

3.10 Modelo existente del tractor Fendt 509C Favorit

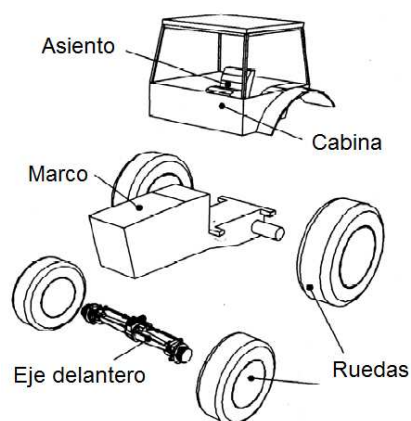
Böhler [2] utilizó como patrón para la creación de su modelo un Fendt Favorit 509C. Este es un tractor 4WD FWA que tiene una potencia motor de 70 kW/94 hp a 2250 rpm, posee una masa total de 6140 kg, una velocidad máxima de 50 km/h, ésta equipado con una suspensión delantera hidroneumática y con unas llantas 520/70 R38 y 480/70 R24 atrás y adelante respectivamente. Aunque el tractor es de tipo 4WD FWA solo se simula en este trabajo el torque aplicado en las ruedas traseras

3.10.1 Marco o Chasis

El modelo de este tractor fue desarrollado en el software SIMPACK®, está compuesto principalmente por los siguientes 6 cuerpos rígidos: un marco, un eje delantero con amortiguación, y las 4 ruedas. La base principal del modelo la constituye el marco del tractor. Mediante el marco se representan varios elementos en el modelo: el motor, la caja de cambios y la transmisión. Es posible hacer la anterior abstracción debido a que la unión entre estos elementos es fija, con cero grados de libertad, también debido a que un tratamiento separado de estas partes llevaría a un análisis más complejo, y por ultimo, porque se pueden representar las propiedades dinámicas de todo el conjunto por medio de una sola masa y un solo tensor de inercia sin tener una diferencia apreciable sobre los resultados de la simulación. Los únicos factores que podrían afectar el comportamiento de este conjunto son deformaciones elásticas y estas no fueron tenidas en cuenta en el desarrollo del modelo [10].

Al marco se encuentran acopladas subestructuras como la cabina y el eje delantero, es decir, estas partes fueron construidas de manera separada y adicionadas al modelo principal. Otros elementos, como las ruedas delanteras y la vía o terreno sobre el cual el modelo del tractor transita, son definidos en el modelo principal. La siguiente figura (3-40) muestra el despiece de las partes que componen el modelo.

Figura 3-40: Despiece en las partes constitutivas principales del modelo de Böhler Fendt 509C [27]



El marco del tractor posee 6 grados de libertad con respecto al eje de coordenadas global del modelo, por su parte las llantas y el eje delantero poseen cada un 1 grado de libertad rotacional con respecto al marco.

3.10.2 Eje delantero

El Fendt 509C posee una suspensión delantera hidroneumática con regulación de nivel. Esta parte del modelo de simulación fue construida de manera muy detallada por Böhler [2], debido a que el eje delantero con la suspensión y el sistema de dirección tienen una gran influencia sobre el comportamiento dinámico del tractor y las cargas sobre sus partes componentes. Para obtener una mayor exactitud en la descripción los cuerpos, el eje delantero fue dibujado previamente en el software ProEngineer (Figura 3-41) y posteriormente importado a SIMPACK® con las correspondientes masas y tensores de inercia.

Figura 3-41: Modelación del eje delantero en SIMPACK® [2]

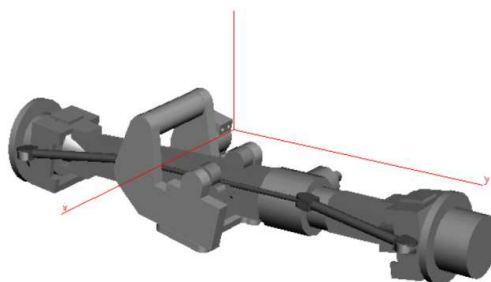
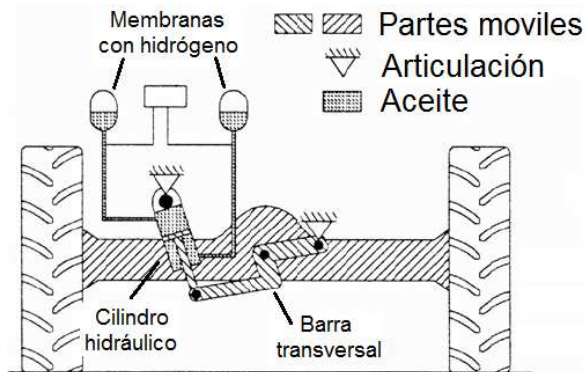


Figura 3-42: Esquema de la suspensión hidroneumática del Fendt 509C [6]



En los tractores Fendt 509 la suspensión delantera la constituyen una barra transversal y un cilindro hidráulico (figura 3-42). Junto a la barra transversal se encuentra una articulación oscilante (rotatoria). En esta articulación se configura un amortiguador torsional, el cual representa el efecto de fricción en la articulación. Adicionalmente fue modelado un elemento que representa el tope o límite de rotación del eje en el eje-X de $\pm 12^\circ$; es decir a partir de su posición central, el eje no puede rotar más de 12 grados con respecto al marco del tractor.

La suspensión hidroneumática es un elemento de fuerza programado independientemente en lenguaje Fortran. El funcionamiento está dado básicamente por dos contenedores o membranas con hidrogeno, los cuales gobiernan la presión en el cilindro hidráulico. El cálculo de la presión en las membranas de hidrógeno se da según la ley de gases para compresión adiabática, esta presión es comunicada al cilindro. La regulación de nivel se lleva a cabo a través del cambio en la presión estática en ambos lados del cilindro hidráulico. Topes elásticos de caucho restringen los desplazamientos verticales prolongados del cilindro [2].

3.10.3 Cabina

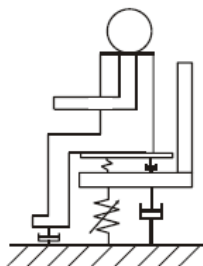
Como ya se mencionó la cabina es una unidad construida como subestructura e integrada al modelo del tractor. La unión entre la cabina y el marco tiene seis grados de libertad y se da a través de cuatro elementos de fuerza resorte-amortiguador, uno en cada extremo o esquina de la cabina, estos elementos poseen tres grados de libertad traslatorios. Son incluidas en el modelo líneas características que proporcionan los coeficientes dinámicos de elasticidad y amortiguación para los tres ejes de coordenadas.

3.10.4 Asiento y conductor

El asiento del conductor se ubica al interior cabina y posee un grado de libertad traslatorio en el sentido vertical. Una construcción detallada del asiento y del conductor no es necesaria para la determinación de cargas en el tractor o para la investigación del comportamiento del tractor en maniobras de transporte, sin embargo una modelación detallada de estas unidades permite llevar a cabo investigaciones con respecto al confort y la seguridad para el operario [10].

Las vibraciones que soporta el operario pueden tener una influencia indirecta sobre el comportamiento dinámico del tractor debido a que cuando el operario sufre una alta carga de vibraciones reducirá la velocidad en búsqueda de una conducción más confortable. En el esquema de la figura 3-43, se presenta el modelo del asiento y del conductor.

Figura 3-43: Esquema del modelo de asiento y conductor [10]



Böhler utiliza una repartición de la masa del operario para el asiento de $5/7$ del peso y para el suelo de la cabina de $2/7$ del peso, la fracción seleccionada para el piso de la cabina representa el apoyo que el operario ejerce con sus pies sobre el piso y con sus manos al timón. Para contrarrestar eventuales levantamientos del operario de la asiento, fue adicionado un amortiguador entre los pies el operario y el suelo de la cabina, lo anterior debido a que no se modela el agarre que el operario hace con las manos sobre el timón.

4. Construcción del modelo del tractor Fendt 509C en SimMechanics

4.1 Parámetros necesarios para la construcción del modelo

Para la construcción del modelo del Fendt 509C y del remolque tipo Tándem en SimMechanics se utilizó como base el modelo desarrollado por Böhler [2] que posteriormente ampliaron Hertrampf [10] y Bippus [1] implementando el Modelo de Llantas de Hohenheim (HRM) [6].

Los componentes principales que se modelaron son:

- Marco del tractor
- Ruedas (Ejes de rueda, Rines y Llantas)
- Eje delantero
- Cabina
- Asiento y conductor
- Marco del Remolque
- Ejes del remolque
- Llantas del remolque

Los parámetros que requieren estos elementos son la posición del centro de gravedad, las masas y los tensores de inercia, estos valores fueron tomados del modelo existente creado por Böhler [2] en el software SIMPACK® y se presentan en el Anexos A de éste trabajo.

Los parámetros para los modelos de Llantas de Hohenheim para las llantas 520/70 R38 y 480/70 R24 fueron proporcionados por el Instituto de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Hohenheim.

En Matlab se creó un archivo *.m* en el cual se declaran un buen número de variables para parametrizar el modelo, de manera análoga como se lleva a cabo en SIMPACK®, en donde se puede crear una base de datos para almacenar variables que posteriormente se utilizarán en la construcción del modelo. Lo anterior facilita la utilización de una misma magnitud en varias partes del mismo modelo. A manera de referencia algunas de estas variables son: *fendt509.MASSE_MOT_GETR=3421 kg* (masa del motor y la transmisión); *fendt509.RADSTAND=2328 mm* (distancia entre ejes). Este archivo (*.m*), para parametrizar el modelo del tractor y el remolque, se adjunta en la copia digital en CD del presente trabajo.

Así mismo fue creada una hoja de cálculo de Excel en la cual se registra la equivalencia entre los sistemas de coordenadas (o Markers), configurados en los cuerpos del modelo de SIMPACK®, y los sistemas de coordenadas del modelo en SimMechanics. De igual manera se adjunta este archivo a la versión digital del presente trabajo.

En la primera superficie o capa del modelo se incluyeron los bloques *Machine Environment* y *Ground* los cuales son necesarios en la construcción de cualquier modelo en SimMechanics, el bloque *Ground* representa sistema de coordenadas globales del modelo. También sobre esta capa se crearon los cuerpos Marco, Suelo y la articulación entre el bloque *Ground* y el cuerpo *Marco*, con los correspondientes seis grados de libertad. Adicionalmente se crearon algunos bloques Sensor para medir la velocidad longitudinal, transversal, la tasa de giro, ángulos de inclinación, entre otros, que adquiere el marco del tractor durante la simulación. Es necesario además incluir bloques de Simulink para la gestión de la información que proporcionan estos sensores y otros ubicados en otras capas del modelo.

Análogamente al modelo de SIMPACK® se crearon, también sobre la primera capa del modelo, subsistemas en SimMechanics que representan las subestructuras Eje delantero, Cabina, Ruedas traseras y delanteras y el Remolque.

4.2 Implementación del Modelo de Llantas de Hohenheim

El modelo de Llantas de Hohenheim es un modelo creado en Simulink, su aplicación en otros modelos es bastante simple debido a que se puede incluir en cualquier superficie o capa del modelo como un bloque o subsistema más.

