que describen las características de los principales componentes de los vehículos, necesaria para poder llevar a cabo las simulaciones del comportamiento dinámico resultante.

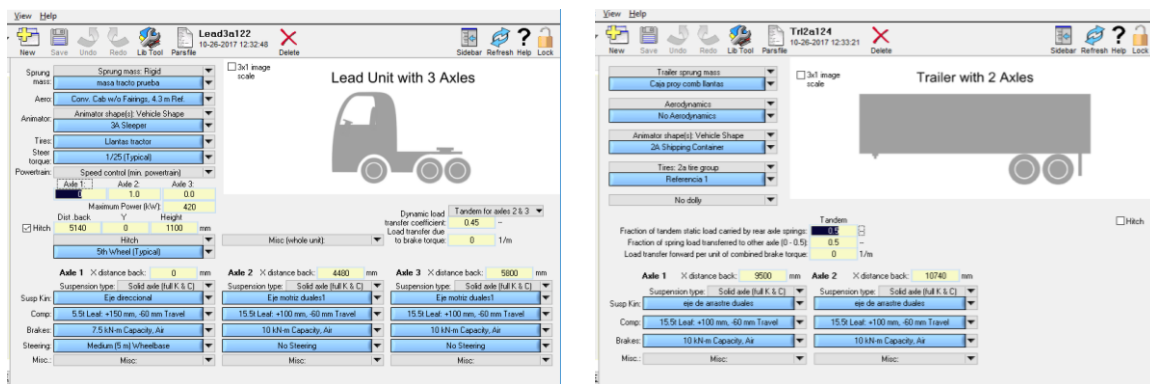


Figura 4.8 Ventanas del programa para configuración T3S2

Para determinar el desempeño de maniobrabilidad de la configuración vehicular, se simuló la ejecución de pruebas a una velocidad de 5 km/h, en una superficie plana para dos ángulos fijos en el volante de dirección, 450° que representan un giro promedio en las llantas de $19,1^\circ$, y otro de 540° en el volante correspondientes a un ángulo promedio en las llantas de $22,9^\circ$. El programa utilizado para la simulación permite tener una animación de la ejecución de la prueba, y muestra una vista en la Figura 4.9 izquierda. Así mismo, permite extraer el registro en el tiempo de todas las variables dinámicas, mostradas en la parte derecha de la Figura 4.9, con gráficas de algunas de estas variables.

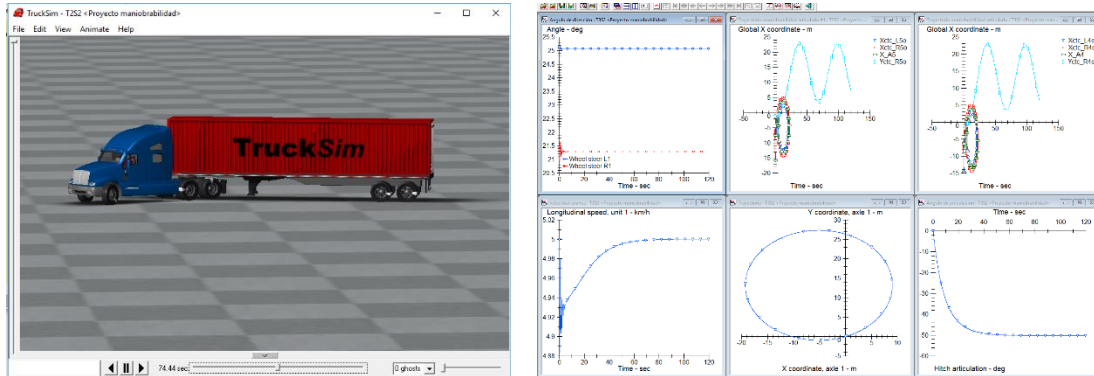


Figura 4.9 Resultados del programa simulación

4.2.2.2 Ejecución de simulaciones con AutoTURN®

Este programa requiere de menor cantidad de información de entrada para la ejecución de las simulaciones, que se limita principalmente a las características dimensionales del vehículo por evaluar. De igual forma que en el caso anterior, se evaluó el desempeño de maniobrabilidad de la configuración para los ángulos de giro de las llantas descritos ($19,1^\circ$ y $22,9^\circ$). En la Figura 4.10 aparece la ventana de introducción de datos, en la que se aprecia el tipo de configuración y las principales dimensiones de esta; como la ubicación de los ejes, los volados delanteros y traseros y la ubicación del punto de enganche de las unidades.

