

DISEÑO DE LA SUSPENSIÓN DE UN FUMIGADOR AUTOPROPULSADO Y SIMULACIÓN DE SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO EN EL TERRENO

Andrés Anca, Alberto Cardona, Norberto Nigro

Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería
CONICET - Universidad Nacional del Litoral
Güemes 3450, 3000, Santa Fe, ARGENTINA

y

Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional
Lavaise 610, 3000 Santa Fe, ARGENTINA

e-mail: acardona@intec.unl.edu.ar

ABSTRACT

We present the design of the suspension and steering mechanisms of a self-propelled sprayer. The aim is to obtain a design that diminishes the undesired movements of the boom in order to improve the spraying procedure. The behavior of the vehicle is evaluated by computational simulation. The dynamic analysis is carried out using the finite element code MECANO for non-linear mechanical analysis. In the present work, we show the responses of the vehicle to different maneuvers and typical soil profiles.

RESUMEN

Se realiza el diseño de la suspensión y mecanismo de dirección de un vehículo fumigador autopropulsado. La meta es obtener un diseño que minimice los movimientos indeseados del botalón, en pos de mejorar la calidad de aplicación de los productos químicos. El comportamiento del vehículo es evaluado por simulación. El análisis dinámico se realiza usando el modulo no lineal de análisis de mecanismos MECANO del programa de elementos finitos SAMCEF. En el presente trabajo se muestran respuestas del vehículo frente a distintas maniobras y condiciones de terrenos típicos.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de productos químicos en agricultura se efectúa habitualmente en forma líquida por medio de una fumigadora. Los botalones pueden ser de hasta 36 metros de largo para cubrir mayores áreas en menor tiempo. Los químicos son aplicados a través de picos montados sobre el botalón. La velocidad de aplicación varía entre 3.5 a 18 km/h. Debido al rolido del botalón varía la distancia entre los picos y el terreno. Los movimientos indeseados del botalón, producidos por irregularidades del terreno, crean zonas con dosis insuficientes y otras con sobredosis de producto. Una superposición interrumpida de los conos de spray tiene lugar a lo largo del botalón. Los movimientos horizontales del botalón causan velocidades desiguales de los picos respecto al suelo, de manera que la dosis varía en la dirección del movimiento de la fumigadora. Habitualmente, para obtener la respuesta deseada del tratamiento químico aplicado, se aplica un exceso de producto para asegurar una cantidad suficiente sobre cada zona. Por razones ambientales y económicas se requiere usar menos químicos, los cuales deben

ser mejor distribuidos para mantener efectividad. Esto requiere botalones más estables. Un mejoramiento experimental de la estabilidad del botalón implica costo y tiempo en prototipos y sistemas de medición. El método de elementos finitos es una alternativa moderna para el diseño estructural y puede ser usada para diseñar y modelar el comportamiento dinámico de la fumigadora autopropulsada.

El diseño original preveía suspensión independiente en las cuatro ruedas. Por motivos económicos y comerciales, se cambió el proyecto original por uno de un eje rígido en el tren trasero y suspensión independiente en el tren delantero.

En esta opción, por medio un diferencial estándar se transmite el movimiento hacia ambas ruedas traseras. Un reductor de engranajes, diseñado especialmente, es utilizado con el objeto de trasladar el movimiento desde el eje elevado a ambas ruedas traseras.

Objetivos

- Diseñar la suspensión del tipo independiente en el tren delantero y trasero.
- Diseñar una alternativa de suspensión trasera de eje rígido, que permita utilizar mecanismos de transmisión estándares.
- Diseñar los elementos de la dirección.
- Simular el comportamiento del vehículo utilizando técnicas numéricas, con el fin de evaluar los diseños propuestos y poder ajustar sus parámetros para optimizar la calidad de fumigación.

DISEÑO

Datos básicos de modelo de eje rígido

Los siguientes son las principales características dimensionales del vehículo: el despeje desde el suelo es de 1300 mm, el recorrido de la suspensión es de 300 mm en extensión y 300 mm en compresión. En el tren delantero se dispuso una trocha de 2718 mm y un rodado 12.4 R 36. En trasero la trocha es de 2640 mm y el rodado 14.9 R 46. La distancia entre ambos ejes es de 3600 mm y la altura del centro de gravedad respecto al suelo, con tanque lleno, es de 1600 mm. Dicho tanque tiene una capacidad de 3100 litros.