Al interior de los subsistemas *Ruedas delanteras*, *Ruedas traseras* y *Remolque* se encuentran nuevamente subsistemas que alojan los bloques que simulan a las llantas. Al

interior de estos subsistemas se encuentran los modelos de Llanta de Hohenheim, por lo cual se incluyen en total 8 Modelos de Llanta de Hohenheim (HRM), en el modelo del tractor y del remolque. Se requiere un HRM por cada rueda en el modelo.

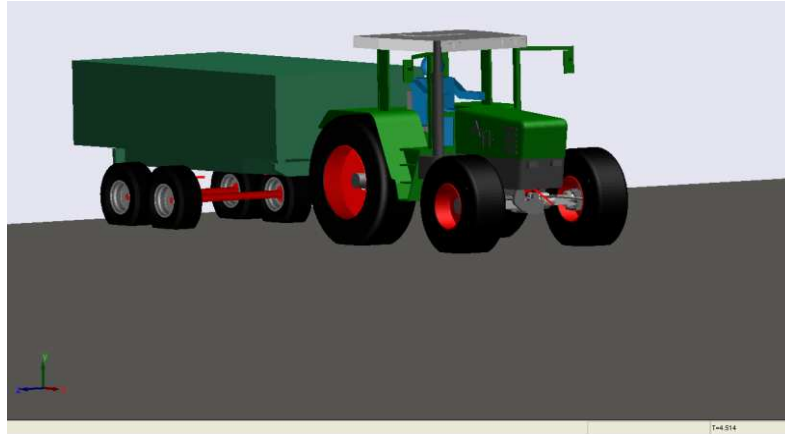
Debido a que en el Equipo de banda plana y en el Equipo de llanta aislada no es posible realizar ensayos con llantas pequeñas, como lo son las del remolque, no se pueden determinar los parámetros del HRM para estas. Por esta razón se utilizan los parámetros de las llantas delanteras del tractor (480/70 R24) para los HRM de las llantas del remolque modelado. Una excepción es del radio de la llanta, el cual es fácilmente medible.

Existen ya un gran número de versiones del modelo de llantas de Hohenheim. Para el desarrollo de éste trabajo se utilizó la versión V2.6 de las llantas 520/70 R38 y 480/70 R24.

4.3 Representación gráfica de los cuerpos en SimMechanics

Como ya se mencionó es posible hacer la representación gráfica de los cuerpos en SimMechanics importando archivos CAD únicamente en formato *.STL*, los archivos disponibles en el Instituto de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Hohenheim del modelo de SIMPACK® se encontraban en formato *.RTL* por lo que fue necesario dibujar nuevamente la mayoría de los componentes del modelo tales como el marco, las ruedas, los rines, la cabina, la tapa del motor, el remolque el eje delantero, los componentes del sistemas de dirección, etc.

La representación gráfica del modelo del tractor y el remolque en SimMechanics se muestra en la figura 4-1, esta es una fotografía tomada de la animación en 3D producida por SimMechanics.

Figura 4-1: Imagen del modelo del Fendt 509C y el remolque tipo tándem en SimMechanics

4.4 Rotación de ejes de coordenadas

Como es costumbre en el campo del diseño y la simulación de vehículos los ejes de coordenadas se definen con el eje de-Z en sentido vertical, el eje-X en la dirección de avance del vehículo y el eje-Y en dirección transversal. SimMechanics tiene preconfigurado un sistema de coordenadas distinto, con el eje-Y en dirección vertical. No es posible cambiar esta configuración de manera global para todo el modelo, por lo tanto se optó por hacer la rotación de los sistemas de coordenadas de cada cuerpo individualmente. Lo anterior se hizo dando un ángulo de giro a los sistemas de coordenadas de -90° en la ventana de configuración de cada uno de los bloques “Body” que conforman el modelo.

4.5 Sustitución del “Moved-Marker”

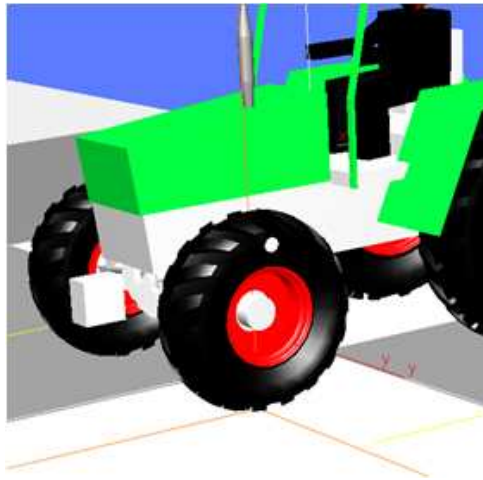
El software SIMPACK® dispone de los llamados “Moved Marker” dentro de su biblioteca de elementos. Este es un elemento que representa un sistema de coordenadas con características especiales muy convenientes para la modelación de vehículos. El software SimMechanics no cuenta con un elemento similar por lo que se hace necesario buscar una alternativa para reemplazarlo.

El Moved-Marker es un marcador que se direcciona y ubica de acuerdo a la posición y ubicación de otro marcador configurado en otro lugar del modelo. Este tipo de marcador es

utilizado para registrar el estado de movimiento de las ruedas. En este modelo el Moved-Marker es definido en las coordenadas globales del modelo y tiene como marcador de referencia un marcador ubicado en el centro de cada rueda. Es necesario configurar un Moved-Marker por cada rueda existente en el modelo. En el Moved-Marker de cada rueda se bloquean los grados de libertad traslacional en el eje Z y rotacionales en los eje X y Y. Esto permite que se mueva en direcciones X y Y pero siempre sobre la superficie del suelo, en el punto de contacto con cada rueda, y gire únicamente alrededor del eje Z. En este marcador se ubican los sensores para medir la posición, la velocidad, y los actuadores para aplicar todas las fuerzas y momentos provenientes del HRM en la rueda.

La figura 4-2 muestra un detalle de la rueda delantera izquierda del tractor y entre la superficie del suelo y la rueda sobresalen en color rojo los ejes de coordenadas del *Moved Marker* de esta rueda.

Figura 4-2: Moved-Marker en el Modelo de SIMPACK®



Después de la evaluar varias alternativas propuestas se aplicó el siguiente procedimiento para el reemplazo de este marcador:

- La fuerza vertical fue aplicada con un actuador Body-Actuator relativo al sistema de coordenadas globales del modelo, en el centro de cada rueda, de esta manera se aplica la fuerza siempre en sentido vertical y la fuerza no gira con la rueda.
- La fuerza lateral y el momento en el eje-X se aplicaron en el centro de la rueda mediante un Body-Actuator adicional, la fuerza y el momento se aplican de

acuerdo al sistema local de coordenadas de la rueda de tal forma que tienen la misma orientación de la rueda.

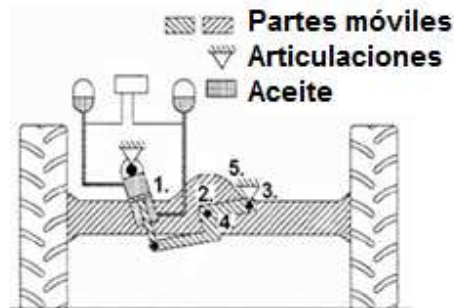
- Para poder aplicar la fuerza longitudinal se debió agregar un cuerpo adicional auxiliar junto a cada eje de la rueda del modelo. Este cuerpo tiene un grado de libertad rotatorio en el eje Y relativo al eje de la rueda, haciendo al cuerpo independiente del giro de la rueda. A este cuerpo se conectó el actuador que transmite la fuerza, este actuador aplica la fuerza en el sistema de coordenadas locales del cuerpo adicionado, de tal forma que la fuerza se aplica siempre en la dirección del movimiento del tractor a pesar de que la rueda esté girando.
- El momento en el eje-Z y el y los momentos en el eje-Y, se aplican en un sistema de coordenadas locales del rin de cada rueda, para que puedan tener la misma orientación en relación a la dirección de avance.

4.6 Modelación de la suspensión delantera.

Como se explicó anteriormente la suspensión delantera del modelo del Fendt 509C esta compuesta por varios elementos, que se pueden apreciar en la columna izquierda de la figura 4-3. No fue posible hacer la modelación de la totalidad de estos.

En primer lugar se intentó trasladar el código fuente de Fortran que proporciona la presión al interior del cilindro hidráulico a bloques de Simulink y aunque se identificaron algunas de las ecuaciones utilizadas no se pudo descifrar la totalidad del código. No se cuenta con una descripción detallada del desarrollo de este elemento en el trabajo de Böhler. Por lo anterior se optó por reemplazar el cilindro hidráulico por un elemento Resorte-amortiguador con coeficientes de elasticidad fijos. Estos coeficientes corresponden a los coeficientes adquiridos por el sistema hidroneumático original en un desplazamiento del cilindro de 5cm. Fue posible adquirir estos coeficientes debido a que el Software SIMPACK® proporciona información de varias magnitudes que adquieren los elementos de fuerza a lo largo de la simulación.

Figura 4-3: modelación de la suspensión delantera [2]



Modelo SIMPACK®

1. Cilindro hidráulico (suspensión hidroneumática con regulación de nivel)
2. Articulación oscilante con topes
3. Rodamiento de carcasa eje delantero
4. Rodamiento de barra transversal
5. Tope para desplazamiento vertical

Modelo SimMechanics

1. Sistema resorte amortiguador con coeficientes fijos.
2. **Articulación oscilante con topes (no simulado)**
3. Rodamiento de carcasa eje delantero
4. Rodamiento barra transversal
5. **Tope para desplazamiento vertical (no simulado)**

Se construyeron por separado en SimMechanics cada uno de los elementos de la suspensión delantera mostrados en la figura 4-3, posteriormente se aislaron estos elementos en el software SIMPACK®, con el fin de comparar individualmente el comportamiento de éstos, luego verificar que su funcionamiento fuera similar y posteriormente incluirlos en el modelo del tractor.

Debido a que el número de elementos de fuerza “Force Elements” que ofrece la biblioteca de SimMechanics es reducido, y no se ofrece la misma cantidad de características que los elementos de fuerza de SIMPACK®, fue necesario utilizar submodelos y bloques de Simulink combinados con bloques de SimMechanics para hacer un reemplazo de cada elemento.

De manera aislada se logró sustituir todos los elementos de fuerza del modelo de SIMPACK® obteniendo los mismos resultados. Sin embargo cuando se integraron dichos submodelos al modelo del tractor para que trabajaran de manera conjunta, los elementos que

representan topes (elementos 2 y 5 en la figura 4-3) bloquearon a las demás articulaciones del sistema de suspensión y no permitieron obtener el comportamiento deseado. Los únicos elementos que se lograron integrar al modelo del tractor, sin que bloquearan el resto de elementos de la suspensión, fueron los rodamientos de la carcasa del eje y el rodamiento de la barra transversal. Los elementos que poseen los mecanismos de los topes no fueron finalmente incluidos en el modelo.

