

Proyecto Fin de Carrera



UNIVERSIDADE DA CORUÑA
Escola Politécnica Superior. Ferrol



INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DIRECCIÓN INTEGRAL PARA VEHÍCULOS

Autor: Daniel Dopico Dopico
Tutor: Javier Cuadrado Aranda
Marzo 2002

ORIGEN DEL ESTUDIO

- Inventor: Encargo al CIS-Ferrol de estudio de patente de SDI
- CIS-Ferrol: Contacto con Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UDC
- LIM: Solicitud de Proyecto Xunta de Galicia
 - Importe: 10.000.000 ptas
 - Investigador Principal: Javier Cuadrado
 - Proyecto en colaboración con CIS-Ferrol
 - Duración: Enero 1999, Diciembre 2000



ANTECEDENTES

- Revisión bibliográfica: SAE, MAZDA, etc
- Patentes
- SDI actuales son sistemas que actúan las ruedas traseras de modo hidráulico, controladas electrónicamente.
- Sistemas electrónico-hidráulicos son muy versátiles
- Sistemas completamente mecánicos más robustos pero menos versátiles



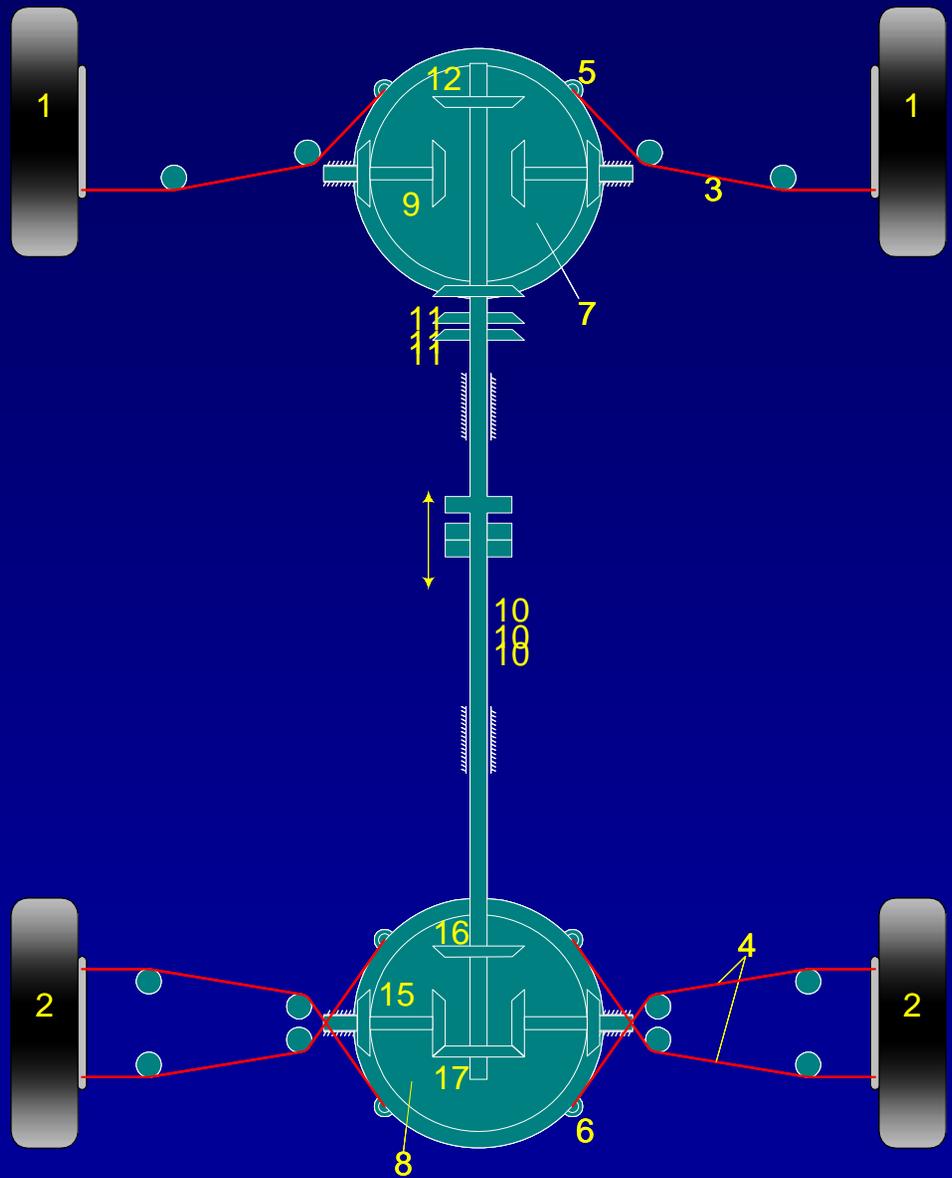
PARTES DEL PROYECTO

- ESTUDIO DE LA PATENTE
 - Defectos encontrados
 - Soluciones aportadas
- SIMULACIÓN CINEMÁTICA DEL SDI
 - Visualización del mecanismo en movimiento
- SIMULACIÓN DINÁMICA DEL SDI
 - Implementación en un vehículo virtual
 - Simulación por ordenador del comportamiento del vehículo