La velocidad de trabajo del vehículo se fijó en 15 km/h, mientras que para circular en ruta se establece una velocidad máxima de 50 km/h.

El radio de giro mínimo que se requiere en un viraje es de 8 m y para una maniobra en ruta se adopta un valor de 30 m.

Se considera un terreno de trabajo que pueda presentar una pendiente lateral de 10 grados y coeficientes de rozamiento en un rango de 0.4 a 0.6 en terreno, en tanto que en ruta se adoptó de 0.9.

Definición de los requerimientos

Los siguientes son los requerimientos que debe cumplir la fumigadora en su conjunto.

- *Condición de derrape en curva antes que vuelco.*
- *Minimizar el giro sobre el plano horizontal (guiñada) del vehículo.* Es de relevante importancia que el vehículo presente un giro mínimo en el plano horizontal, ya que un pequeño giro de la fumigadora representa un gran desplazamiento de la punta del botalón, lo que produce una mala distribución del producto sobre el terreno.
- *Minimizar la diferencia de altura del chasis con carga y sin carga.* Durante la operación normal de la fumigadora el volumen del tanque de productos va disminuyendo. Esta

variación de peso no debe producir un cambio apreciable en la altura del botalón de fumigación respecto al suelo, ya que se vería afectada la calidad de la aplicación.

A continuación se citan los requerimientos a cumplir por el mecanismo de suspensión independiente

- *Mínimo de variaciones de trocha.* El cambio de trocha tiene lugar durante el movimiento en una suspensión independiente. Éste trae como consecuencias slip, fuerzas laterales, aumento de la resistencia a la rodadura y deteriora la estabilidad direccional del vehículo. (Pág. 134 [3]). Por estos motivos se requiere que la variación sea mínima.
- *Mínimo de variación de comba.* La variación de comba con el movimiento de la suspensión reduce el agarre del neumático exterior en una curva, debido a variaciones en la fuerza lateral. (Pág. 160 [3]), (Pág. 217 [2])

Geometría de la suspensión del tren delantero

Para una suspensión independiente, la disposición de las barras controla el movimiento de la rueda relativo al cuerpo del vehículo, en una única trayectoria. La masa posee 6 grados de libertad. Los brazos de la suspensión deben restringir 5 de ellos para obtener una única trayectoria. Si utilizamos barras simples, las que soportan fuerzas de tracción y compresión solamente, se necesitan 5 de ellas. Se descarta una suspensión tipo MacPherson por cuanto se considera perjudicial el esfuerzo de flexión que se introduciría sobre la unión deslizante y se considera poco propicio el trabajo de esta unión en ambiente polvoriento.

El problema tridimensional es reducido a dos problemas bidimensionales. Se habla entonces de la geometría de vista frontal y lateral.

Centros instantáneos: La posición de los centros instantáneos en cada plano define las características de la suspensión. El centro instantáneo frontal caracteriza el de cambio de trocha y el cambio de comba. De la altura de este sobre el nivel del suelo, se deduce la altura del Centro de Rolido, cuya posición interviene en el rolido, afectando la transferencia de peso de las ruedas internas a las externas durante un viraje. El centro instantáneo lateral, controla las características anti-dive, o sea la cantidad de carga que es transmitida al resorte delantero y con esto la magnitud del balanceo (pitch) del vehículo. Además, determina la variación de la distancia entre ejes. El largo de los brazos se especifica sobre la vista frontal. Se determina la longitud de los brazos superiores, y en función de la curva de comba deseada, la longitud del inferior. En este caso, los brazos superiores se disponen más cortos que los inferiores, resultando la forma de la curva de variación de comba cóncava hacia comba negativa; cuanto más corto los brazos superiores mas se incrementa la curvatura.

Si unimos ambos centros instantáneos obtenemos el eje instantáneo. Alrededor de este eje gira instantáneamente la masa respecto al cuerpo del vehículo. Para las barras superiores e inferiores quedan definidos dos planos, los que se interceptan en el eje instantáneo.

Pasos para definir la geometría deseada. Se definen las coordenadas de los extremos exteriores de las barras, en función del espacio disponible y las características direccionales: ángulo de perno, excentricidad al punto de contacto (scrub) y longitud de la punta de eje (spindle length). Se especifica el largo de los brazos en la vista frontal. Se adoptan los ángulos que formaran los brazos con el chasis. Con la trocha, la altura del centro de rolido y el roll/camber deseado queda determinado el centro instantáneo frontal. El centro instantáneo lateral queda establecido con el porcentaje de anti-dive deseado. Con estos datos, se obtienen los puntos de anclaje de las barras en el chasis por consideraciones geométricas.