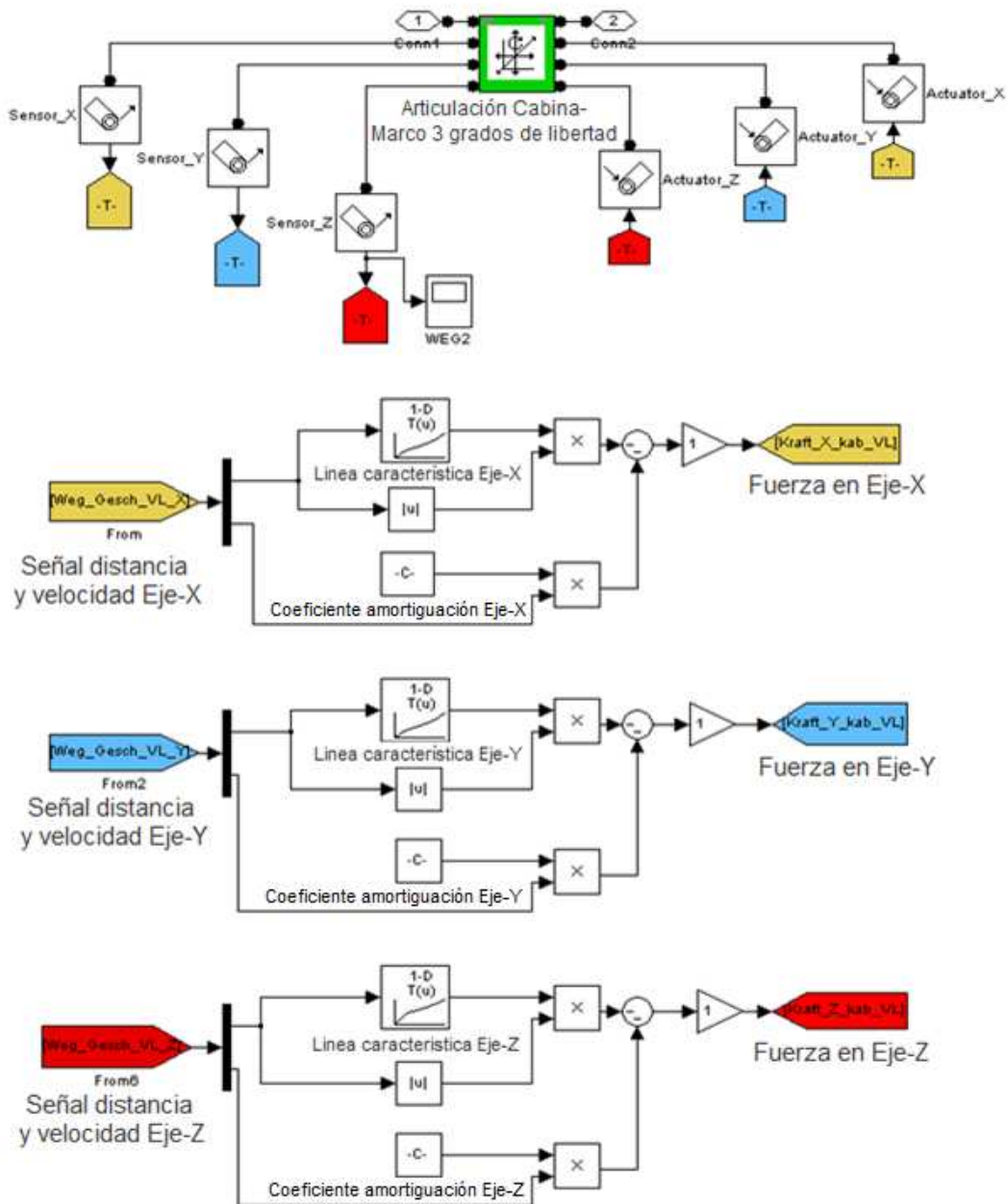
Debido a que no fue posible modelar la articulación oscilante con topes y tampoco el tope vertical de la suspensión en SimMechanics, fue necesario también suprimir dichos elementos del modelo de SIMPACK® con el fin de poder hacer una comparación coherente con los dos modelos en las mismas condiciones.

4.7 Modelación de la cabina

La cabina posee 6 grados de libertad con respecto al marco del tractor y es suspendida a través de 4 elementos Resorte-Amortiguador, ubicados en las esquinas inferiores de la cabina. Estos 4 elementos resorte amortiguador son modelados a través de *Elementos de fuerza* de la biblioteca de SIMPACK®. En estos elementos de fuerza es posible introducir líneas características para la determinación de los coeficientes de elasticidad y amortiguación. Esta característica no es ofrecida por los elementos de fuerza de SimMechanics. Por esta razón fue necesario utilizar submodelos de Simulink para sustituir la amortiguación de la cabina. Uno de estos modelos ubicado en un subsistema se muestra en la figura 4-4. En estos subsistemas se reciben las señales de desplazamiento y velocidad del resorte, medidas en la articulación, se consignan las líneas características en *Look-up Tables* (bloques de Simulink que almacenan tablas de datos), se calcula la fuerza que se debe aplicar a través de bloques de Simulink y luego se lleva esta señal a un bloque actuador de SimMechanics, el cual hace la aplicación de la fuerza calculada de nuevo en la articulación con los tres grados de libertad traslatorios.

La figura 4-4 muestra la ventana de SimMechanics en donde se encuentra modelado uno de las cuatro uniones entre la cabina y el marco del tractor.

Figura 4-4: Modelación de una de las uniones entre la cabina y el marco del tractor con bloques de Simulink y SimMechanics



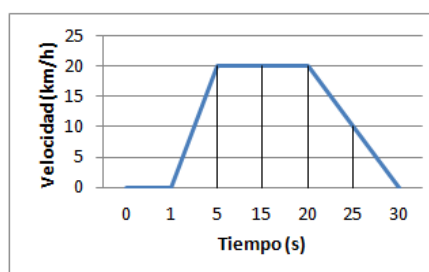
4.8 Regulador de momento de tracción

Para el modelo del tractor Fendt 509C desarrollado por Böhrer y ampliado en el Instituto de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Hohenheim se implementaron controladores de

velocidad en Simulink. De manera análoga se utilizó un controlador similar para el presente modelo. Como variables de entrada se utilizan dos parámetros: el primero una función de velocidad (figura 4-5) definida por el usuario con base en la aceleración que puede adquirir el tractor en la realidad, se toma como criterio para formular esta función de velocidad la experiencia adquirida en los modelos ya desarrollados en el Instituto de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Hohenheim. El segundo parámetro es la velocidad medida en las ruedas traseras durante la simulación.

Figura 4-5: función de velocidad seguida por el tractor

Tiempo simulación (s)	Velocidad (km/h)
0	0
1	0
5	20
15	20
20	20
25	10
30	0



El controlador se encuentra en el subsistema “*Ruedas traseras*”, es un bloque separado en el modelo de simulación. En la figura 4-6 se muestra el esquema del controlador. De la diferencia entre la velocidad medida en la simulación del modelo MBS y la función de velocidad predefinida, se calcula el error de velocidad. Esta diferencia se introduce en un controlador PI, el cual entrega el momento de tracción necesario que debería aplicarse para que el tractor pueda seguir la función de velocidad predefinida (Figura 4-5).

Debido a que el motor del tractor en la realidad no puede entregar la totalidad de su momento nominal a la tracción de las ruedas, se modeló también un sistema de control que limita dinámicamente la señal emitida por el controlador PI, para que el momento de tracción generado sea coherente con el momento de tracción disponible por parte del motor.

Se calcula el momento disponible mediante el siguiente procedimiento:

$$P = \frac{M \cdot \omega}{e} \quad (4.1)$$

Donde:

P = Potencia nominal del motor

M = Momento de tracción

ω = Velocidad angular de la rueda

e = Eficiencia. Se asume una eficiencia de tracción para asfalto del 80%, con base en la experiencia de prácticas realizadas en el pasado en el Instituto de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Hohenheim.

Si se tiene en cuenta que la velocidad angular se puede expresar en términos de velocidad lineal y el radio de la rueda se obtiene:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (4.2)$$

Donde:

v = velocidad lineal de la rueda

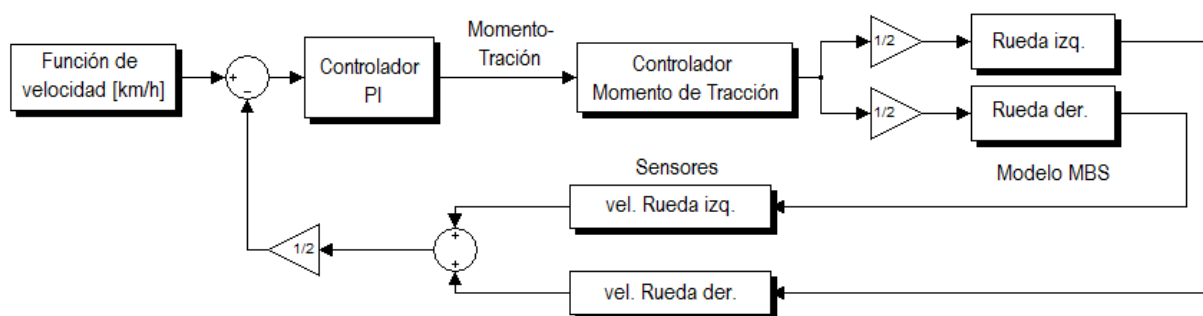
r = radio constructivo de la rueda

Se despeja el momento de tracción obteniéndose la siguiente expresión:

$$M = \frac{P}{v} \cdot r \quad (4.3)$$

Este momento de tracción calculado a partir de la potencia del tractor y su velocidad actual es usado como limite superior para la señal emitida por el controlador PI.

Figura 4-6: esquema del controlador de momento de tracción



4.9 Modelación del remolque tipo tándem

Se modeló un remolque tipo tándem, con un masa en vacío de 2630 kg y una masa total permitida de 8000 kg. El modelo de éste remolque está construido como subsistema en el

modelo del tractor. Fue acoplado al tractor a través de una articulación con tres grados de libertad rotacionales. Está compuesto por cuatro ruedas, dos ejes, un chasis, una carrocería y la carga, estas tres últimas partes están unidas rígidamente entre sí. Los ejes se encuentran unidos al chasis mediante elementos de fuerza resorte-amortiguador con coeficientes fijos de elasticidad, estos elementos representan los amortiguadores tipo ballesta del remolque real.

Cada llanta del remolque dispone también de un modelo de Llantas de Hohenheim (HRM). Aunque las llantas que utilizan originalmente este remolque son diferentes a las del tractor, es necesario usar los parámetros de las llantas delanteras del tractor (480/70 R24) para el modelo de Hohenheim, debido a que en los Equipos de banda plana y de llana aislada no es posible realizar ensayos con llantas pequeñas.

5. Validación del modelo construido

Se comparó el modelo del tractor construido en SimMechanics con el modelo del tractor en SIMPACK® de Böhler, ampliado en la Universidad de Hohenheim que utiliza la Co-simulación, el cual ya ha sido validado confrontando ensayos en el tractor real contra simulaciones de los mismos ensayos.

Para la comparación y validación del modelo de SimMechanics se realizó la simulación de tres maniobras con el modelo del tractor, con el fin de evaluar el comportamiento del tractor en dirección vertical, longitudinal y transversal. Se llevaron a cabo las simulaciones sobre un terreno firme (asfalto) sin obstáculos.