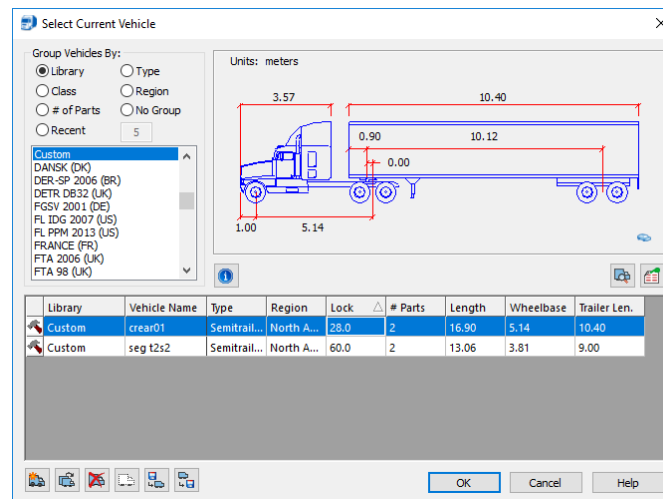


Figura 4.10 Ventana del programa para configuración T3S2

El programa proporciona, como salida, los datos referentes sobre la maniobrabilidad de la configuración, según se observa en la Figura 4.11, parte izquierda. Además, es posible exportar dichos resultados a algún programa de CAD de forma que se puedan comparar contra los planos de zonas específicas de interés para determinar la viabilidad de la circulación del vehículo por esa área. En

la parte derecha de la misma figura, se observa la representación de los resultados en un programa de CAD.

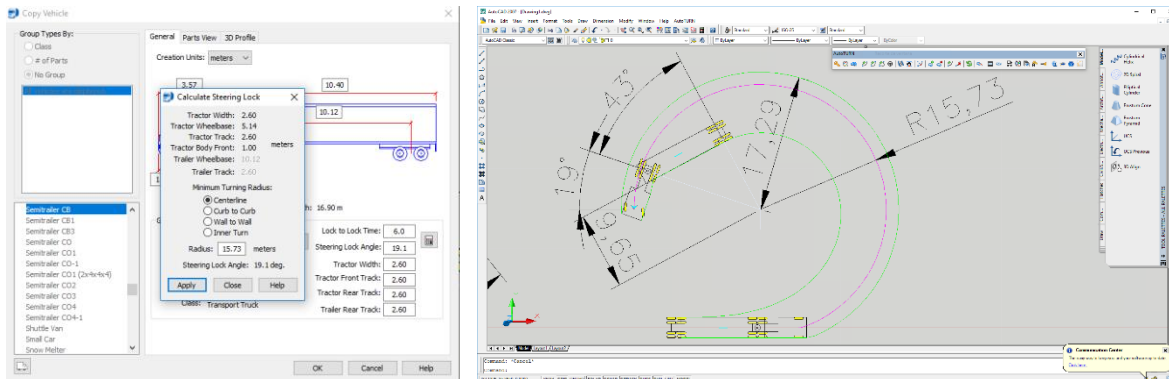


Figura 4.11 Resultados para configuración T3S2

4.2.2.3 Ejecución de simulaciones con programa desarrollado

Las mismas condiciones de prueba y dimensiones de la configuración fueron replicadas con el programa desarrollado. La Figura 4.12 muestra las ventanas desplegadas por el programa para la configuración T3S2. En la parte izquierda se observa la correspondiente a la introducción de las dimensiones y las condiciones de la prueba, mientras que la parte derecha muestra los resultados y la animación.

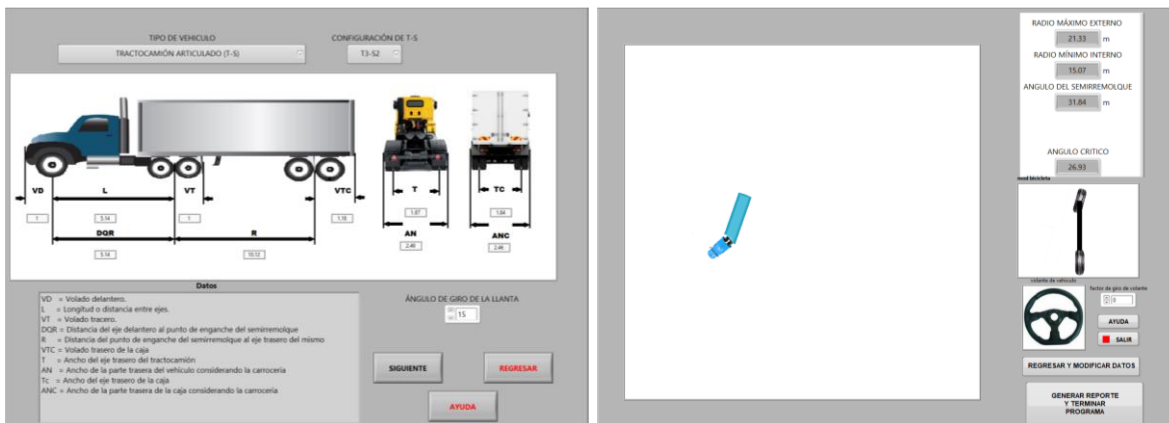


Figura 4.12 Ventanas del programa desarrollado para configuración T3S2

4.2.3 Configuración vehicular T2S2

Para la configuración T2S2, conformada por un tractocamión de dos ejes y un semirremolque de dos ejes, se consideraron las características indicadas en el Manual de Políticas para el Diseño Geométrico de Carreteras y Autopistas de la AASHTO, [1]. La Figura 4.13 muestra el esquema de esta configuración con las dimensiones principales, siendo el ancho de 2,44 m.

