

Proyecto de fin de carrera

Modelo Multicuerpo de Automóvil para su Aplicación en Técnicas de Estimación de Estados



Ingeniería Industrial

- Autor:
 - Emilio Sanjurjo Maroño
- Tutores:
 - Daniel Dopico Dopico
 - Roland Pastorino
- Julio, 2011

Índice

- 1.Introducción
- 2.Modelización
- 3.Formulación dinámica
- 4.Fuerzas del modelo
- 5.Validación del modelo
- 6.Software utilizado
- 7.Conclusiones

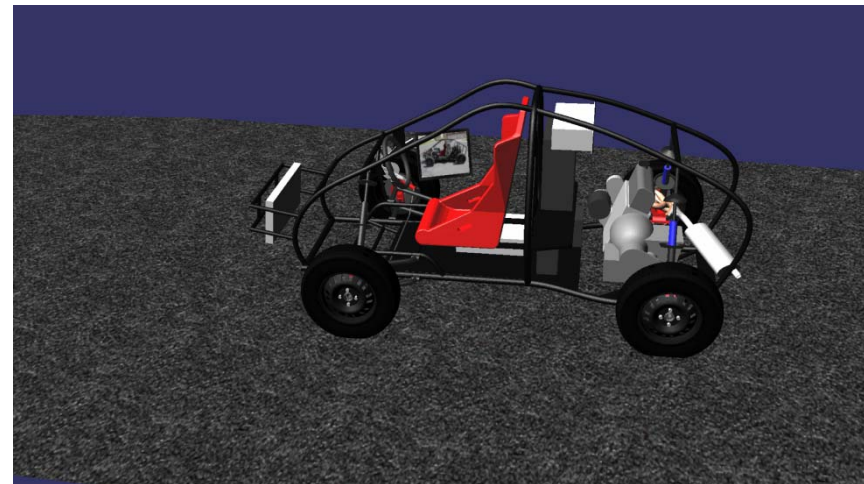


Fig. 1: vista general del simulador

1. Introducción

■ Simulación

- Se realizan modelos: simplificaciones
- Discrepancias entre salidas de la simulación y las del prototipo real

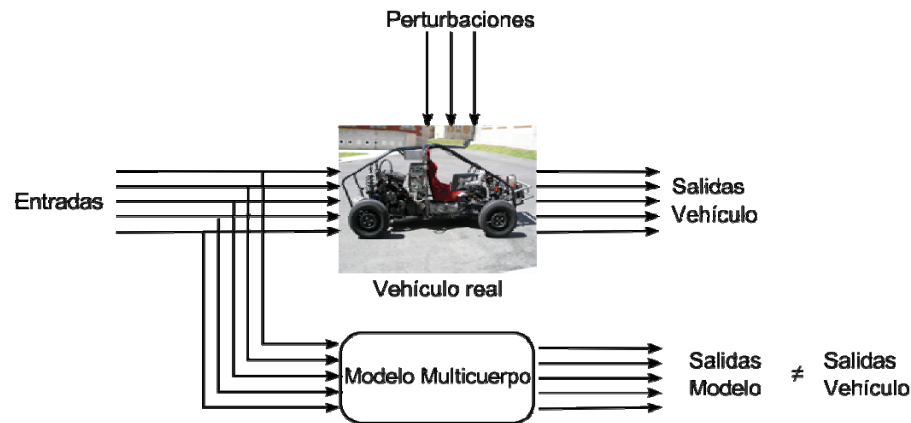


Fig. 2: esquema de una simulación

■ Estimador de estados

- Interacción entre modelo y prototipo de vehículo
- Corrección del estado del modelo
- Sensores virtuales, aplicados al desarrollo de controladores

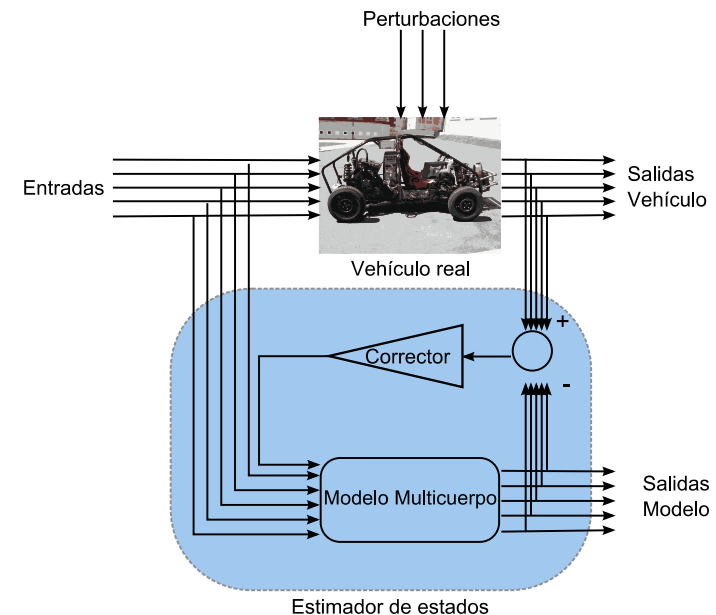


Fig. 3: esquema de un estimador de estados

1. Introducción

▪ Prototipo de vehículo

- Desarrollo propio
- Chasis multitubular de acero
- Motor y caja de cambios de Talbot Hórizon
- Sensores:
 - Ángulos girados por las ruedas
 - Presión de frenos
 - Par transmitido a las ruedas...
- Sistemas by-wire:
 - Acelerador, freno, dirección