Estas simulaciones se ejecutaron con un tiempo de muestreo de 0,002 s y se configuró un Integrador ode4(Runge Kutta). Las tres maniobras propuestas son:

5.1 Caída libre desde 0.12 m de altura.

El tractor cae desde una altura de 0,12 m, el tiempo simulado para este ensayo es de 5 segundos. Las magnitudes que se evaluaron fueron:

- Posición vertical del eje de la rueda trasera derecha
- Posición vertical del eje de la rueda delantera izquierda
- Fuerza vertical en la rueda trasera derecha
- Fuerza vertical en la rueda delantera izquierda

5.2 Aceleración en un solo sentido y posterior frenado (movimiento unidireccional)

El tractor parte del reposo y acelera hasta alcanzar una velocidad de 20 km/h, posteriormente frena hasta velocidad cero. Se simularon 30 segundos en esta prueba. Con base en las magnitudes enunciadas como de importancia en la simulación del movimiento de tractores por Ferhadbegovic [6], se propuso evaluar las siguientes variables para la prueba de aceleración en un solo sentido:

- Velocidad longitudinal del marco del tractor
- Fuerza longitudinal de la rueda trasera derecha
- Fuerza vertical de la rueda trasera izquierda
- Fuerza longitudinal llanta delantera derecha

5.3 Aceleración y viraje en una curva de 90°

En este ensayo el tractor parte del reposo hasta alcanzar los 20 km/h y posteriormente toma una curva a la izquierda que describe un ángulo de 90°. El tiempo simulado para esta prueba es de 15 segundos. Las variables observadas fueron:

- Velocidad longitudinal del marco del tractor
- Velocidad transversal del marco del tractor
- Tasa de giro
- Aceleración transversal del marco
- Fuerza lateral de la rueda trasera derecha
- Fuerza lateral de la rueda delantera derecha
- Fuerza vertical en la rueda trasera izquierda
- Fuerza vertical en la rueda delantera izquierda

Adicionalmente se realizó una simulación del tractor con el remolque acoplado de la prueba de aceleración y viraje. Sin embargo no se realizó una comparación de este modelo con la simulación del modelo del tractor y remolque de SIMPACK® debido a que al final del proyecto no se contó con el software SIMPACK® para extraer los resultados necesarios.

6. Análisis de resultados

Los siguientes son los resultados obtenidos para cada una de las pruebas mencionadas en el punto anterior.

6.1 Caída libre desde 0.12 m

Como ya se mencionó anteriormente, la prueba de caída libre busca ver el comportamiento del tractor en sentido vertical, las figuras 6-1 y 6-2 muestran la posición vertical del centro de las ruedas trasera derecha y delantera izquierda del tractor.

Figura 6-1: Posición vertical (Eje-Z) del eje, rueda trasera derecha (TD) en caída libre

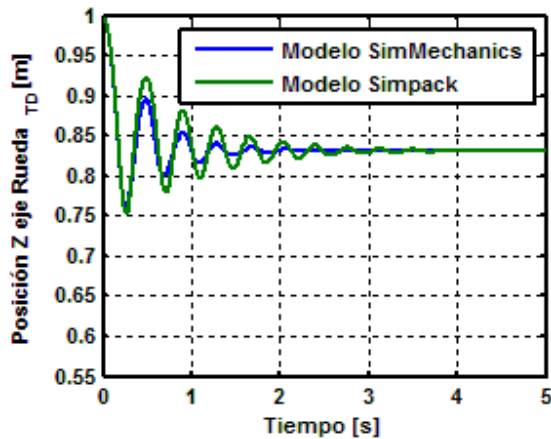
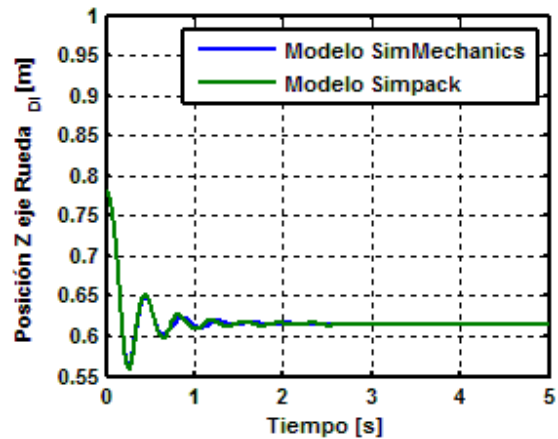


Figura 6-2: Posición vertical (Eje-Z) del eje, rueda delantera izquierda (DI) en caída libre



Las figuras 6-3 y 6-4 muestran las fuerzas obtenidas sobre las llantas trasera derecha y delantera izquierda del tractor

Figura 6-3: Fuerza vertical en el eje, rueda trasera derecha (TD), en caída libre

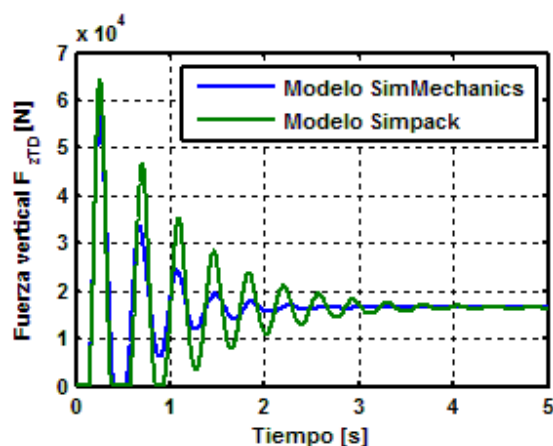
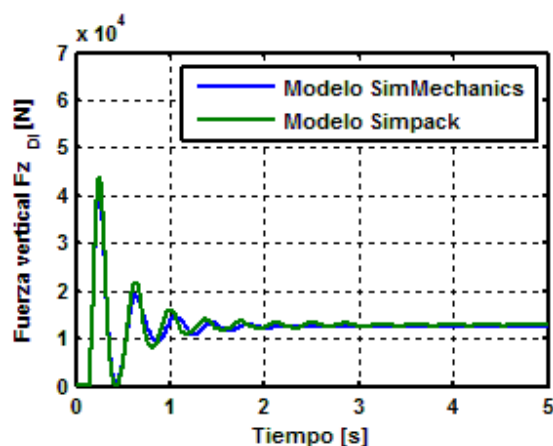


Figura 6-4: Fuerza vertical en el eje, rueda delantera izquierda (DI), en caída libre.



Aunque las gráficas de posición y fuerza tienen una tendencia similar se puede notar que el modelo de SIMPACK® alcanza unas oscilaciones de mayor magnitud que el modelo de SimMechanics. Este fenómeno se investigó a profundidad y se encontró que la exactitud de los resultados en el modelo de SIMPACK® es bastante dependiente del tiempo de muestreo configurado para la Co-simulación. Para verificar los resultados de cada uno de los software en este tipo de fuerzas, se construyeron tres modelos muy simplificados de un sistema *masa-resorte-amortiguador*, uno en el software SIMPACK® con la co-simulación con Simulink, un segundo en SimMechanics y un tercero construido únicamente con bloques de Simulink (netamente operaciones matemáticas). Se compararon posteriormente los resultados de estos tres modelos. El modelo matemático creado con bloques de Simulink arroja los valores reales del comportamiento del sistema masa-resorte, debido a que se programa matemáticamente y no cuenta con bloques especiales de simulación multicuerpo.

Se encontró que para el modelo de SIMPACK® era necesario reducir en gran medida el tiempo de muestreo, incluso hasta 0,0001 segundos, de lo contrario este modelo magnifica las propiedades elásticas del sistema y entrega desplazamientos y fuerzas mayores. Esta disminución del tiempo de muestreo lleva a que aumente en gran medida el tiempo de duración de la simulación, lo que se presenta como una desventaja de SIMPACK®

Adicionalmente las posiciones y fuerzas de la simulación con SimMechanics de la prueba de caída libre del tractor cuentan también con una diferencia significativa en comparación con los valores entregados por el modelo de SIMPACK®. Incluso cuando en este

último se configuraba un tiempo de muestreo de 0.0001 segundos. El modelo en SimMechanics, al parecer, incrementa las propiedades amortiguadores del sistema masa-resorte-amortiguador lo que da como resultado una amplitud menor en los desplazamientos y fuerzas verticales.

A pesar de las anteriores divergencias entre los modelos, se puede notar que los resultados tienen una tendencia similar. A partir de las figuras 6-1 y 6-2 se puede destacar que las ruedas del eje delantero alcanzan una posición de equilibrio en menor tiempo (1 segundo aproximadamente) que las ruedas del eje trasero. Adicionalmente se da una presencia de fuerzas verticales oscilantes (figuras 6-3 y 6-4) por un periodo menos prolongado en el eje delantero que para en el trasero. Para el eje trasero, el cual no cuenta con sistema de suspensión, se presentan mayores oscilaciones y se requiere mayor tiempo para alcanzar una posición de equilibrio.

6.2 Aceleración en un solo sentido y posterior frenado (Movimiento unidireccional)

En la prueba de aceleración y frenado se busca observar el comportamiento del tractor en la dirección de avance del tractor. Las figuras 6-5 y 6-6 muestran la velocidad longitudinal del tractor y la fuerza vertical de la llanta trasera izquierda.

Figura 6-5: Velocidad longitudinal medida en el marco del tractor en movimiento unidireccional

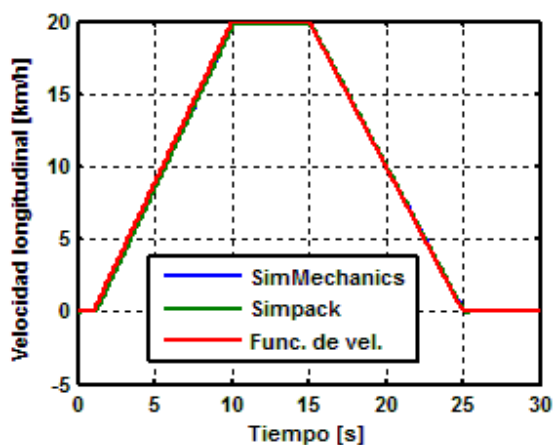
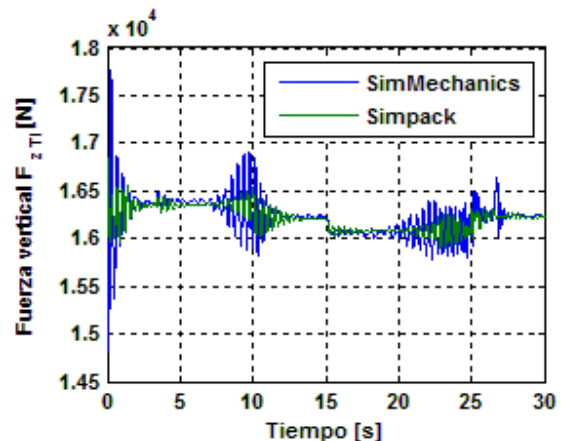


Figura 6-6: fuerza vertical en la llanta trasera izquierda (TI), movimiento unidireccional.



Se observa un seguimiento idéntico por parte de los modelos a la función de velocidad preconfigurada (Figura 6-5), esto demuestra que la aplicación de momento de tracción en ambos modelos es adecuada gracias al controlador de velocidad y de momento de tracción.

A pesar de que el modelo en SimMechanics muestra oscilaciones de mayor magnitud en la fuerza vertical de la rueda trasera izquierda (Figura 6-6) en comparación con el modelo de SIMPACK®, se puede apreciar una tendencia similar en ambos modelos.

Las figuras 6-7 y 6-8 muestran la fuerza longitudinal en la rueda trasera derecha y delantera derecha respectivamente.