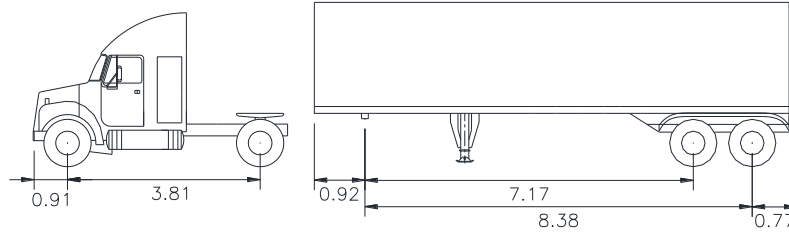


Figura 4.13 Esquema de configuración T2S2 con sus dimensiones principales [m]

4.2.4 Ejecución de pruebas con vehículo T2S2

Para esta configuración, se toman como base los radios descritos en el Manual de AASHTO, obtenidos a partir de un ángulo de giro promedio de las llantas del eje direccional de $20,3^\circ$. Complementariamente se llevaron a cabo simulaciones, al igual que para la configuración T3S2, con programas comerciales. Esto con el fin de tener mayor cantidad de información para comparar los resultados arrojados por el programa desarrollado.

En seguida, se describen brevemente los procesos de simulación con cada programa utilizado.

4.2.4.1 Ejecución de simulaciones con TruckSim®

De igual forma que para la configuración anterior, la evaluación fue realizada a una velocidad de avance de 5 km/h, en una superficie plana para el ángulo promedio de giro de las llantas direccionales de $20,3^\circ$. En la Figura 4.14 aparecen las ventanas para introducir las características y propiedades de los diferentes componentes de las unidades vehiculares.



Figura 4.14 Ventanas del programa para configuración T2S2

La Figura 4.15 izquierda muestra una vista de la animación de la maniobra, mientras que en la parte derecha se presentan las gráficas del historial en el tiempo de las variables necesarias para determinar los parámetros de interés.

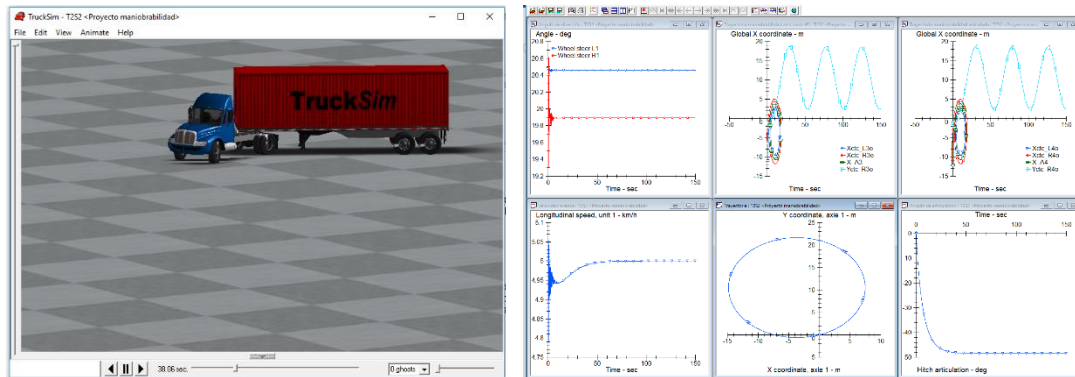


Figura 4.15 Resultados del programa simulación

4.2.4.2 Ejecución de simulaciones con AutoTURN®

Para llevar a cabo el análisis en el programa AutoTURN®, como ya se mencionó, deben ser ingresadas básicamente las características geométricas y dimensionales de la configuración de interés. En este caso, la Figura 4.16 muestra una toma de pantalla con las dimensiones de la configuración T2S2.

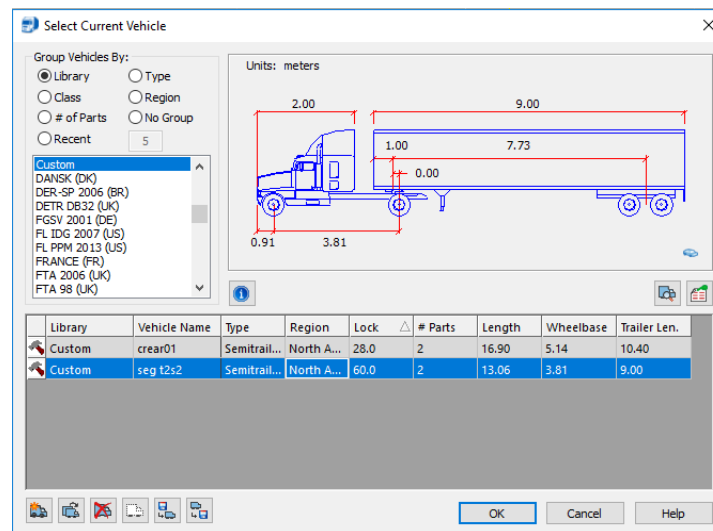


Figura 4.16 Ventana del programa para introducción de datos de entrada de configuración T2S2

En la Figura 4.17, izquierda, fueron incluidos los resultados para la configuración T2S2; mientras que en la parte derecha se puede observar la trayectoria descrita por la configuración mediante la visualización en un programa de CAD.