DESCRIPCIÓN DE LA PATENTE

PATENTE
ORIGINAL



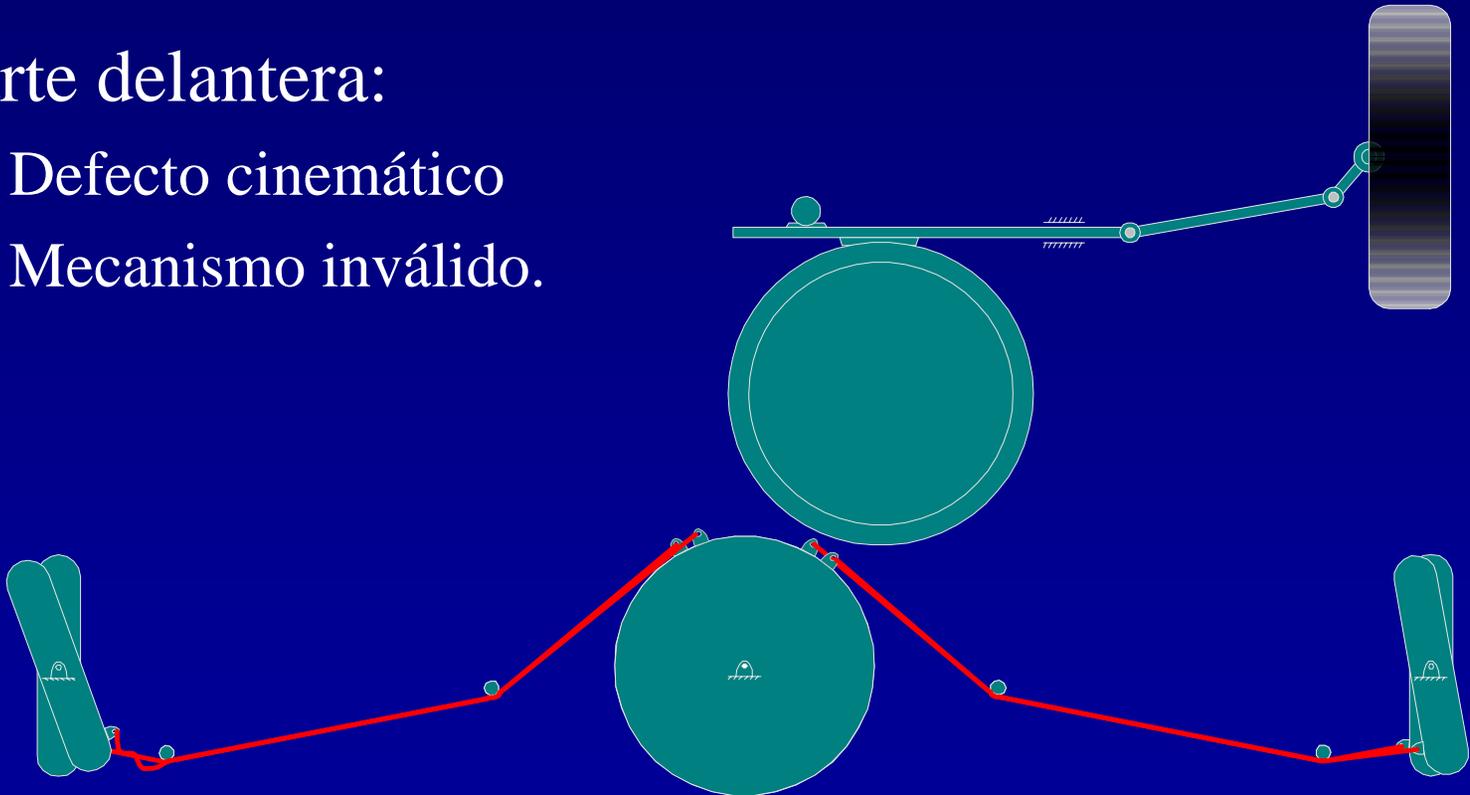
ESTUDIO Y MEJORA DE LA PATENTE

- CABLES:
 - Solución ineficaz
 - Defectos cinemáticos
- Dentados sobrantes
- Problemas en el diseño de la cadena de dirección trasera:
 - Condición de no-deslizamiento



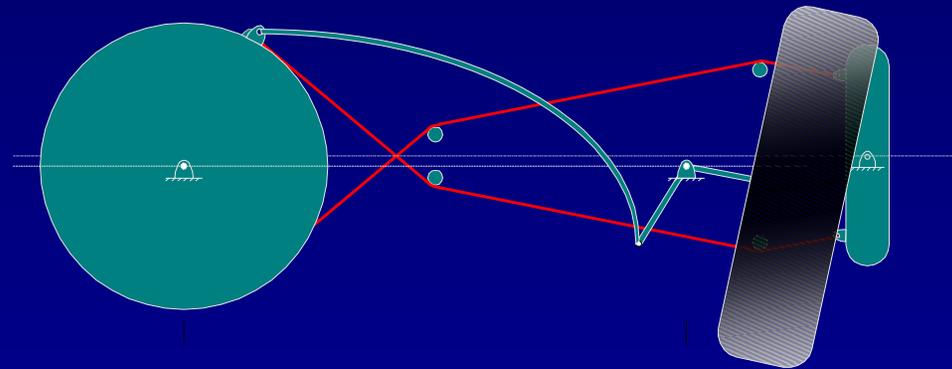
ESTUDIO Y MEJORA DE LA PATENTE

- Parte delantera:
 - Defecto cinemático
 - Mecanismo inválido.