Figura 6-7: Fuerza longitudinal en la rueda trasera derecha (TD), movimiento unidireccional

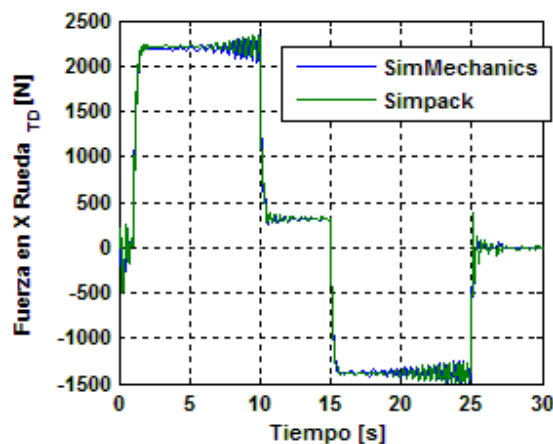
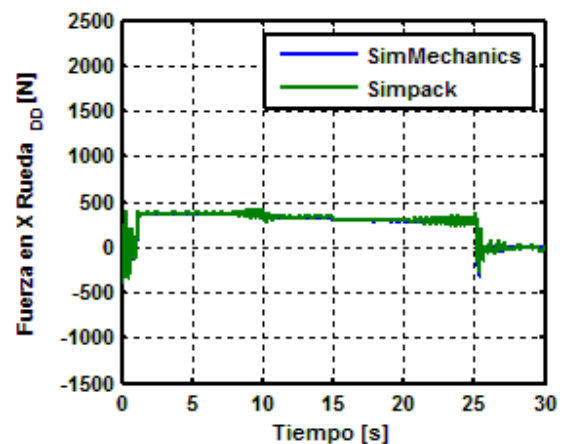


Figura 6-8: fuerza longitudinal en la llanta delantera derecha (DD), movimiento unidireccional



Se aprecia que la rueda trasera derecha (Figura 6-7) es cargada en dirección longitudinal en el momento en el que el tractor es acelerado, llegando la carga longitudinal hasta los 2.2 kN aproximadamente. Posteriormente cuando el tractor desacelera la carga disminuye y toma valores negativos. Este cambio de fuerza corresponde a la fuerza necesaria que se debe aplicar sobre las respectivas ruedas para hacer detener el tractor en estas condiciones.

Por el contrario, sobre la rueda delantera derecha (Figura 6-8) se presentaron cambios mucho menores en la fuerza longitudinal en comparación con la rueda trasera derecha. Esta fue cargada solo positivamente. Este hecho se puede atribuir a que el momento de tracción y frenado es aplicado únicamente en las ruedas traseras.

Las vibraciones observadas tanto en la fuerza vertical como en la fuerza longitudinal se pueden asociar con los cambios de velocidad dado que se presentan en los mismos instantes durante la simulación.

En general se encuentra una coincidencia aceptable entre los resultados del modelo de SimMechanics y los resultados del modelo de SIMPACK®.

6.3 Aceleración y viraje en una curva de 90°

En la prueba de viraje en curva se espera observar el comportamiento del tractor en dirección transversal. A continuación se observa la velocidad longitudinal o en dirección de avance medida en el marco del tractor (figura 6-9), en la figura 6-10 el ángulo de dirección que toman las llantas delanteras para girar en la curva. En la figura 6-11 se muestra la velocidad transversal medida en el marco del tractor.

Figura 6-9: Velocidad longitudinal del tractor para los dos modelos y función de velocidad

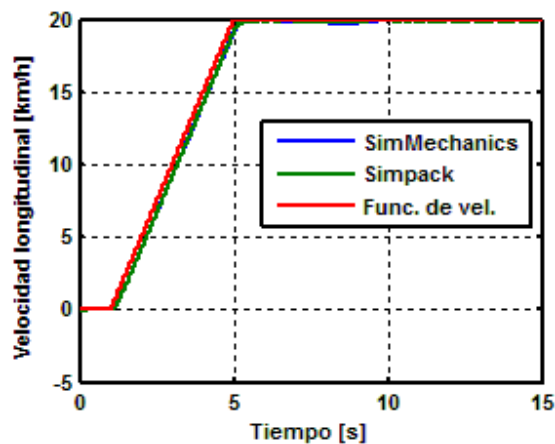


Figura 6-10: Ángulo de dirección para las llantas delanteras para curva de 90° a la izquierda

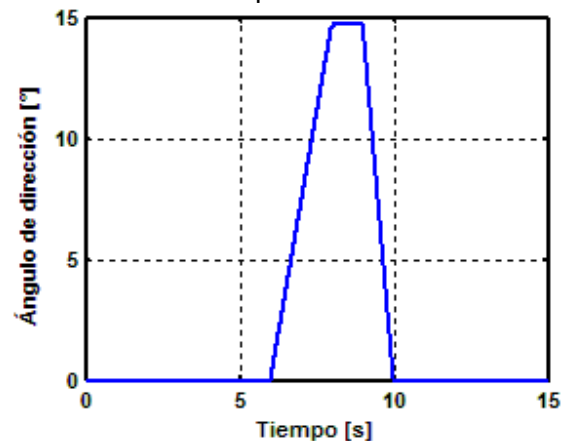


Figura 6-11: Velocidad transversal medida en el marco del tractor

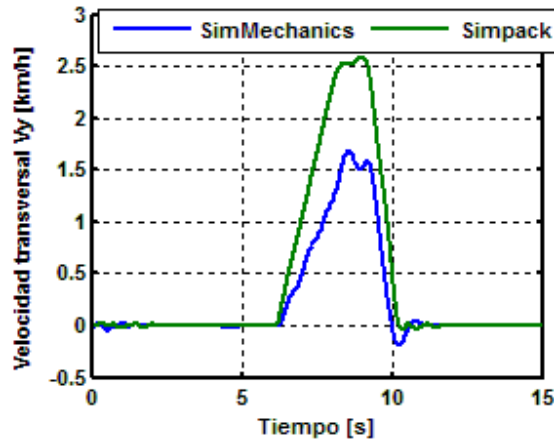


Figura 6-12: Tasa de giro medida en el marco del tractor, para viraje de 90°

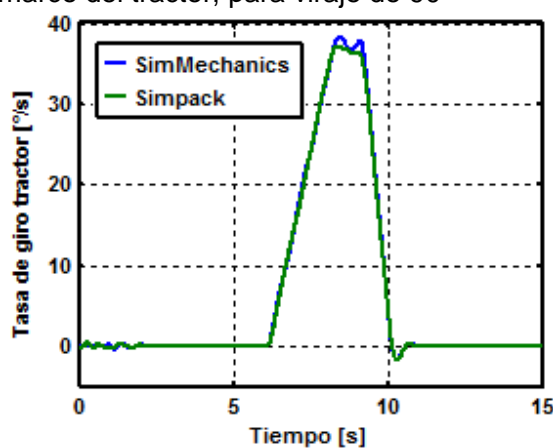
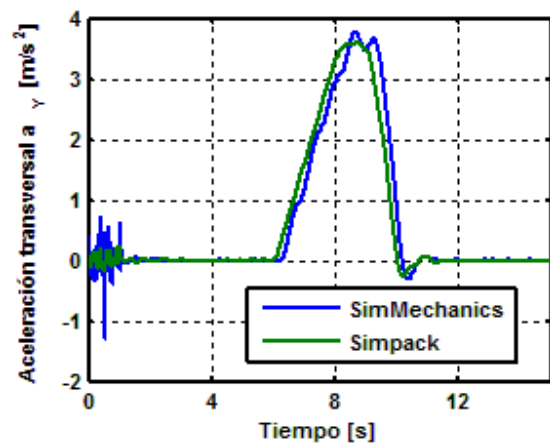


Figura 6-13: Aceleración transversal medida en el marco del tractor, para viraje de 90°



En el ensayo de aceleración y posterior viraje en una curva de 90° la velocidad longitudinal del tractor es idéntica para los dos modelos y se sigue de igual forma la función de velocidad preconfigurada (Figura 6-9).

En contraste con la velocidad transversal alcanzada (Figura 6-11), se observa una diferencia significativa entre los modelos en el momento en el que el tractor toma la curva. Un componente que puede tener una influencia significativa en este comportamiento es el eje delantero con el sistema de suspensión. Como ya se mencionó no fue posible modelar varios elementos del eje delantero en SimMechanics, por lo cual se decidió suprimirlos del modelo de SIMPACK® con el fin de poder hacer una comparación con los modelos en las iguales

condiciones. A pesar de esto y de que se hicieron varias revisiones al modelo de SimMechanics, no se encontraron diferencias que llevaran a descubrir la causa de la desviación observada en la figura 6-11. Se propone que se hagan revisiones adicionales más exhaustivas para encontrar el origen de estas divergencias y que se hagan las respectivas correcciones al modelo.

En las Figuras 6-12 y 6-13 se observa que para la tasa de giro y la aceleración transversal, el comportamiento del modelo de SimMechanics es muy similar al modelo de SIMPACK®. Esto podría llevar a concluir que la diferencia observada en la velocidad transversal medida en el marco del tractor es debida una configuración errónea del sensor con el que se mide. Sin embargo después de probar varias configuraciones de este sensor, este fue el mejor resultado alcanzado.

Figura 6-14: Fuerza lateral en la llanta trasera derecha (TD), para viraje de 90°

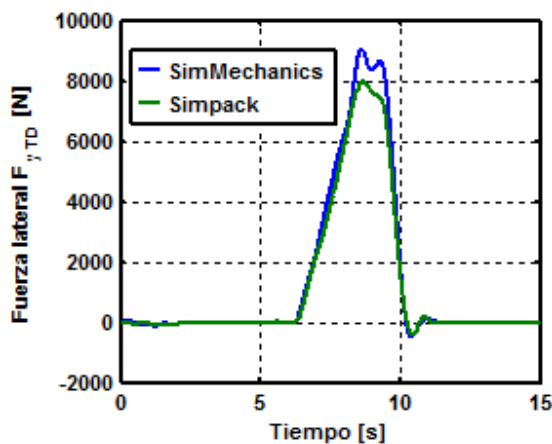
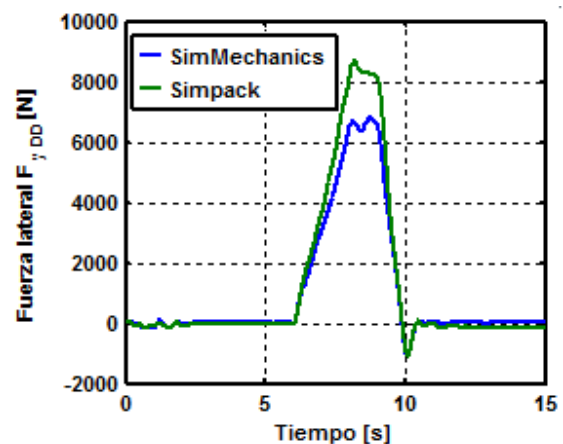


Figura 6-15: Fuerza lateral en la llanta delantera derecha (DD), para viraje de 90°



Se observa una concordancia aceptable en las fuerzas laterales sobre las ruedas mostradas por el modelo de SimMechanics y el modelo de SIMPACK® (Figuras 6-14 y 6-15). Como es de esperarse, es notable el incremento de la carga lateral sobre las ruedas derechas ya que el tractor toma la curva hacia la izquierda. Las fuerzas laterales alcanzadas en el momento en el que el tractor toma la curva llegan a ser casi el 50% de la carga vertical estática de las respectivas ruedas, medidas en el ensayo de caída libre.