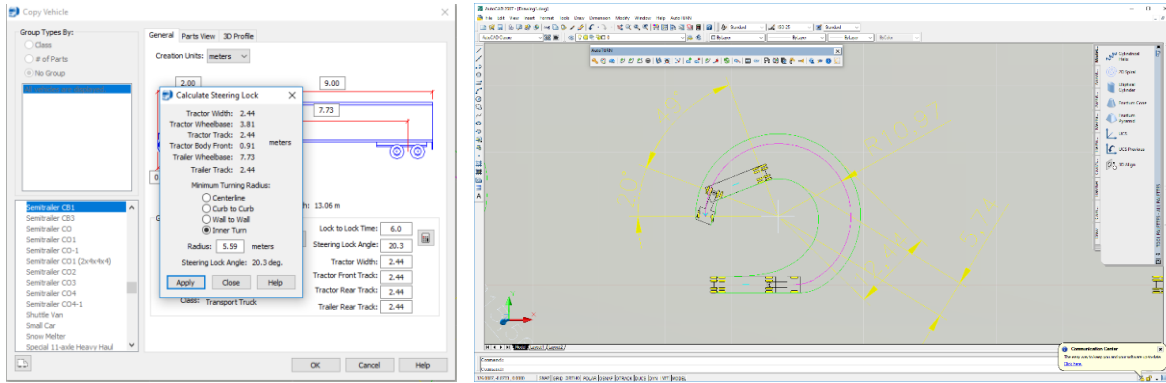


Figura 4.17 Ventanas de resultados para la configuración T2S2

4.2.4.3 Ejecución de simulaciones con programa desarrollado

Al igual que con los vehículos anteriores, para esta configuración vehicular, las pruebas fueron realizadas bajo las mismas condiciones con el programa desarrollado para poder comparar los resultados. En la parte izquierda de la Figura 4.18 aparece la ventana para introducción de datos de entrada; y en la parte derecha, la ventana de resultados.

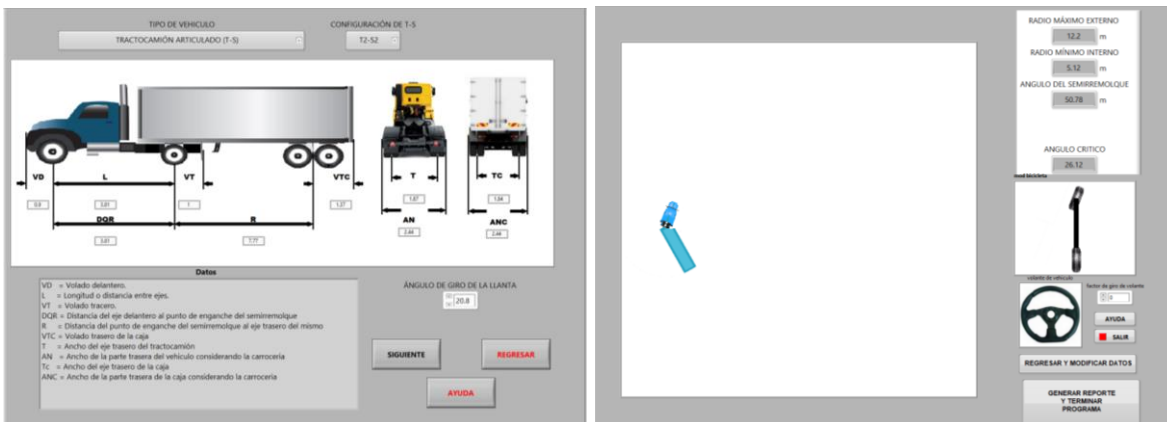


Figura 4.18 Ventanas del programa desarrollado para configuración T3S2

4.2.5 Resultados configuraciones con un punto de articulación

A continuación se muestra la comparativa de los resultados obtenidos con el modelo desarrollado, las simulaciones en los programas mencionados y los datos obtenidos del manual del ASSHTO, para las configuraciones vehiculares con un punto de articulación.

4.2.5.1 Configuración vehicular T3S2

Comenzando con la configuración T3S2, la Tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos para el radio interno, el radio al centro del primer eje de la configuración y el ángulo formado entre las dos unidades. En primer lugar, se observa el caso del programa desarrollado, posteriormente se observan los resultados conseguidos con el programa AutoTURN®.

Tabla 4.5 Comparativa de los radios internos y al centro del primer eje y del ángulo del punto de articulación para configuración T3S2

δ	22.88°			19.07°		
	rd [m]	ri [m]	β	rd [m]	ri [m]	δ
Programa	13,22	5,48	56,2°	15,73	9,59	42,9°
AutoTURN	13,22	5,48	57,0°	15,73	9,59	43,0°
TruckSim 1	13,99	6,87	51,2°	16,58	10,76	40,0°
TruckSim 2	13,50	5,98	54,3°	16,04	10,01	41,8°

Como se distingue, son prácticamente iguales entre sí para ambos ángulos de orientación de las llantas del eje direccional analizados. Después se presentan los resultados obtenidos con el programa TruckSIM® el primer caso es para condición de vehículo cargado y resulta notoria la diferencia en comparación con el modelo y con Auto TURN, con diferencias de 0,77 y 0,85 m para el radio al centro del primer eje; y de 1,39 y 1,17 m con respecto al radio interno. En seguida, se presentan los resultados al analizar el vehículo sin carga y las diferencias se acortan, pues son de 0,28 y 0,31 m para el primer radio y 0,5 y 0,42 m para el segundo. Estas diferencias surgen debido a que mientras el programa TruckSIM® considera dentro del análisis la parte de la distribución de la carga, así como el comportamiento de las llantas y la fricción, el modelo y el programa AutoTURN® no consideran estas cuestiones. Sin embargo, es de resaltar que los resultados del modelo basado en el desarrollo articulado del modelo bicicleta, son idénticos a los de AutoTURN®, ambos implican únicamente la geometría de las unidades.