Fig. 4: prototipo de vehículo

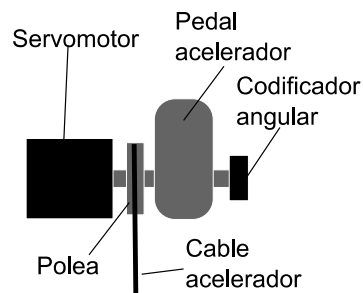


Fig. 5: sistema de acelerador by-wire

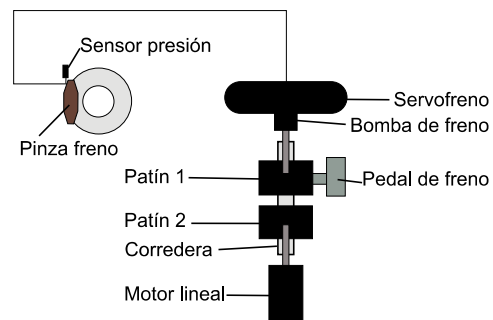


Fig. 6: sistema de freno by-wire

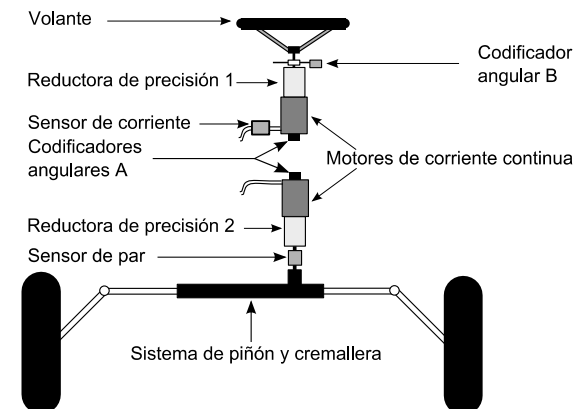


Fig. 7: sistema dirección by-wire

2. Modelización

- Situación en el espacio de los sólidos: sistemas de coordenadas
 - Coordenadas mixtas: coordenadas cartesianas de puntos y vectores, y ángulos y distancias
 - Sólidos modelizados con 4 elementos (puntos y/o vectores), para definir un triedro
 - Puede haber puntos y vectores adicionales
- Definición de pares cinemáticos
 - Se comparten elementos
 - En caso necesario, restricciones adicionales

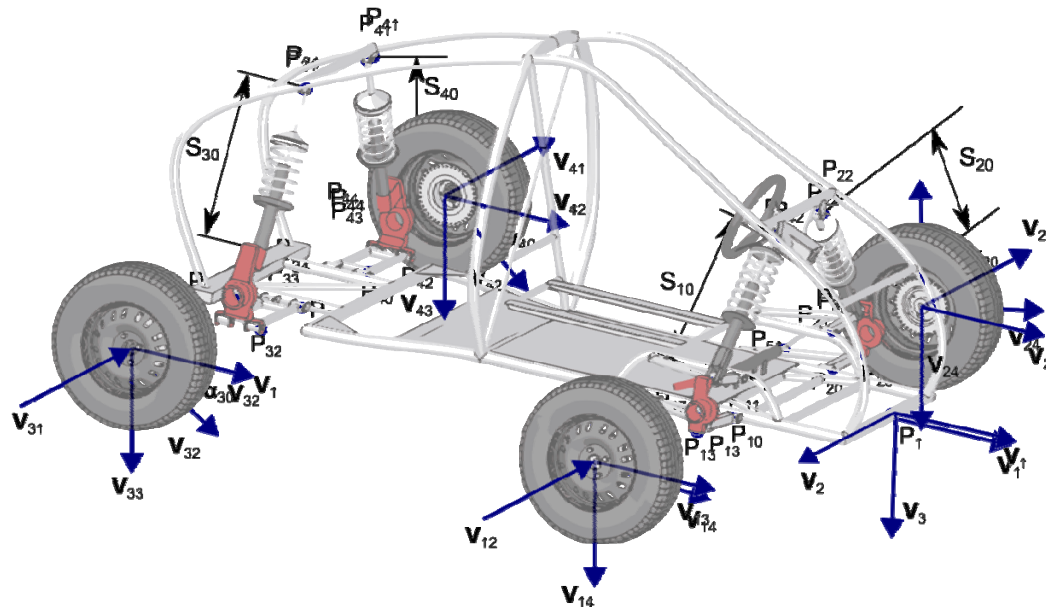


Fig. 8: modelo multicuerpo

Nº variables	168
Nº restricciones efectivas	154
Nº grados de libertad	14

Tab.1: características del modelo

2. Modelización

- Caracterización de las propiedades físicas
 - Masa
 - Posición del centro de masas
 - Tensor de inercia