Las figuras 6-16 a 6-19 muestran las fuerzas verticales para cada una de las llantas del tractor en la maniobra de curva hacia la izquierda de 90°

Figura 6-16: Fuerza vertical en la llanta trasera izquierda (TI), para viraje de 90°

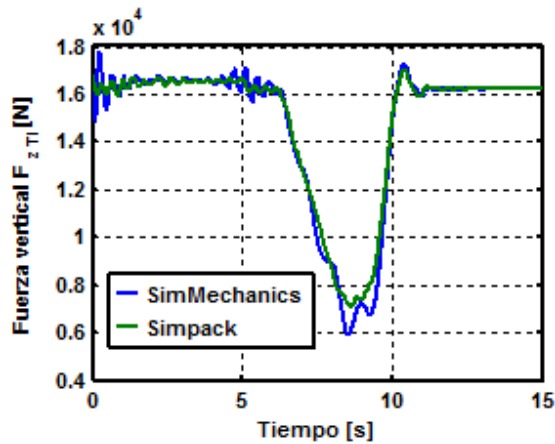


Figura 6-17: Fuerza vertical en la llanta delantera izquierda (DI), para viraje de 90°

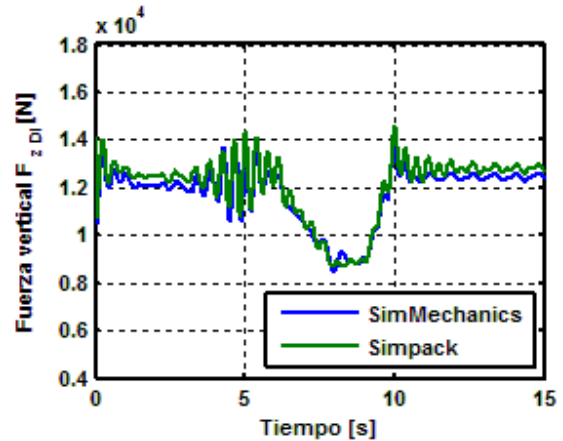


Figura 6-18: Fuerza vertical en la llanta trasera derecha (TD), para viraje de 90°

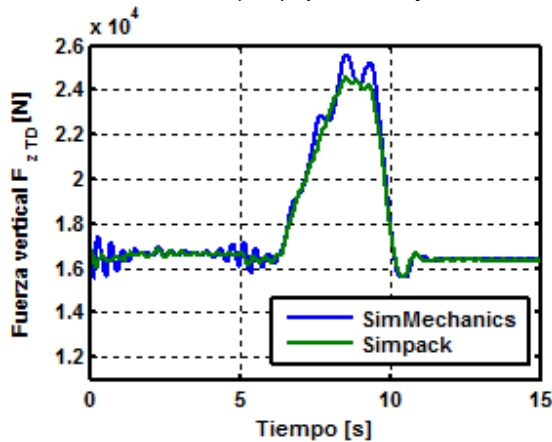
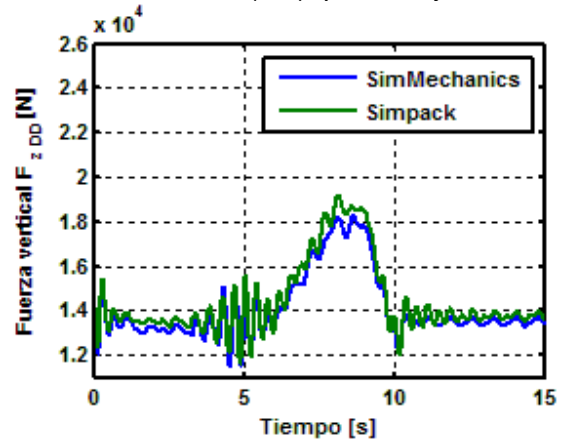


Figura 6-19: Fuerza vertical en la llanta delantera derecha (DD), para viraje de 90°



Se observan vibraciones en la fuerza vertical sobre todas las ruedas. Para las ruedas traseras (figuras 6-16 y 6-18) la amplitud de las vibraciones está alrededor de los 2 kN mientras que la amplitud de las vibraciones para las ruedas delanteras llega a ser de 4 kN (Figuras 6-17 y 6-19). En el caso de las ruedas delanteras se observa que las vibraciones se magnifican cuando el tractor alcanza la velocidad máxima, a los 5 segundos simulados. Esta comparación lleva nuevamente a proponer una revisión en la construcción del eje delantero, dado que la suspensión delantera debería absorber una buena parte de las vibraciones. Contrario a los

resultados que aquí se muestran, se deberían encontrar mayores perturbaciones en el eje trasero ya que este no cuenta con ningún sistema de suspensión. Sin embargo se observa una similitud aceptable en los resultados de los dos modelos.

6.4 Resultados del tractor con el remolque acoplado.

No fue posible hacer la comparación de los resultados del remolque simulado en SimMechanics con el modelo de SIMPACK®, al momento del cierre del proyecto no se completó la preparación del modelo de SIMPACK® para la representación de los resultados. Sin embargo se simuló la maniobra de aceleración y viraje en curva con el modelo de SimMechanics. A continuación en la figura 6-20 se muestran las posiciones de los centros de las ruedas y en la figura 6-21, las fuerzas verticales en los centros de las ruedas del remolque.

Figura 6-20: Posición de los centros de las ruedas del remolque para la maniobra de viraje en curva de 90°

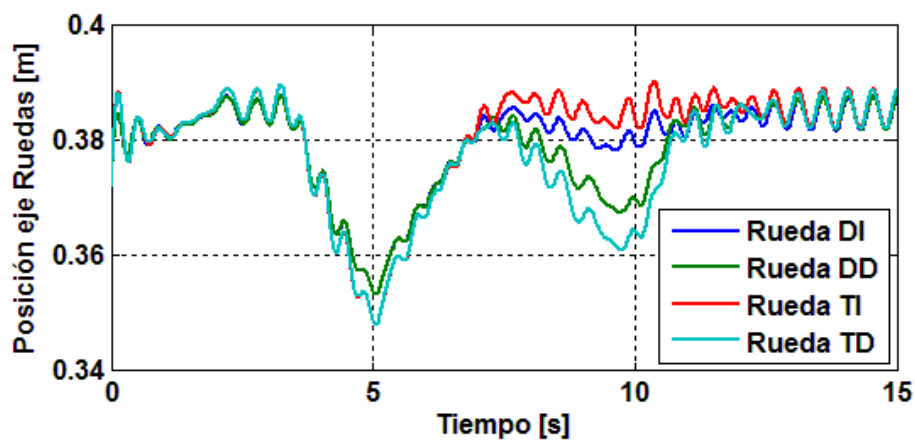
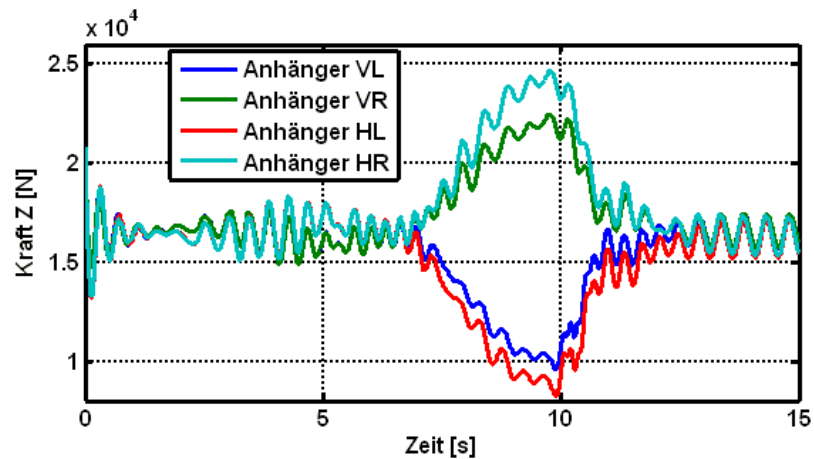


Figura 6-21: Fuerzas presentes en las ruedas del remolque en la maniobra de viraje en curva de 90°



En la gráfica 6-20 alrededor de los 5 segundos de la simulación, se observa que se da un desplazamiento vertical pronunciado de las 4 ruedas del remolque. En ese instante el tractor y el remolque transitan en línea recta sin una perturbación significativa. Es de esperarse que el mayor desplazamiento se presente solo hasta el momento en el que el tractor toma la curva, por lo que se sospecha una inconsistencia en la construcción del modelo o en la medición de los respectivos sensores. Sin embargo el resultado de las fuerzas verticales (6-20) es más coherente en el mismo punto, con excepción de algunas vibraciones relativamente menores, el comportamiento es menos drástico que el de las posiciones. Como es de esperarse, las fuerzas verticales de mayor magnitud se presentan en el transcurso de la curva.

Del segundo 6 al segundo 10, cuando el tractor gira a la izquierda, las ruedas trasera izquierda y delantera izquierda permanecen cerca de la posición de equilibrio y que las ruedas del lado derecho son cargadas y comprimidas. Esto se ve reflejado también en el resultado de las fuerzas verticales, las ruedas del lado derecho son cargadas y por su parte las del lado izquierdo disminuyen su carga. Cuando el remolque transita nuevamente en línea recta la carga de las cuatro llantas vuelve a ser igual.

6.5 Tiempos de las simulaciones

Como parámetro adicional para la comparación del desempeño de los dos modelos, se tomó el tiempo empleado por estos para ejecutar cada simulación. El resultado obtenido se resume en la siguiente tabla:

Tabla 6-1: comparación de tiempos de simulación para las maniobras propuestas

	SIMPACK®	SimMechanics	Porcentaje
Caída libre (5 s)	16.6 s	58.8 s	354%
Aceleración y frenado (30 s)	90 s	206 s	229%
Aceleración y curva de 90°(15 s)	46.7 s	116.3 s	249%

Se observa que los tiempos de simulación para la herramienta SimMechanics son mucho mayores que los tiempos para el software SIMPACK®, pese a que la animación en el Software SimMechanics fue desactivada. Como era de esperarse la maniobra más larga, aceleración y frenado, fue la que tomo un tiempo de simulación más largo.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Se construyó un modelo de simulación multicuerpo de un conjunto tractor/remolque en el Toolbox SimMechanics de Matlab/Simulink. La geometría del tractor, la masa de los componentes, los tensores de inercia, etc. necesarios para la construcción del modelo, fueron tomados de un modelo existente ya validado, construido en el software SIMPACK®. Se realizó una comparación del funcionamiento de los dos modelos para comprobar la validez del modelo construido en SimMechanics. El modelo construido trabaja conjuntamente con el Modelo de Llantas de Hohenheim.

Aunque los resultados mostrados por el modelo de SimMechanics y de SIMPACK® tuvieron en su mayoría una buena correspondencia, se debe decir que el modelo del tractor del Fendt 509, construido en SimMechanics ofreció un desempeño menor que el software SIMPACK®, en términos del tiempo utilizado para ejecutar las mismas simulaciones. Adicionalmente se pudo apreciar que SIMPACK® ofrece un entorno de trabajo más intuitivo para la construcción del modelo en comparación con SimMechanics.

En la biblioteca de elementos de SimMechanics es posible encontrar bloques que modelan el funcionamiento de gran número de elementos ofrecidos por SIMPACK®, sin embargo es más numerosa y variada la lista de elementos para simulación mecánica que ofrece el software SIMPACK®.