4.2.5.2 Configuración vehicular T2S2

Con respecto a la configuración conformada por el tractocamión de dos ejes y un semirremolque de dos ejes, los resultados son mostrados en la Tabla 4.6. Considerando como referencia los radios presentados en el Manual de ASSHTO desarrollados para un ángulo de giro de las llantas direccionales de 20,3°, se observa que tanto los resultados obtenidos con el modelo base como con AutoTURN® son muy similares y presentan diferencias, con respecto a los valores de referencia, de alrededor de 30 cm para el radio interno, de 1 cm para el radio al centro del primer eje y de 3° con respecto al ángulo descrito en el punto de

articulación de la configuración. En cuanto a los resultados con TruckSIM®, presentan una diferencia de 9 cm en el radio interno, 17 cm para el radio al centro y 2,47° en el ángulo del punto de articulación.

Tabla 4.6 Comparativa de los radios internos y al centro del primer eje y del ángulo del punto de articulación para configuración T2S2

	δ [°]	rd [m]	ri [m]	β [°]
Programa	20,3	10,98	5,58	48,6
AutoTURN	20,3	10,98	5,59	49,0
TruckSim	20,3	11,13	5,79	48,5
ASSHTO	20,3	10,97	5,88	46,0

De nueva cuenta resalta la proximidad de los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada y con el programa AutoTURN®. Por lo anterior, es posible establecer la confianza en el uso del modelo desarrollado para el análisis de la respuesta en la maniobrabilidad para configuraciones vehiculares con hasta un punto de articulación.

Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos, se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

La maniobrabilidad de los vehículos de carretera es un parámetro importante cuando se diseñan carreteras o trazos urbanos, así como zonas de maniobras. Es importante poder obtener información al respecto de forma rápida y precisa para diferentes tipos de vehículos, por lo que los programas de simulación constituyen una herramienta valiosa. Existen programas comerciales que pueden ser empleados para el análisis de maniobrabilidad; sin embargo, su uso está condicionado a la adquisición de licencias, cuyo costo puede ser elevado. El modelo presentado, desarrollado geoméricamente a partir del modelo bicicleta, en conjunto con la herramienta computacional, representa una alternativa que puede emplearse en la estimación de las características de maniobrabilidad, sin representar costo comercial.

Mediante el proceso de validación, el programa mostró un desempeño satisfactorio que, para el caso de vehículos unitarios, presentó diferencias marginales al comparar sus resultados con los obtenidos de forma experimental, por debajo del 5%. Con respecto a las configuraciones vehiculares con un punto de articulación, el modelo presentó resultados prácticamente idénticos que el programa AutoTURN®; lo cual lo hace factible para su uso en el análisis de este tipo de configuraciones vehiculares. Sin embargo, con los resultados obtenidos con el programa TruckSIM® se pudo observar que la distribución de la carga, en conjunto con el índice de fricción de la superficie y las propiedades de las llantas, afectan la maniobrabilidad; principalmente en la segunda unidad. Por tanto, será importante analizar estas cuestiones y ver la posibilidad de incluirlo dentro de las consideraciones del modelo desarrollado.

A partir de los radios interno y externo generados por el programa, es posible establecer los espacios requeridos para que los vehículos puedan llevar cabo alguna maniobra circular; o bien, a partir de un espacio dado, como puede ser alguna intersección o cruce con características bien definidas, establecer si un vehículo puede circular en esa condición y sugerir si habrá invasión de carriles. Esta información será de utilidad para proyectistas, encargados logísticos y autoridades responsables de regular el tránsito vehicular.

Para futuras etapas, se buscará extender los modelos para abarcar mayor cantidad de configuraciones vehiculares, como es el caso de las doblemente articuladas. Además, es necesario contar con mayor cantidad de pruebas de

validación, considerando aspectos como la distribución de la carga en los vehículos.

Bibliografía

AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 6th Edition, USA 2011 ISBN: 978-1-56051-508-1

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.

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.

TRUCKSIM, Quick Start Guide, "User's Manual, Mechanical Simulation Corporation, December 2009, USA

HVE, "User's Manual", EDC, Oregon, USA, 2006.

AUTOTURN, Transoft Solutions, website: www.transoftsolutions.com

LABVIEW7 Express, User's Manual, National Instruments Corporation, April 2003, USA

Anexo 1. Manual de uso

Para el uso del programa, se creó una interface completamente grafica de forma que resulte sencilla de utilizar para los posibles usuarios. A continuación, se describirá de forma breve el uso de esta interface y los pasos por seguir para llevar a cabo un análisis de maniobrabilidad.