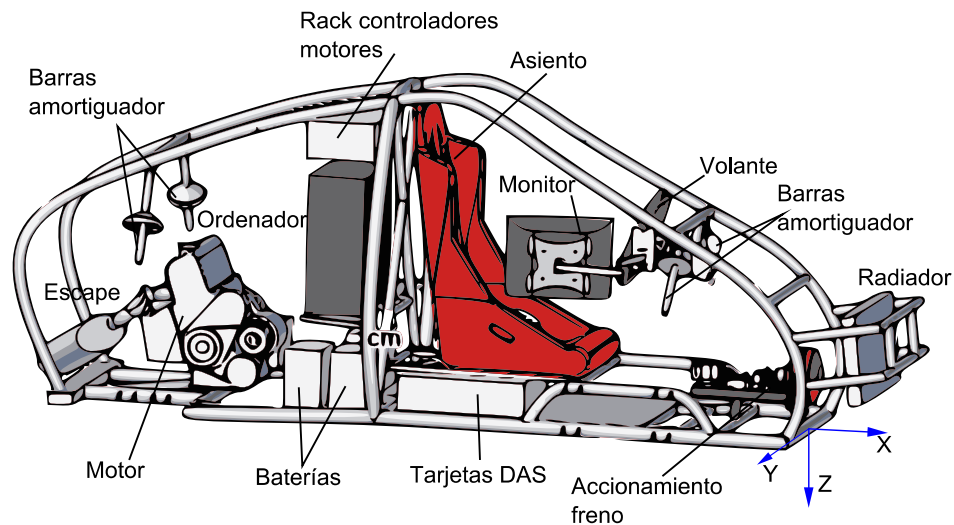


Fig. 9: chasis

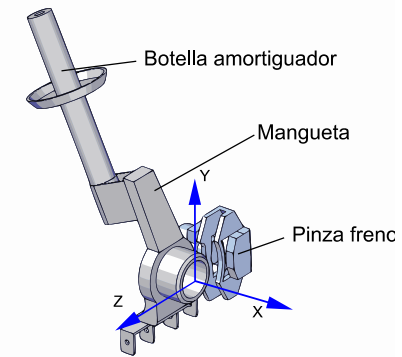


Fig. 10: mangueta trasera derecha

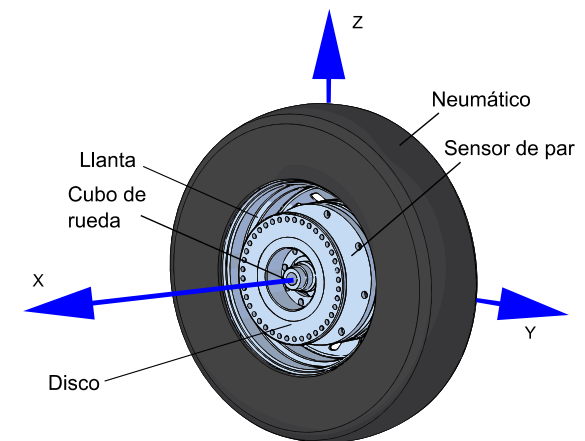


Fig. 11: rueda trasera derecha

3. Formulación dinámica

- Método de Lagrange aumentado con proyecciones ortogonales^[1]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^t \alpha \Phi + \Phi_q^t \lambda = \mathbf{Q}$$

$$\lambda_n^{i+1} = \lambda_n^i + \alpha \Phi_n^{i+1}$$

- Integración con regla trapezoidal implícita de paso simple
- Resolución del sistema por el método de Newton Raphson

$$\left[\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \right]_i \Delta \mathbf{q}_{i+1} = -[\mathbf{f}(\mathbf{q})]_i$$

$$[\mathbf{f}(\mathbf{q})] = \frac{\Delta t^2}{4} (\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^t \alpha \Phi + \Phi_q^t \lambda - \mathbf{Q})$$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \right] = \mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} (\Phi_q^t \alpha \Phi_q + \mathbf{K})$$

en donde $\mathbf{K} = -\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{q}}$, y $\mathbf{C} = -\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \dot{\mathbf{q}}}$

- Proyecciones ortogonales en velocidad y aceleración

$$\left[\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} (\Phi_q^t \alpha \Phi_q + \mathbf{K}) \right] \dot{\mathbf{q}} = \left[\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} \mathbf{K} \right] \dot{\mathbf{q}}^* - \frac{\Delta t^2}{4} \Phi_q^t \alpha \Phi_t$$

$$\left[\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} (\Phi_q^t \alpha \Phi_q + \mathbf{K}) \right] \ddot{\mathbf{q}} = \left[\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} \mathbf{K} \right] \ddot{\mathbf{q}}^* - \frac{\Delta t^2}{4} \Phi_q^t \alpha (\dot{\Phi}_q \dot{\mathbf{q}} + \dot{\Phi}_t)$$

[1] J. Cuadrado, R. Gutiérrez, M. A. Naya, and P. Morer. A comparison in terms of accuracy and efficiency between a MBS dynamic formulation with stress analysis and a non-linear FEA code. *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, 51(9):1033–1052, 2001.