Geometría tren trasero.

Tren trasero con eje rígido y mecanismo de bielas

Para evitar el movimiento vertical del botalón a medida que se descarga el tanque de productos no se coloca ningún tipo de vínculo elástico entre el eje y el chasis, al cual está fijo el botalón.

Esta configuración trae como consecuencia un mal comportamiento a la guiñada o giro. Esto se logra mejorar introduciendo un mecanismo de bielas (figura 2 (b)). El centro instantáneo de rotación se ubica al nivel del suelo. Estas bielas permiten el movimiento relativo, en un plano transversal al vehículo, entre el eje rígido y el chasis. Esta vinculación disminuye el ángulo de giro sobre el plano horizontal cuando el vehículo sobrepasa una loma con las ruedas de un solo lado (ver fig. 6).

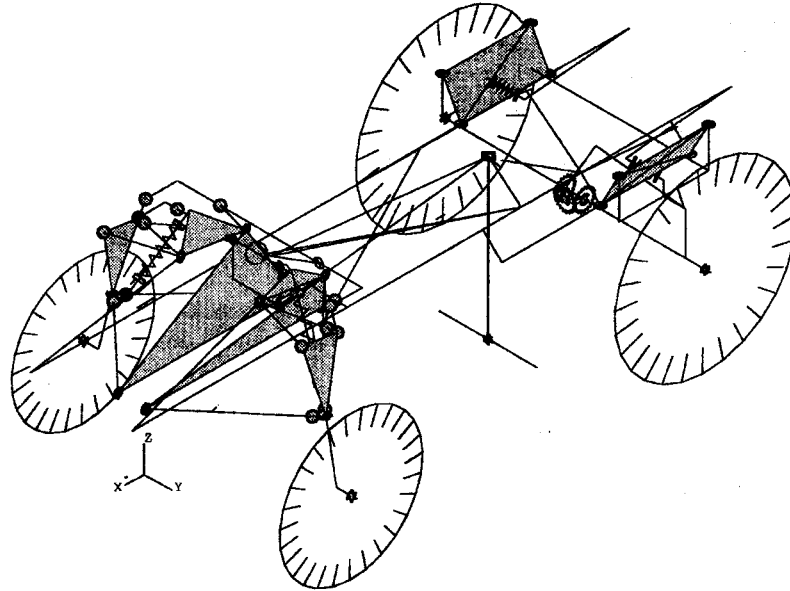
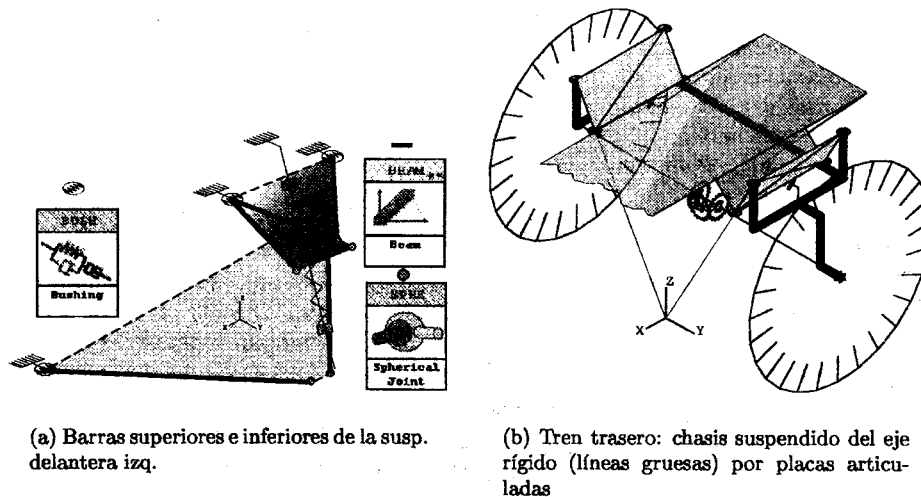


Figura 1: Modelo



(a) Barras superiores e inferiores de la susp. delantera izq.

(b) Tren trasero: chasis suspendido del eje rígido (líneas gruesas) por placas articuladas

Figura 2: Detalle de la Suspensión

Mecanismo de Dirección

En la concepción de la dirección se tuvieron en cuenta las posibles interferencias con otros elementos de la suspensión y el espacio disponible para los dispositivos de accionamiento. De esta forma se colocó el brazo de dirección por encima del eje y hacia atrás como se recomienda en la literatura (Pág. 626 [1]), para tener un comportamiento estable.