En primera instancia, se presenta una ventana de inicio en la cual se muestra información referente a la nomenclatura utilizada para la designación de las diferentes configuraciones vehiculares de carga pesada. Esta nomenclatura es acorde a la utilizada en la NOM-012-SCT-2-2017. Para continuar, es necesario pulsar el botón de entendido. En la Figura A1.1 se puede apreciar la vista de la pantalla inicial.

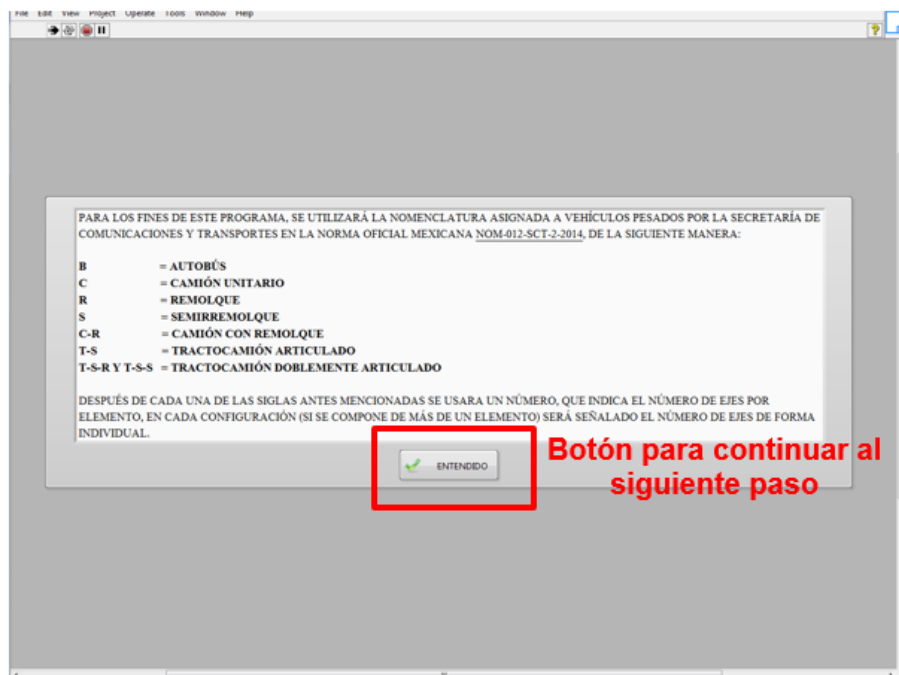


Figura A1.1 Ventana de inicio

En la siguiente ventana se debe seleccionar el tipo de vehículo que desea evaluar, ya sea un vehículo ligero (como automóviles o camionetas), o una configuración de carga pesada. Una vez seleccionado el tipo de vehículo, seleccione el botón siguiente o, si se desea, está la opción de salir del programa. En la Figura A1.2 se presenta la vista de esta ventana.

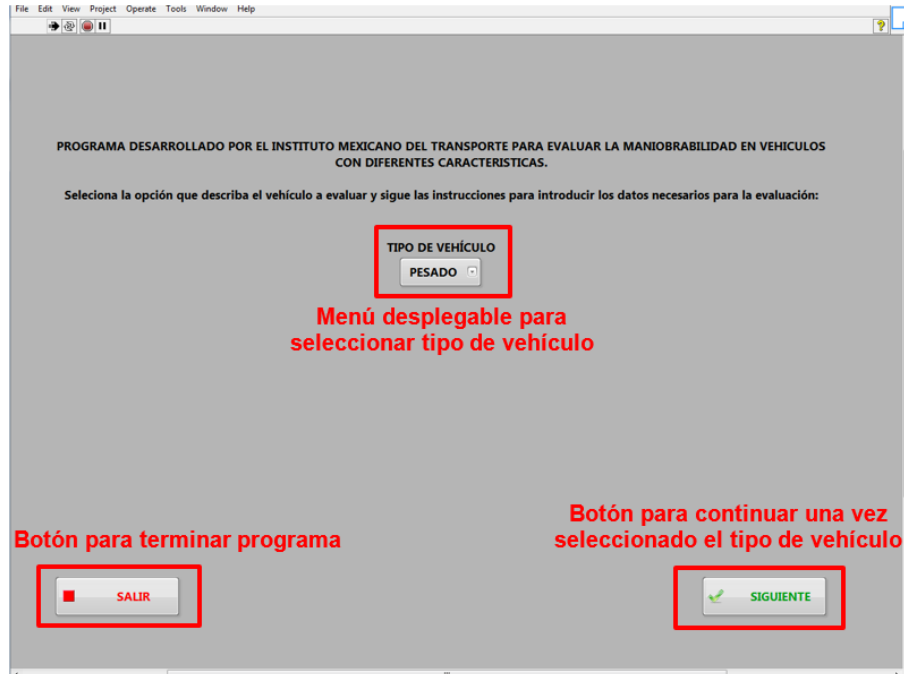


Figura A1.2 Ventana para selección de tipo de vehículo

En el caso de haber seleccionado vehículo ligero, en la siguiente ventana podrá elegir entre automóvil o camioneta y el usuario debe introducir los parámetros necesarios para llevar a cabo el análisis de maniobrabilidad; como son la distancia base entre ejes, los volados delantero y trasero, la entrevía y el ancho total. También, es necesario introducir el ángulo promedio de giro en las llantas del eje direccional para el cual se va a ejecutar el análisis