4. Fuerzas del modelo

- Fuerzas gravitatorias
 - Fuerza vertical y hacia abajo, aplicada en el centro de masas de cada sólido
- Par a las ruedas traseras
 - Valor medido por el sensor de par instalado en la rueda del prototipo
- Fuerzas de las suspensiones
 - Fuerza de muelle y amortiguador lineales
 - Constante del muelle determinada experimentalmente
 - Constante del amortiguador estimada a partir de resultados de simulación

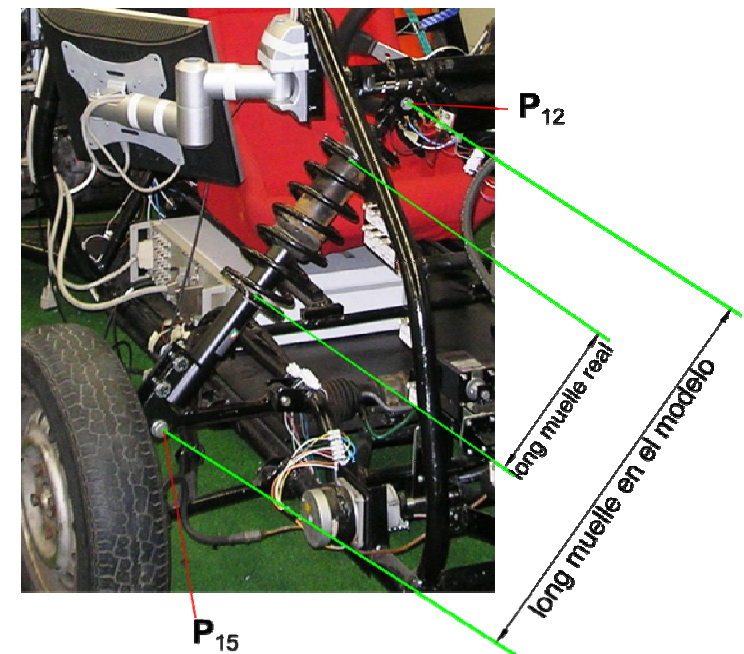


Fig. 12: elemento de suspensión

4. Fuerzas del modelo

- Par de frenado:

- Par de deslizamiento: $T_{\text{deslizamiento}} = 2\mu P \iint \rho dA$

- Par de bloqueo: $T_{\text{bloqueo}} = K_{\text{bloqueo}} (\nu - \nu_0) + C_{\text{bloqueo}} \dot{\nu}$

- Parámetro de bloqueo: $\kappa = e^{-\left(\frac{|\dot{\nu}|}{\dot{\nu}_{\text{crítica}}}\right)^2}$

- Par de frenado: $T_{\text{freno}} = \kappa T_{\text{bloqueo}} + (1 - \kappa) T_{\text{deslizamiento}}$

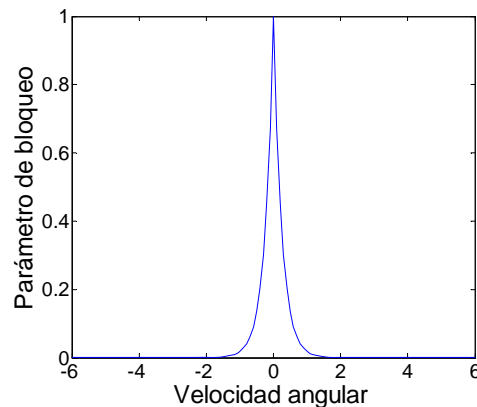


Fig. 13: parámetro de bloqueo frente a la velocidad angular

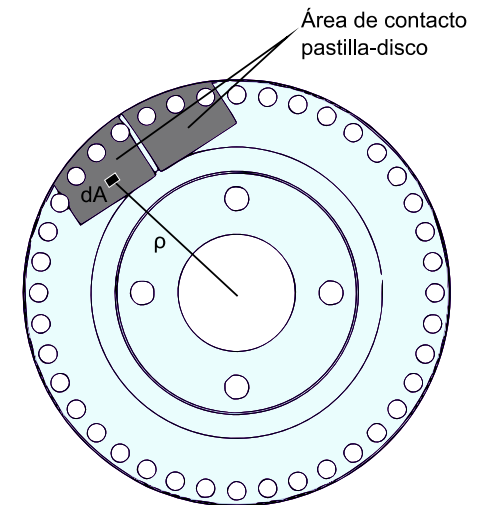


Fig. 14: área de contacto disco-pastilla

4. Fuerzas del modelo

- Fuerza normal de los neumáticos

$$F_n = k(R - d) - \text{amort} \cdot c \cdot \dot{\mathbf{r}}_c \cdot \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}$$

- Cálculo de la distancia del centro de la rueda al plano

$$d = \frac{\mathbf{n}_x x + \mathbf{n}_y y + \mathbf{n}_z z + D}{\sqrt{\mathbf{n}_x^2 + \mathbf{n}_y^2 + \mathbf{n}_z^2}}$$

- Posición del punto de contacto

$$\mathbf{r}_p = \mathbf{r}_0 + \alpha_{01} \mathbf{v}_{01} + \alpha_{02} \mathbf{v}_{02}$$