Para poder utilizar más de una alternativa de accionamiento de la dirección, se propone un mecanismo (fig. 3) que sea utilizable tanto para accionarlo por medio de un cilindro hidráulico, como por un brazo Pitman y caja de dirección. Además se debe cumplir con la geometría Ackerman para evitar deslizamiento lateral. Otro punto importante a tener en cuenta es la variación del ángulo de giro de las ruedas con el movimiento vertical de la suspensión (variación de convergencia). No es aconsejable que supere la décima de grado. Esto se ajusta variando la posición del extremo interno del brazo de dirección, hasta lograr el cambio de convergencia deseado.

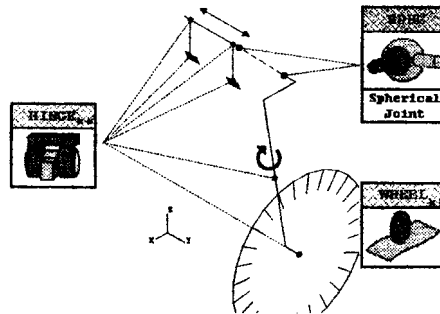


Figura 3: Mecanismo de Dirección

Resorte

Rigidez del resorte: La frecuencia natural de oscilación del vehículo recomendada está en el orden de 1 a 1.5 Hz; conociendo la masa suspendida y la rigidez del neumático, podemos obtener la rigidez del resorte.

Dimensiones: La determinación de las dimensiones de los resortes se realizó mediante un algoritmo de optimización con restricciones. El mismo tiene como incógnitas el diámetro de las espiras y el diámetro del resorte, ambos acotados. Este programa arroja las dimensiones de un resorte de rigidez y recorrido determinados, cumpliendo con las condiciones de resistencia y pandeo.

Amortiguador

Medidas sobre vehículos han mostrado que la velocidad de la rueda en dirección ascendente es generalmente más alta que en dirección descendente, en un factor de dos a tres. Los amortiguadores son fabricados con esta asimetría para mantener las fuerzas simétricas en el vehículo. Para limitar altas fuerzas a altas velocidades se colocan válvulas adicionales en los amortiguadores. En este caso el amortiguador es simulado en el modelo mediante un elemento que admite introducir la curva Fuerza vs. Velocidad deseada. Los valores de amortiguamiento deseados fueron ajustados a partir de la simulación.

SIMULACIÓN DE LA FUMIGADORA

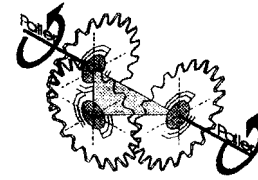
Se construyó un modelo de elementos finitos de la fumigadora autopropulsada con tracción trasera, usando el módulo MECANO del programa SAMCEF (Fig. 1). El chasis es considerado un cuerpo rígido. El perfil del suelo bajo las ruedas es dado como la altura del suelo en función de la distancia recorrida, habiéndose ensayado el comportamiento del vehículo frente a una variedad de situaciones.

Modelo Rueda Flexible: Se usó un elemento de rueda flexible para modelar el fenómeno de fricción por contacto entre la rueda con flexibilidad radial y el suelo. Este modelo, simplificado, ignora el acople entre las deformaciones lateral y torsional de la rueda. Esta simplificación es razonable para la aplicación aquí considerada.

Se asume contacto puntual. Se introdujo en este elemento la rigidez radial del neumático, provista por el fabricante, en función de la presión de inflado.

Bujes de goma(bushings): estos elementos permiten introducir fuerzas elásticas y de amortiguamiento entre 2 nodos. Hay 3 fuerzas de traslación y 3 momentos. Se asume un comportamiento lineal. Se utilizan las constantes de rigidez obtenidas por ensayos. Los bujes de goma se colocaron en las articulaciones que vinculan las parrillas de suspensión al chasis y en las uniones de las bielas traseras.