Los sistemas de coordenadas en los bloques "Body" de SimMechanics, usados para unir elementos como sensores, actuadores, articulaciones etc., generaron un gran número de dificultades en su configuración durante la construcción del modelo. Se encontró una configuración más sencilla de estos elementos en el software SIMPACK®.

Los aspectos que tienen que ver con la configuración de la geometría del modelo se facilitan en el software SIMPACK® debido a que en su ventana de configuración muestra las modificaciones hechas en la representación gráfica del modelo en tiempo real. Esto facilita la comprensión de las configuraciones y cambios que se hacen en el proceso de construcción del modelo.

Dado que el número de bloques "Force-elements" ofrecidos por SimMechanics es reducido, es necesario buscar estrategias para introducir fuerzas al modelo, por ejemplo mediante señales de Simulink que sean conectadas a bloques *Actuador*, los cuales actúan sobre una articulación con determinados grados de libertad. Estos procedimientos llevan a que se aumenten los grados de libertad del modelo y por lo tanto a un aumento en el tiempo de ejecución y resolución de las simulaciones.

Como ventaja del Toolbox SimMechanics se puede mencionar la utilización de Matlab y de bloques de Simulink para la parametrización y para el diseño de mecanismos de control del modelo, evitando así el uso de un segundo software o lenguaje de programación. Esto puede llevar a una reducción de los costos en la adquisición de licencias de funcionamiento para el uso de estos software.

Una herramienta de gran importancia para la simulación de las ruedas del tractor es el "Moved Marker", ofrecido únicamente por SIMPACK®. Aunque fue posible hacer el reemplazo de este elemento por medio de bloques de Simulink y SimMechanics para el nuevo modelo, este proceso fue dispendioso y requirió bastante tiempo la búsqueda de la alternativa que cumpliera en forma satisfactoria con las funciones realizadas por dicho elemento. Se toma como una desventaja del software SimMechanics la ausencia de este elemento en su biblioteca.

A medida que la complejidad del modelo fue aumentando y se fueron agregando componentes y bloques, el tiempo requerido para ejecutar simulaciones creció de manera importante. Así mismo conforme aumentó la complejidad del modelo se presentaron colapsos, bloqueos y mensajes de error inesperados en Matlab/ Simulink que obligaron a reiniciar el programa. Este hecho lleva a concluir que no fue posible solucionar los problemas de estabilidad reportados por el uso de la Co-simulación con la que se trabaja en el instituto de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Hohenheim.

Para el software SIMPACK® se observó que los resultados del ensayo de caída libre vertical dependieron fuertemente del tiempo de muestreo configurado en la Co-simulación. Para

lograr una precisión en estos resultados es necesario reducir el tiempo de muestreo de la Co-simulación, hecho que aumenta el tiempo necesario para ejecutar la simulación.

Las posibilidades de animación de los resultados ofrecidas por el software SIMPACK® son mayores que las ofrecidas por SimMechanics, sin embargo es de anotar que Matlab cuenta con paquetes adicionales que brindan soluciones para la animación de simulaciones. Esto implica la compra de software adicional, lo que se presenta como desventaja para SimMechanics.

En el marco de este proyecto la única ventaja que tuvo la utilización del software SimMechanics fue la no utilización de Co-simulaciones para poder implementar Modelo de Llantas de Hohenheim, lo que evito el uso del software SIMPACK. Por el contrario las prestaciones para la construcción del presente modelo fueron bajas para el SimMechanics

7.2 Recomendaciones

Con base en los tiempos de simulación obtenidos se recomienda seguir trabajando con el modelo de tractor e implementos que utilizan la Co-simulación entre SIMPACK® y Simulink. Sin embargo se recomienda también optimizar el modelo construido en SimMechanics con el fin de reducir los tiempos de simulación.

En primer lugar se recomienda hacer la validación del modelo de la simulación construido en SimMechanics del modelo del tractor Fendt 509 junto con el remolque tándem construido y extraer los respectivos análisis.

Es necesario hacer la modelación completa del sistema de suspensión hidroneumática del eje delantero del tractor Fendt 509C en el software SimMechanics, con el fin de hacer una validación más precisa frente al modelo de SIMPACK® y debido a que este sistema tiene una influencia importante en el comportamiento dinámico del tractor. Para esto se recomienda hacer un estudio más exhaustivo del elemento de fuerza "Cilindro hidráulico", programado en Fortran, posteriormente hacer la implementación del elemento en Matlab/Simulink y evaluar las posibilidades de utilizar paquetes adicionales de Simulink como SimHydraulics.

Ya que en la construcción del modelo en SimMechanics, una de las alternativas que se usó para reemplazar "Force Elements" de SIMPACK®, implicó la adición de articulaciones a las

cuales se conectaron "Joints Actuator", se recomienda investigar otras alternativas y revisar el modelo con el fin encontrar puntos en los cuales se pueda reducir el número de articulaciones y grados de libertad, buscando reducir el tiempo de las simulaciones.

Se observó que la exactitud de los resultados generados por SIMPACK® son bastante dependientes al tiempo de muestreo, se recomienda indagar la causa de las diferencias generadas por esta configuración con expertos de la firma SIMPACK®.

La utilización de paquetes adicionales de Matlab especializados en la representación de resultados de simulaciones como Simulink 3D-animation es una alternativa para obtener animaciones del modelo de construido, adicionales a las que ofrece el paquete SimMechanics.

Es posible ampliar el modelo del tractor Fendt 509C adicionando otros modelos de implementos como el remolque de dos ejes y la enfardadora de rollo e incluyendo mecanismos de control desarrollados en anteriores trabajos, por ejemplo controladores de dirección.

Se recomienda aplicar las herramientas para simulación física ofrecidas por Matlab/Mathworks en la simulación de sistemas de otros campos de la ingeniería agrícola, como la poscosecha, la maquinaria agrícola y los riegos, teniendo en cuenta las ventajas que estas herramientas ofrecen y el relativo fácil acceso a Matlab que se tiene en la Universidad Nacional.

A. Anexo: Parámetros del modelo del tractor y remolque.

- Datos generales del tractor [2]:

Tipo:	4WD FWA
Potencia:	70 kW – 94 hp
Numero de cilindros:	4
Peso vacio (DIN 70020)	48,75 kN
Peso total permitido:	73,6 kN
Distancia entre ejes:	2.328 mm
Trocha adelante:	1.830 mm
Trocha atrás:	1.806 mm

Figura A-1: sistema de coordenadas y grados de libertad [2]

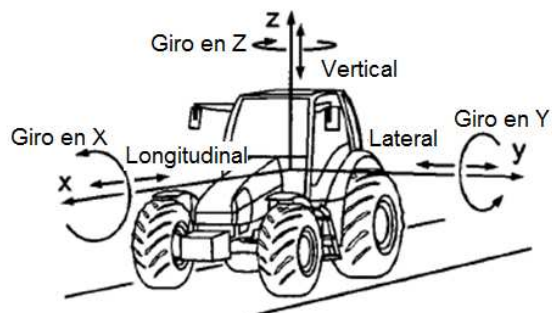


Tabla A-1: Masas, inercias, posiciones de centros de gravedad de los componentes del tractor. Los momentos de inercia se refieren al respectivo centro de gravedad. La ubicación del centro de gravedad se da para cada sistema de referencia del respectivo cuerpo [2].

Cuerpo	Masa [kg]	Momentos de inercia [kg m ²]				Ubicación centro de gravedad [m]		
		xx	yy	zz	Desv.	X	Y	Z
Marco	3420	532	3757	3266	xz: 497	1,1	-	0,17
Rin ruedas traseras	119	6	10,4	6	-	-	-	-
Llanta ruedas traseras	153	55,6	92,7	55,6	-	-	-	-
Cabina	663+23*	400	320	360	-	0,361	-	0,665
Asiento	7	0,04	0,04	0,1	-	-0,05	-	-
Conductor	58*	11,4	13	11,8	-	-	-	0,22
Barra transversal eje del.	127	4,92	5,38	7,45	-	0,042	0,105	0,009
Eje del. con guardabarros	367	164	15	165	-	0,02	0,034	0,013
Rin ruedas delanteras	53,7	2,6	3,8	2,6	-	-	-	-
Llanta ruedas delanteras	93	13,7	22,2	13,7	-	-	-	-

*La masa real del conductor 81 kg se divide en: 2/7 para la cabina y 5/7 para el conductor.

Tabla A-2: Ubicación de sistemas iniciales de referencia medidos desde la mitad del eje trasero [2].

Cuerpo	Sistema de referencia del cuerpo	Vector desde la mitad del eje tras.		
		x	y	z
Marco	Mitad del eje trasero	-	-	-
Rines tras.	Mitad de la rueda	-	± 0,903	-
Llantas tras.	Mitad de la rueda	-	± 0,903	-
Cabina	Suelo de la cabina sobre el eje tras.	-	-	0,198
Asiento	Superficie del asiento, centro.	0,299	-	0,814
Conductor	Punto de contacto en el centro del asiento	0,299	-	0,808
Barra transversal	mitad del apoyo con el marco	2,402	-0,25	-0,141
Eje del. Con guardabarros	mitad del eje delantero	2,328	-	-0,216
Rines del.	Mitad de la rueda	2,328	± 0,915	-0,216

- **Parámetros de la suspensión de la cabina [2].**

Masa de la cabina incluyendo guardabarros: 663 kg

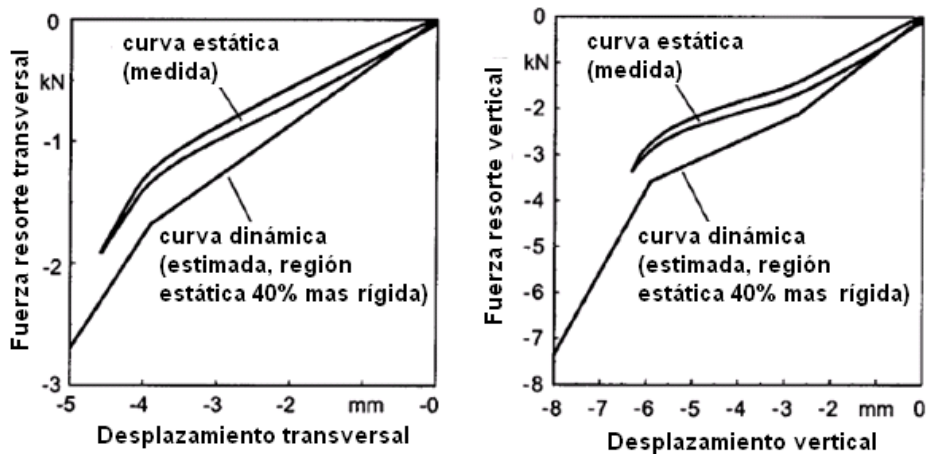
Tabla A-3: Ubicación de los cuatro amortiguadores de la cabina (respecto al centro del eje trasero [m] [2]).