- Condiciones para que el punto esté dentro del triángulo

$$\alpha_{01} \geq 0$$

$$\alpha_{02} \geq 0$$

$$\alpha_{01} + \alpha_{02} \leq 1$$

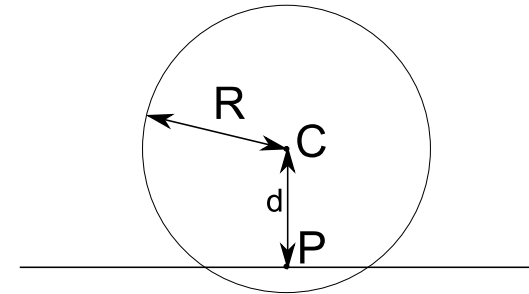


Fig 15: cálculo del punto de contacto

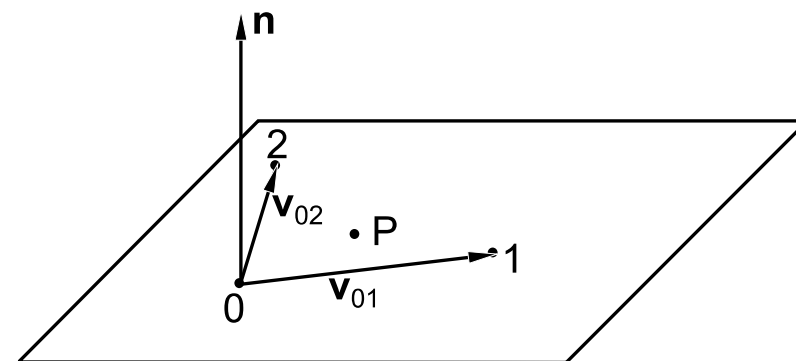


Fig 16: punto de contacto en el plano del suelo

4. Fuerzas del modelo

- Fuerzas tangenciales: Modelo TMeasy^[2] con curvas linealizadas

- Vectores

$$\mathbf{u}_x = \mathbf{u}_{\text{eje}} \times \mathbf{n}; \quad \mathbf{u}_y = \mathbf{n} \times \mathbf{u}_x$$

- Pseudodeslizamientos

$$s_x = \frac{-(v_x - r_D \Omega)}{r_D |\Omega| + v_n}; \quad s_y = \frac{-v_y}{r_D |\Omega| + v_n}$$

- Pseudodeslizamiento generalizado

$$s = \sqrt{\left(\frac{s_x}{\hat{s}_x}\right)^2 + \left(\frac{s_y}{\hat{s}_y}\right)^2} = \sqrt{(s_x^N)^2 + (s_y^N)^2}$$



Fig. 17: deformación del neumático

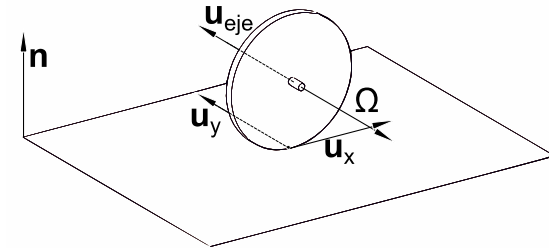


Fig. 18: vectores utilizados para el modelo de neumático

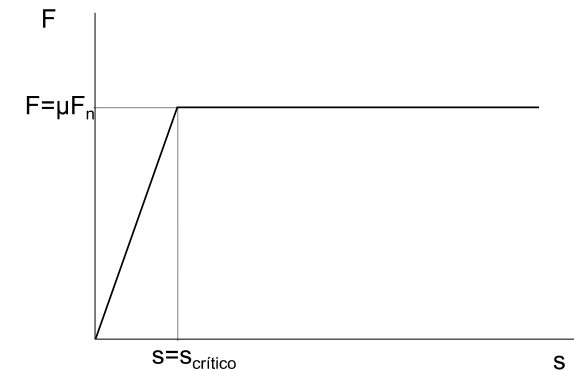


Fig. 19: variación de la fuerza con el pseudodeslizamiento

[2] W. Hirschberg, G. Rill, H. Weinfurter. Tire model TMeasy. *Vehicle System Dynamics*, 45: S1, 101-119, 2007.

4. Fuerzas del modelo

- Fuerzas tangenciales: Modelo TMeasy^[2] con curvas linealizadas
 - Fuerzas dinámicas: fuerza de muelle-amortiguador

$$F_x^D \approx \frac{F}{s} s_x^N + \frac{F}{s} \frac{-1}{r_D |\Omega| \hat{s}_x + v_N} \dot{x}_e = c_x x_e + d_x \dot{x}_e$$

$$F_y^D \approx \frac{F}{s} s_y^N + \frac{F}{s} \frac{-1}{r_D |\Omega| \hat{s}_y + v_N} \dot{y}_e = c_y y_e + d_y \dot{y}_e$$

- Ecuación diferencial del neumático

$$\left(v_{Tx}^* d_x + \frac{F}{s} \right) \dot{x}_e = -\frac{F}{s} (v_x - r_D \Omega) - v_{Tx}^* c_x x_e, \quad \text{donde} \quad v_{Tx}^* = r_D |\Omega| \hat{s}_x + v_N$$

$$\left(v_{Ty}^* d_y + \frac{F}{s} \right) \dot{y}_e = -\frac{F}{s} v_y - v_{Ty}^* c_y y_e, \quad \text{donde} \quad v_{Ty}^* = r_D |\Omega| \hat{s}_y + v_N$$

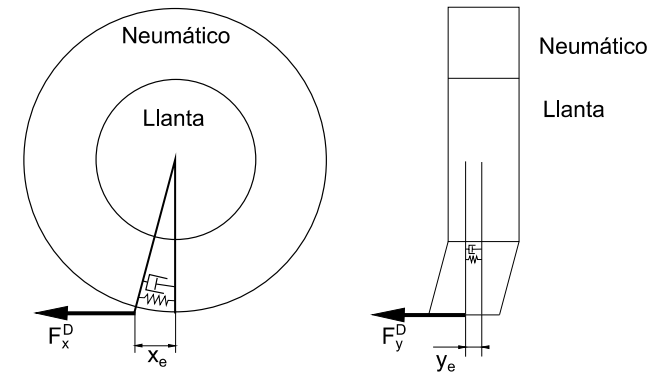


Fig. 20: representación de la deformación del neumático

[2] W. Hirschberg, G. Rill, H. Weinfurter. Tire model TMeasy. *Vehicle System Dynamics*, 45: S1, 101-119, 2007.