Esta ventana incluye un cuadro de ayuda en el que se describe brevemente la nomenclatura utilizada. Así mismo, están disponibles los botones para iniciar la simulación, para ir a una ventana de ayuda y para regresar a la ventana anterior. En la Figura A1.3 se puede observar el caso de un vehículo tipo SUV (Sport Utility Vehicle), aunque cabe señalar que la selección del tipo de vehículo ligero y la representación gráfica que se muestra es meramente ilustrativo; ya que para el análisis de la maniobrabilidad solo se considera el número de ejes, las dimensiones solicitadas y el ángulo de giro de las llantas.

Por otro lado, si en la ventana anterior fue elegido un vehículo de carga pesada, tiene tres opciones para elegir una subcategoría de configuración vehicular, vehículos unitarios clasificados con la letra C más la cantidad de ejes, autobuses con la letra B y configuración simplemente articulada del tipo T-S. Un ejemplo del caso de un autobús se puede apreciar en la Figura A1.4 izquierda, mientras que una configuración T-S se observa en la parte derecha de dicha imagen. Es notorio como para este tipo de configuraciones es mayor la cantidad de parámetros necesarios para el análisis.



Figura A1.3 Ventana para introducción de parámetros de vehículo ligero

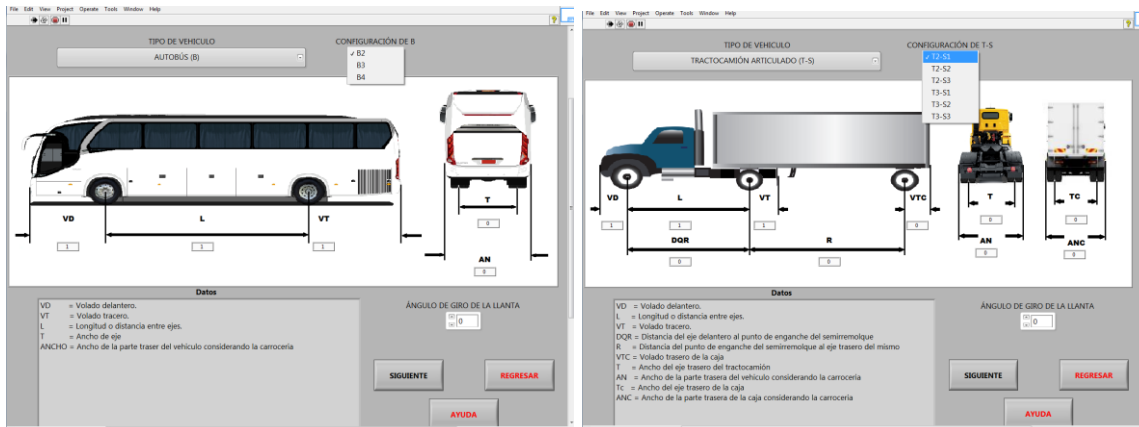


Figura A1.4 Ventana para introducción de parámetros de configuración de carga pesada

Una vez que ha introducido todos los parámetros de análisis, puede presionar el botón siguiente para dar paso a la ventana de visualización de los resultados. En ella aparece un recuadro con la animación del vehículo ejecutando la maniobra y cabe mencionar que esta animación es sólo con propósitos visuales, ya que no guarda una escala real. En la parte superior derecha de la ventana aparecen los resultados de los radios mínimo y máximo obtenidos, además del ángulo de giro que tendría que introducir en el volante de dirección, de acuerdo con la relación entre el giro de las llantas y el volante, para ejecutar esa maniobra. También, es posible observar el comportamiento de acuerdo con el modelo bicicleta en el recuadro central del lado derecho de la pantalla, mientras que en la parte inferior

de dicho recuadro se ubican los botones de ayuda, salida, regreso a la pantalla anterior y el botón para generar el reporte mediante un archivo con extensión de hoja de cálculo. Todo lo anterior aparece en la Figura A1.5.