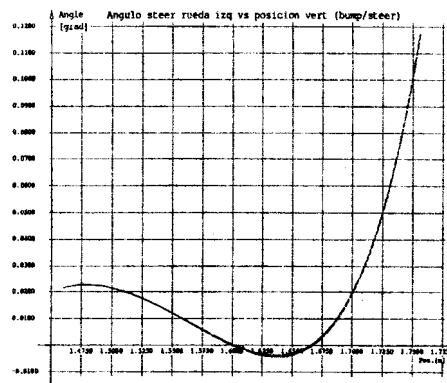
Diferencial: El movimiento de traslación del vehículo es impuesto a través de un modelo de diferencial. El mismo fue construido con 3 engranajes cónicos. Al cuerpo rígido que simula la carcasa, se le asigna a una función, que describe el ángulo de giro en función del tiempo.



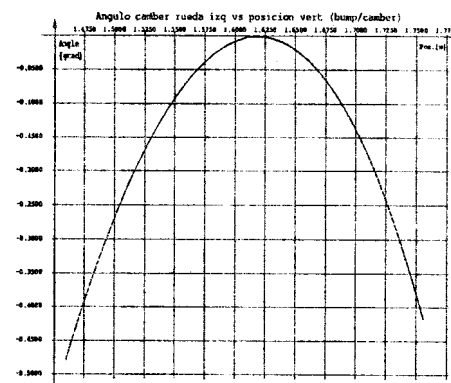
Análisis Estático:

En este análisis no se tienen en cuenta las fuerzas de inercias ni las fuerzas de amortiguamiento. Al vehículo con velocidad de traslación nula, se le aplica un desplazamiento vertical sobre su centro de gravedad, con una magnitud igual al recorrido de la suspensión. Luego se lo suelta para dejarlo vibrar libremente bajo la acción de la fuerza gravitatoria. Mediante este estudio del vehículo se realiza la calibración de las rigideces de los resortes. También se verifica la horizontalidad del mismo. Otro estudio estático realizado para caracterizar el comportamiento en curvas, es realizar un movimiento giratorio del chasis alrededor del eje de rolido. Así se obtiene la curva del torque aplicado versus ángulo de rolido.

Se calibran además los parámetros geométricos de la suspensión para cumplir con los requerimientos impuestos. Se obtienen las gráficas que describen las variaciones de trocha, comba, convergencia y distancia entre ejes al mover la suspensión su recorrido máximo en extensión y compresión (ver figura 4).



(a) Ángulo giro rueda izq vs posición vertical



(b) Ángulo comba rueda izq vs posición vertical

Figura 4: Resultados del análisis estático

Análisis Dinámico:

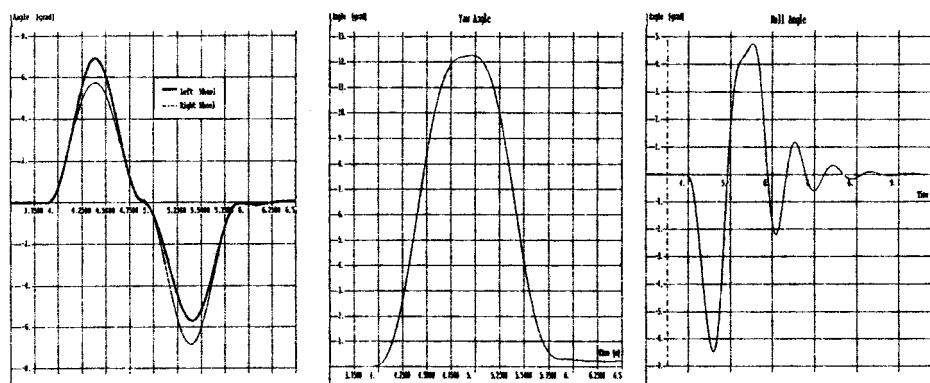
En el análisis dinámico se tienen en cuenta las fuerzas elásticas, de inercia y de amortiguamiento. En esta sección se presentan algunos de los resultados del comportamiento dinámico del vehículo. Se realizaron distintos tipos de maniobras:

- Circulación sobre una loma y sobre un pozo con las ruedas del lado izquierdo y con las cuatro ruedas, tanto en forma perpendicular a la dirección del movimiento, como en un

ángulo de 45 grados.