5. Validación del modelo

- Condiciones de ensayo
 - Maniobra en línea recta a baja velocidad
 - Velocidad máxima: 23 km/h
 - Distancia recorrida: 63 m
 - Caracterización del suelo

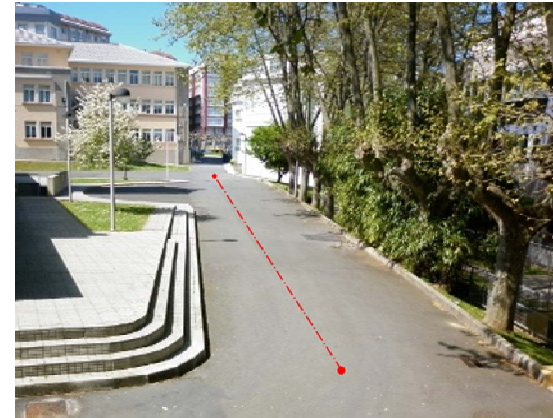


Fig. 21: pista de pruebas

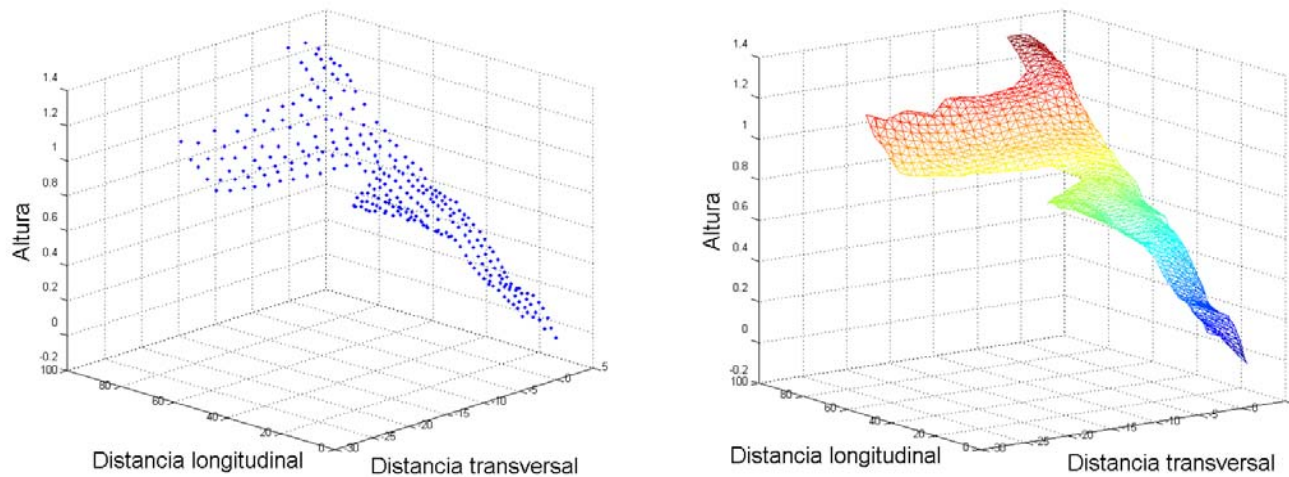


Fig. 22: puntos del levantamiento topográfico y mallado final

5. Validación del modelo

- Entradas del modelo calculadas a partir de varias repeticiones de una maniobra de referencia
 - Tratamiento de datos
 - Filtrado, eliminación del offset, escalado, etc
 - Promediado de las 7 repeticiones
 - Cálculo del intervalo de confianza al 95%
 - Variables de entrada al modelo
 - Par aplicado a las ruedas traseras
 - Presión de freno

$$\left(\bar{x} - t_{(1-\alpha/2)}^{n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{(1-\alpha/2)}^{n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \right)$$