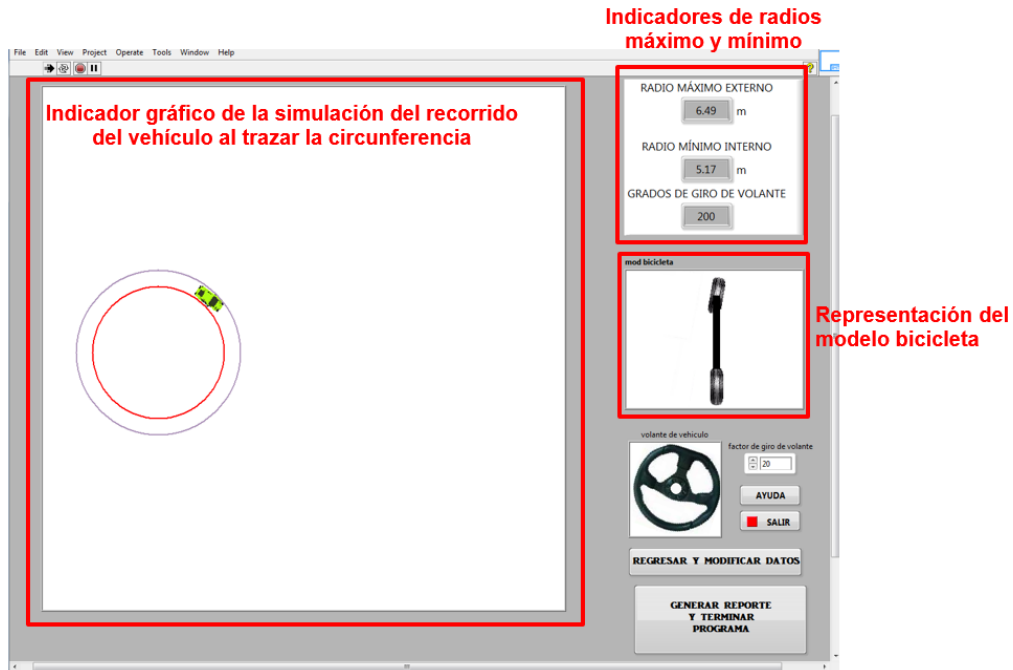


Figura A1.5 Ventana para visualización de resultados

Como se menciona, es posible generar un reporte exportando todos los resultados a un documento de hoja de cálculo. La muestra de la presentación del reporte generado aparece en la Figura A1.6.

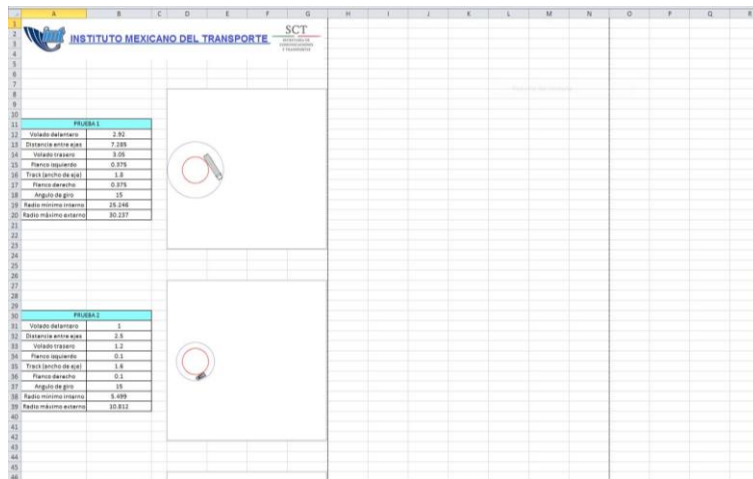


Figura A1.6 Vista de reporte en hoja de cálculo

En cuanto al botón de ayuda que está presente en todas las ventanas posteriores a la inicial; tras presionarlo, aparece la ventana mostrada en la Figura A1.7. en la cual se presenta información sobre los modelos desarrollados para el análisis de la maniobrabilidad.

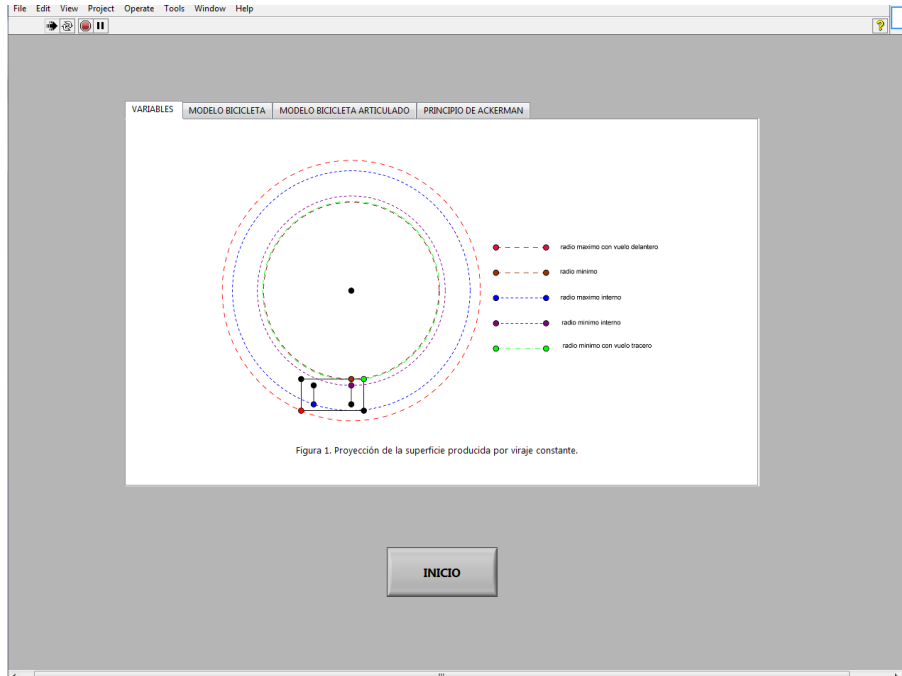


Figura A1.7 Ventana de ayuda



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/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015