Adelante	1,194	$\pm 0,33$	0,212
Atrás	-0,194	$\pm 0,456$	0,212

Coeficiente de amortiguación vertical: $1,6 \times 10^3$ Ns/m

Coeficiente de amortiguación longitudinal y transversal: $2,5 \times 10^3$ Ns/m

Figura A-2: Líneas características para determinación de fuerza de elasticidad de los resortes de la cabina [2]



- **Parámetros del asiento y el conductor.**

Masa del asiento:

7 kg

Masa del conductor:

81 kg (23 sobre el suelo de la cabina
58 como masa para el marco)

Elasticidad del resorte del asiento:

5.250 Nm (zona más lineal)

Coefficiente amortiguación del asiento:	600 Ns/m
Recorrido de amortiguación del asiento:	±0,05 m
Rigidez del tope del asiento:	23.000 N/m
Elasticidad del acolchonado del asiento:	10 ⁵ Nm (unidireccional solo en región de presión)
Coefficiente amortiguación del asiento:	1.500 Ns/m
Coefficiente amortiguación entre los pies del operario y suelo del tractor:	200 Ns/m

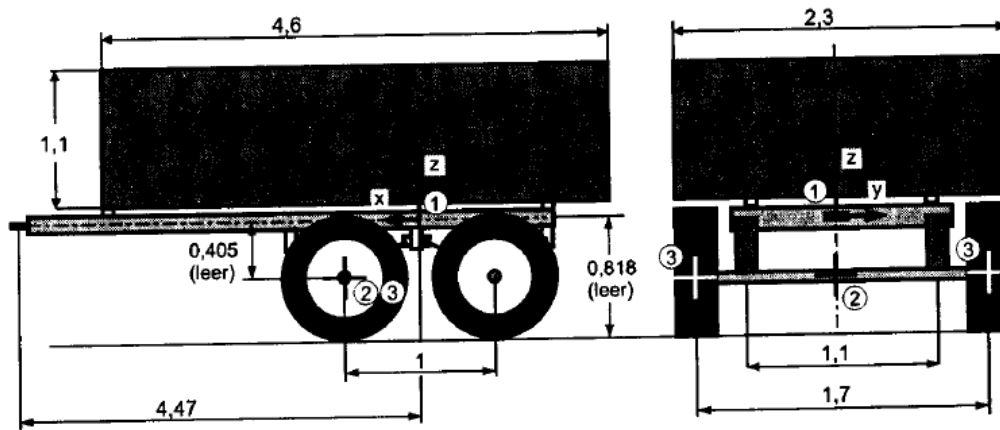
- **Parámetros del remolque tipo tándem [2].**

Peso vacío:	25,8 kN
Peso total permitido	78,48 kN
Distancia entre ejes:	1,0 m
Trocha:	1,75 m
Coefficiente elasticidad de suspensión tipo hojas:	1,43x10 ⁶ N/m
Coefficiente amortiguación de suspensión tipo hojas:	1,0x10 ⁵ Ns/m
Llantas:	13.0/75-165L
Presión de llantas:	4 bar
Radio de la llanta:	0,435 m
Coefficiente de resistencia al rodamiento:	0,0185 [2]

Tabla A-4: Masas, inercias, posiciones de centros de gravedad de los componentes del remolque. Los momentos de inercia se refieren al respectivo centro de gravedad. La ubicación del centro de gravedad se da para cada sistema de referencia del respectivo cuerpo [2].

Cuerpo	Masa [kg]	Momentos de inercia [kg m ²]			Ubicación centro de gravedad		
		xx	yy	Zz	x [m]	z [m]	Ref-Sys
Marco y carrocería	1.570	700	3250	3750	1,03	0,18	1
Ejes trasero/delantero	330	95	2	95	-	-	2
Ruedas	100	13	16	13	-	-	3
Carga	11.080	5.000	19.500	24.400	0,66	0,5	1

Figura A-3: esquema con la geometría del remolque tipo tándem la ubicación de los sistemas de coordenadas de cada cuerpos de la tabla 6 se señalan con un círculo [2]



Bibliografía

- [1] BIPPUS, Ludwig. Simulation von Traktor-Anhänger Gespannen (Simulación del acoplado Tractor y Remolque). Studienarbeit, Universität Stuttgart. 2010
- [2] BÖHLER, Heinz. Traktormodell zur Simulation der dynamischen Belastungen bei Transportfahrten . Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor Ingenieurs. Fortschritt-Berichte VDI, Serie 14, Nr. 104. Editorial VDI. 2001
- [3] BÖTTINGER, Stefan.: Landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen. Notas de clase en: Vorlesungsskript Ackerschlepper, Lehrgebiet Landmaschinen an der Universität Stuttgart, 2006.
- [4] CROLLA, D.A., HORTON D.N.L. Y STAYNER, R.M.: Effect of tyre modelling on tractor ride vibration predictions. Disponible en: Journal of Agricultural Engineering Research 47. 1990. H.1, P. 55-57.
- [5] DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT. DFG. Fundación alemana de investigación. Proyecto: Untersuchungen der Ackerschlepperfahrdynamik bei höheren Geschwindigkeiten und Kurvenfahrt anhand eines MKS-Modells. En línea Consultado el 2 agosto 2012. Disponible en:
<http://gepris.dfg.de/gepris/OCTOPUS/?jsessionid=33A5FEC952FB83A0B74429FEBD89094?module=gepris&task=showDetail&context=projekt&id=5438986&selectedSubTab=1>.

- [6] FERHADBEGOVIĆ, B. Entwicklung und Applikation eines instationären Reifenmodells zur Fahrdynamiksimulation von Ackerschleppern, Dissertation Universität Stuttgart. 2008.

- [7] GARCÍA J. y BAYO E. Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems: The Real-Time challenge. Springer-Verlag, New-York. 1994.

- [8] HAACK, M.: Über die Vorderachsfederung luftbereifter Ackerschlepper mit ungefederter Hinterachse. Disponible en: Landtechnische Forschung 4. 1954. H.1, S.9-11

- [9] HEIM, Dominik. Erstellung des Mehrkörpersimulationsmodells eines Starrdeichselanhängers zur Untersuchung unterschiedlicher Lenkkonzepte. Studienarbeit. Stuttgart. Universität Stuttgart. 2011.

- [10] HERTRAMPF, Benjamin. Erweiterung und Einsatz eines Mehrkörpersimulationsmodells eines Ackerschleppers in Fahrdynamikuntersuchungen unter Verwendung des Hohenheimer Reifenmodells. Studienarbeit. Stutgart. Universität Stuttgart. 2010.

- [11] KAPLICK, C. Verifikation und Bewertung fahrdynamischer Traktorsimulationsmodelle. Dissertation Technische Universität Berlin 1995; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 73, Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

- [12] KOLATOR, B., BIAŁOBRZEWSKIB, I. A simulation model of 2WD tractor performance. Disponible en: Computers and Electronics in Agriculture. 2011. Volume 76, Issue 2, p. 231-239.

- [13] KUMAR, R., PANDEY, K.P. A program in Visual Basic for predicting haulage and field performance of 2WD tractors. Disponible en: Computers and Electronics in Agriculture, Volume 67. 2009. 18–26

- [14] KUTZBACH, Heinz Dieter. Agrartechnik, Grundlagen, Ackerschlepper, Fördertechnik. Lehrbuch. Stuttgart. Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik 440. Grundlagen der Agrartechnik. 2009. P 149, 212.
- [15] KÜMMEL, J. Modellierung einer Bremse und eines Hydraulikkreislaufes für eine aktive Vorderachsfederung zur Implementierung in ein Mehrkörpersimulationsmodell eines Ackerschleppers. Studienarbeit Universität Stuttgart. 2006.
- [16] LILJEDAHL, J.B., BARGER, E.L., CARLETON, W.M. Tractor and their power units. 2da. Edición. 1963. Editorial John Wiley New York. p 273-279
- [17] LINES J.A. Ride vibration of agricultural tractors: transfer functions between the ground and the tractor body. Disponible en: Journal of Agricultural Engineering Research 37. 1987. H.2, P. 81-91.
- [18] LINES J.A. Y MURPHY, K. The stiffness of agricultural tractor tyres. Disponible en: Journal of Terramechanics 28. 1991. H.1, P. 49-64.
- [19] LINES J.A. Y MURPHY, K. The radial damping of agricultural tractor tyres. Disponible en: Journal of Terramechanics 28. 1991. H.2/3, P. 229-241.
- [20] LINES J.A. Y N.A. Young: A machine for measuring the suspension characteristics of agricultural tyres. Disponible en: Journal of Terramechanics 26. 1989. H. 3-4, P.201-210
- [21] MATHWORKS. Matlab 7.8.0 (R2009a). SimMechanics, Simulink. Ayuda del producto.
- [22] MATHWORKS. Simulink, Simulation and Model-Based Design. En línea 14 agosto 2012. 10:06 Disponible en:
<http://www.mathworks.com/products/simulink/index.html>

- [23] MICHELIN, Cuidados y Economía. En línea 6 de agosto 2012. Disponible en: <http://www.michelin.com.co/transportes-profesionales/todo-sobre-otr/mas-info/Llanta-radial-11-ventajas-que-marcan-la-diferencia.html>.
- [24] OWZAR, A. Ein Beitrag zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von ungefederten, luftbereiften Fahrzeugen. Dissertation Technische Universität Berlin; Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Nr.2. 1974.
- [25] PACEJKA, H.B.: Tyre and Vehicle Dynamics. 2da Edición. Rotterdam. Butterworth-Heinemann Oxford, 2002.
- [26] PENG, C., COWELL P.A., CHISHOLM T.S. Y LINES, J.A. Lateral tyre dynamic characteristics. Disponible en: Journal of Terramechanics 31. 1994. H.6, P. 395-414.
- [27] PICKEL, P. Simulation fahrdynamischer Eigenschaften von Traktoren. Dissertation Technische Universität Berlin 1993; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 65, Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
- [28] SAHAY, C.S., TEWARI, V.K. Computer Simulation of Tractor Single-point Drawbar Performance. Disponible en: Biosystems Engineering Volumen 88 (4). 2004, p. 419–428
- [29] SAHU R.K., RAHEMAN, H. A decision support system on matching and field performance prediction of tractor-implement system. Disponible en: Computers and electronics in agriculture, Volumen 60. 2008, p. 76–86.

- [30] SHARON, I. Untersuchungen über die Schwingungseigenschaften groß-volumiger Niederdruckreifen. Dissertation Technische Universität Berlin 1975; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 24, Düsseldorf: VDI-Verlag 1975.
- [31] SCHROGL, H.: Dynamische Eigenschaften von Ackerschlepper Triebadreifen bei höheren Rollgeschwindigkeiten. Dissertation, Universität Hohenheim 1989, Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG, Nr. 159.
- [32] STAYNER, R.M., COLLINS T.S. UND LINES, J.A. Tractor ride vibration simulation as an aid to design. Disponible en: Journal of Agricultural Engineering Research 29. 1984. H. 4, P. 345-355.
- [33] UNIVERSITÄT HOHENHEIM, Hoheheimer Reifenmodell, En línea 29 agosto 2012 disponible en: <https://reifenmodell.uni-hohenheim.de/modell>.
- [34] WEIGELT, H. Schwingungseigenschaften vorderachsgefederter landwirtschaftlicher Traktoren. Dissertation zur Verleihung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur. Technischen Universität Berlin, Institut für Maschinenkonstruktion, Bereich Landtechnik und Baumaschinen. 1987.
- [35] WENGERT, Ingmar. Aufbau eines Mehrkörpersystems des Fendts 936 zur Fahrdynamikanalyse. Diplomarbeit. Stuttgart. Universität Stuttgart. 2010.