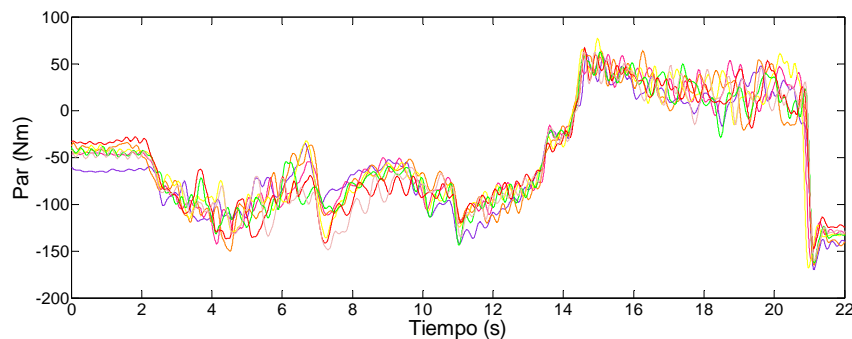


Fig. 23: par en las ruedas traseras

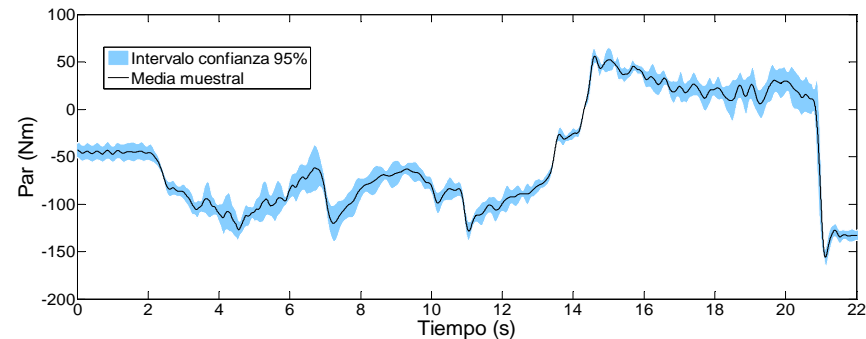
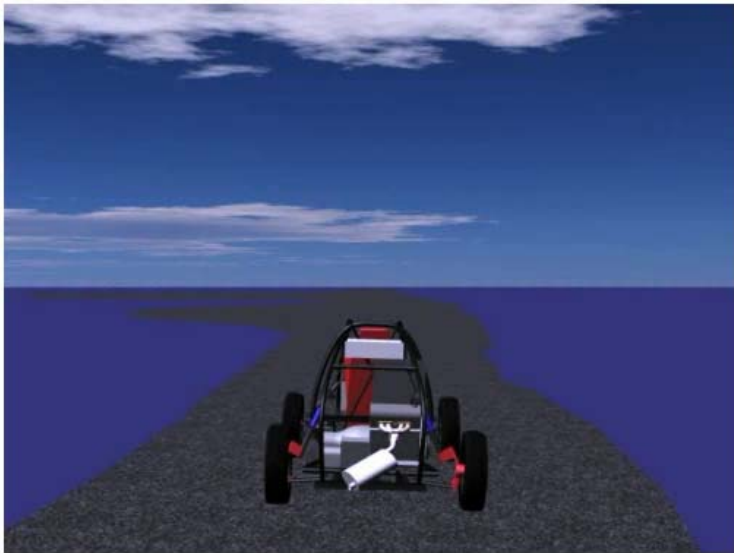
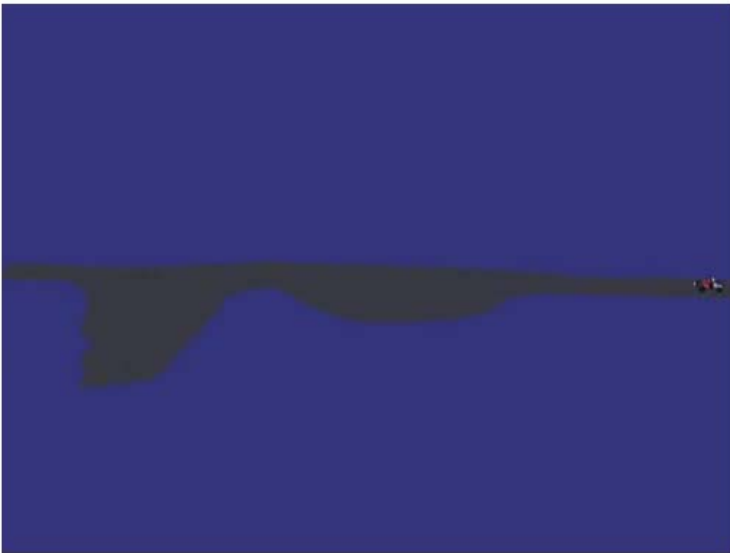
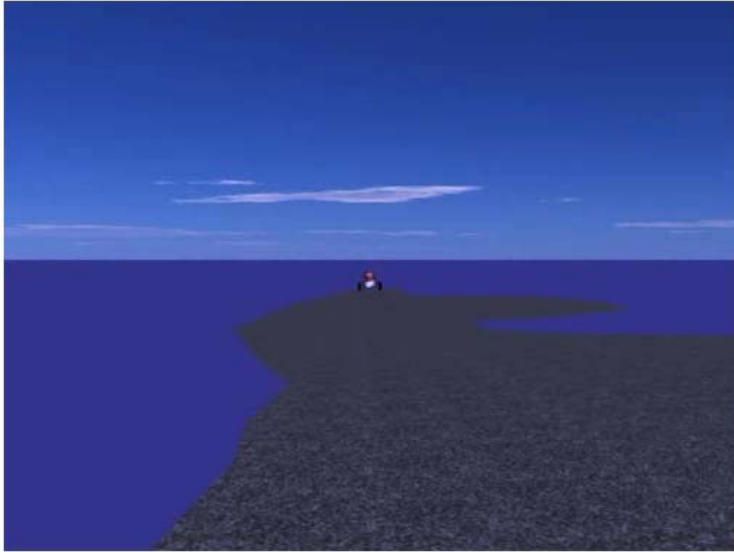