- Circulación de forma colineal sobre huella de cosechadora; Cambio de carril
- Tránsito en curva. Velocidades límites de derrape y vuelco: en función de los radios mínimos de giro, la altura del centro de gravedad, la trocha, la masa del vehículo y el coeficiente de rozamiento entre la rueda y el suelo, se determina la velocidad límite para que se produzca derrape y la velocidad límite para que comience a volcar la fumigadora. En condiciones de operación a campo se satisface la condición de derrape antes que vuelco, no ocurre lo mismo transitando en ruta, donde la velocidad límite de vuelco es inferior a la velocidad límite de derrape.
- Frenado. Las normas de circulación establecen una desaceleración de $4,5 \text{ m/s}^2$. Se calculan los momentos de frenado a aplicar a cada rueda delantera y trasera para lograr un frenado equilibrado. Esto es simulado para verificar los resultados y evaluar el comportamiento a frenado tanto con carga máxima como vacío. Del estudio dinámico se obtuvieron los valores de fuerza máximos desarrollados en los componentes. Fuerzas en las barras de suspensión y dirección y fuerzas en el mecanismo de bielas trasero. Estos datos son luego utilizados para el dimensionado de la fumigadora.

En lo que sigue se resumen dos maniobras que caracterizan el comportamiento de la fumigadora. Maniobra de cambio de carril. La experiencia muestra que maniobras del tipo cambio de carril, ejecutadas sobre dos segundos, son capaces de excitar la frecuencia natural de rolido, para luego precipitarse el vuelco. El vehículo se mueve en la dirección del eje global x , con una velocidad de 50 km/h. Una velocidad angular constante es aplicada en el diferencial. Se impone una función tipo escalón sobre la barra de mando de la dirección que se traduce en ángulo de giro de las ruedas en función del tiempo, como muestra la figura 5. Este movimiento de las ruedas produce un giro a la izquierda, y luego a la derecha de la fumigadora. El vehículo logra sobrepasar la maniobra sin tumbar, pero con despeje de ambas ruedas delanteras. El desplazamiento lateral total del centro de gravedad es de 3.4 m. Se produce una aceleración lateral del orden de los 7 m/s^2 .



(a) Giro en las ruedas delanteras

(b) Ángulo de giro de la fumigadora en el plano horizontal

(c) Ángulo de rolido

Figura 5: Maniobra de cambio de carril

Circulación de sobre una loma con el lado izquierdo. Esta maniobra es la que caracteriza el movimiento del vehículo sobre el plano horizontal. La loma tiene 0.25 m de alto por 1.5 m de longitud, y la fumigadora la toma en forma perpendicular a la dirección del movimiento. La velocidad de avance es de 15 km/h. En la figura 6 se compara el ángulo de giro en el plano horizontal de un modelo con mecanismo de balancín, con un modelo de eje trasero totalmente rígido.

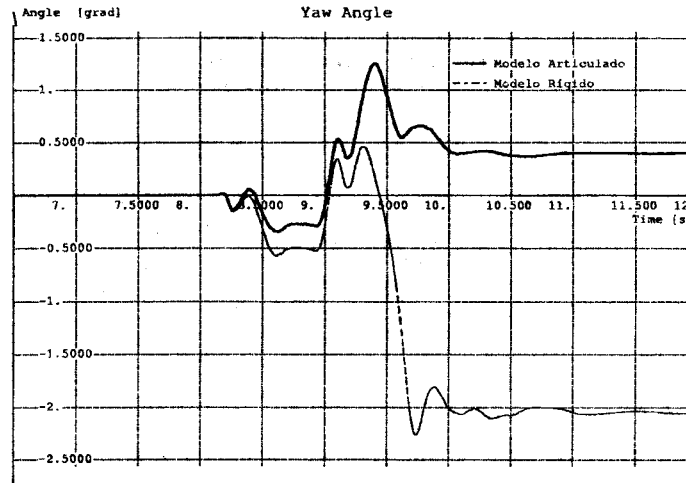


Figura 6: Giro sobre el plano horiz. vs tiempo

CONCLUSIONES

El uso de las técnicas de simulación para el diseño de la suspensión permitió, en corto plazo, "sintonizar" todos sus parámetros para cumplir con los requerimientos impuestos. Por otro lado la simulación dinámica del vehículo flexible, proporcionó las herramientas para anticipar su respuesta en distintas situaciones de marcha. Se evitó la construcción de maquetas y prototipos de ensayos. La posibilidad de introducir los datos en forma paramétrica, y de poder correr programas propios durante la carga de los datos, permite realizar recálculos de manera muy sencilla, e incluso con muy pocos cambios, utilizar el juego de datos en vehículos destinados a otras aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] Milliken, W. F. & Milliken D. L. *Race Car Vehicles Dynamics.*, SAE International, USA, 1995.
- [2] Gillespie T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.
- [3] Reimpell J. & Stoll H. *The Automotive Chassis: Engineering Principles*, Arnold, London, 1996.