Fig. 24: entrada de par del modelo

5. Validación del modelo



5. Validación del modelo

■ Resultados de la simulación

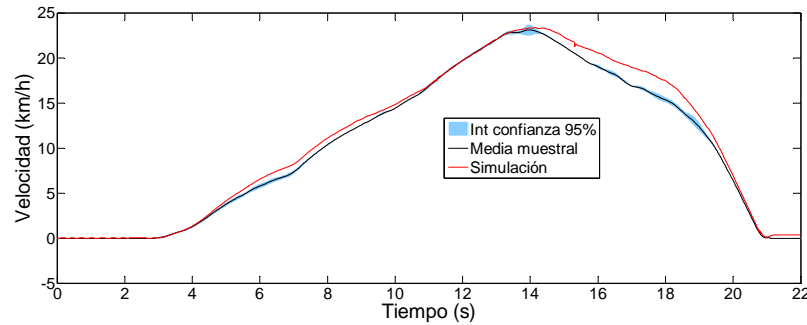


Fig. 25: velocidad de la rueda delantera izquierda

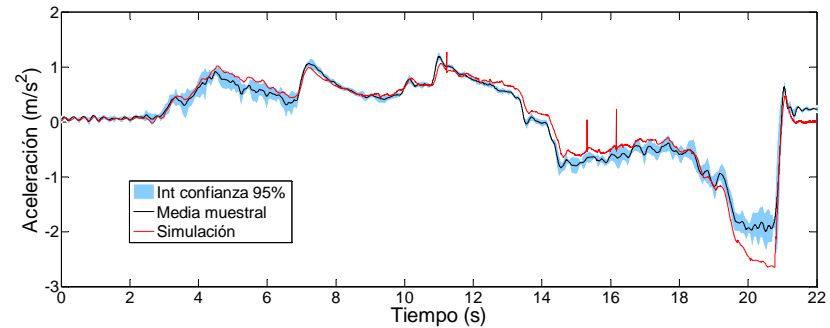


Fig. 26: aceleración longitudinal

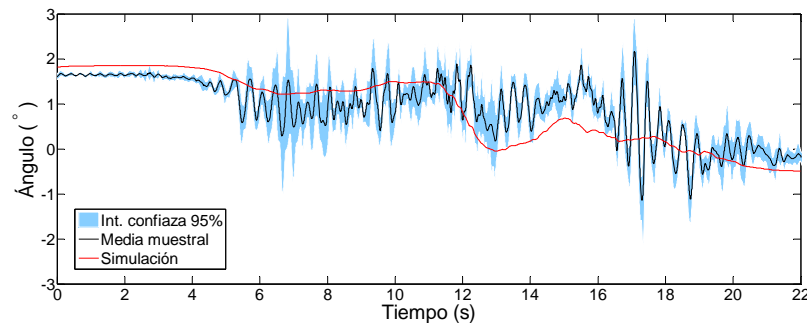


Fig. 27: ángulo de balanceo

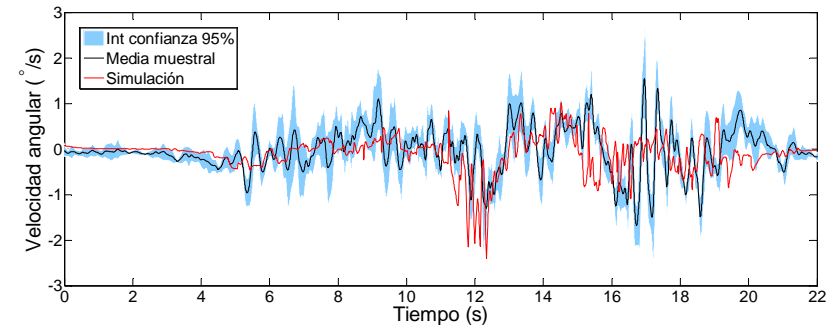


Fig. 28: velocidad de balanceo

6. Software utilizado

- Software de simulación dinámica: MBSLIMF90
 - Biblioteca de sistemas multicuerpo desarrollada por el LIM
 - Tiene funciones que permiten definir y simular máquinas y mecanismos
- Librería de detección de colisiones desarrollada por el LIM
- Software de visualización: OpenSceneGraph (OSG)
 - Biblioteca de código libre que facilita la comunicación entre la aplicación 3D y la tarjeta gráfica, a través de OpenGL



Fig. 29: secuencia de tratamiento de imágenes 3D

7. Conclusiones

- Desarrollo un modelo detallado de automóvil capaz de ejecutarse en tiempo real
 - Identificación de los parámetros del modelo
 - Geometría
 - Distribución de masas
 - Constantes elásticas de los muelles de suspensión
 - Programación de un modelo de neumático con capacidad para funcionar a velocidad nula y para detenerse completamente, incluso en superficies con fuerte pendiente
 - Simulador base para implementar un estimador de estados
- Realización de un detallado levantamiento topográfico para caracterizar el suelo sobre el que se realizan las maniobras

7. Conclusiones

- Este trabajo se ha utilizado para escribir parte del siguiente artículo:
 - R. Pastorino, D. Dopico, E. Sanjurjo, M. A. Naya. Validation of a Multibody Model for an X-by-wire Vehicle Prototype Through Field Testing. *Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics*, Brussels, Belgium, 2011
- Futuras mejoras
 - Implementación de resistencia aerodinámica
 - Implementación de la resistencia a la rodadura en los neumáticos
 - Caracterización de parámetros de neumáticos, frenos y suspensiones
 - Realización de otros tipos de maniobras, incluyendo dinámica lateral, altas velocidades, etc