ESTUDIO Y MEJORA DE LA PATENTE

- Parte trasera
 - Mecanismo con cero grados de libertad
 - Criterio de Grübler



$$G = 3(n - 1) - 2p_I - p_{II} = 3(3 - 1) - 2 \cdot 2 - 2 = 0$$

n : n° elementos incluido el fijo

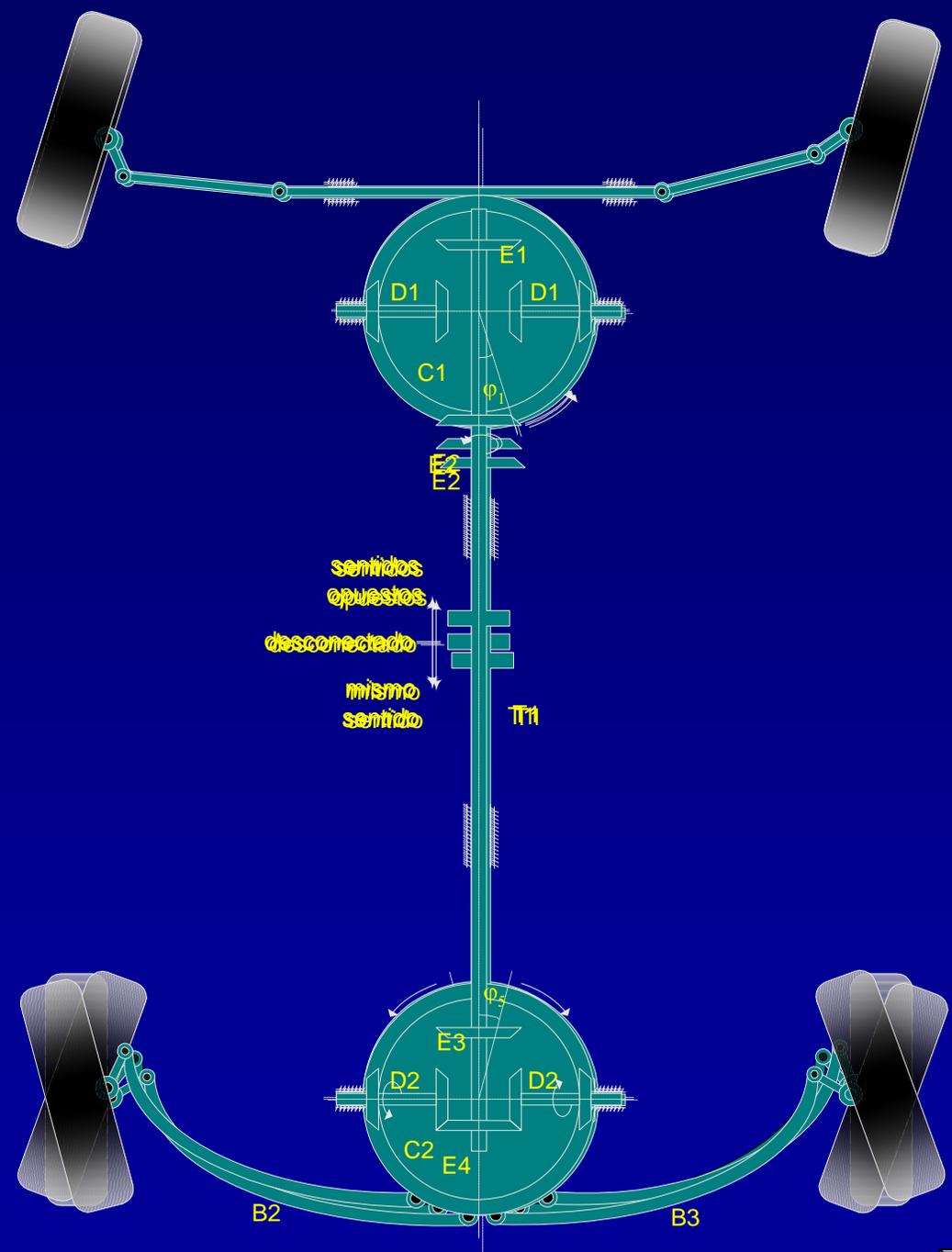
p_I : pares de clase I

p_{II} : pares de clase II



ESTUDIO Y MEJORA DE LA PATENTE

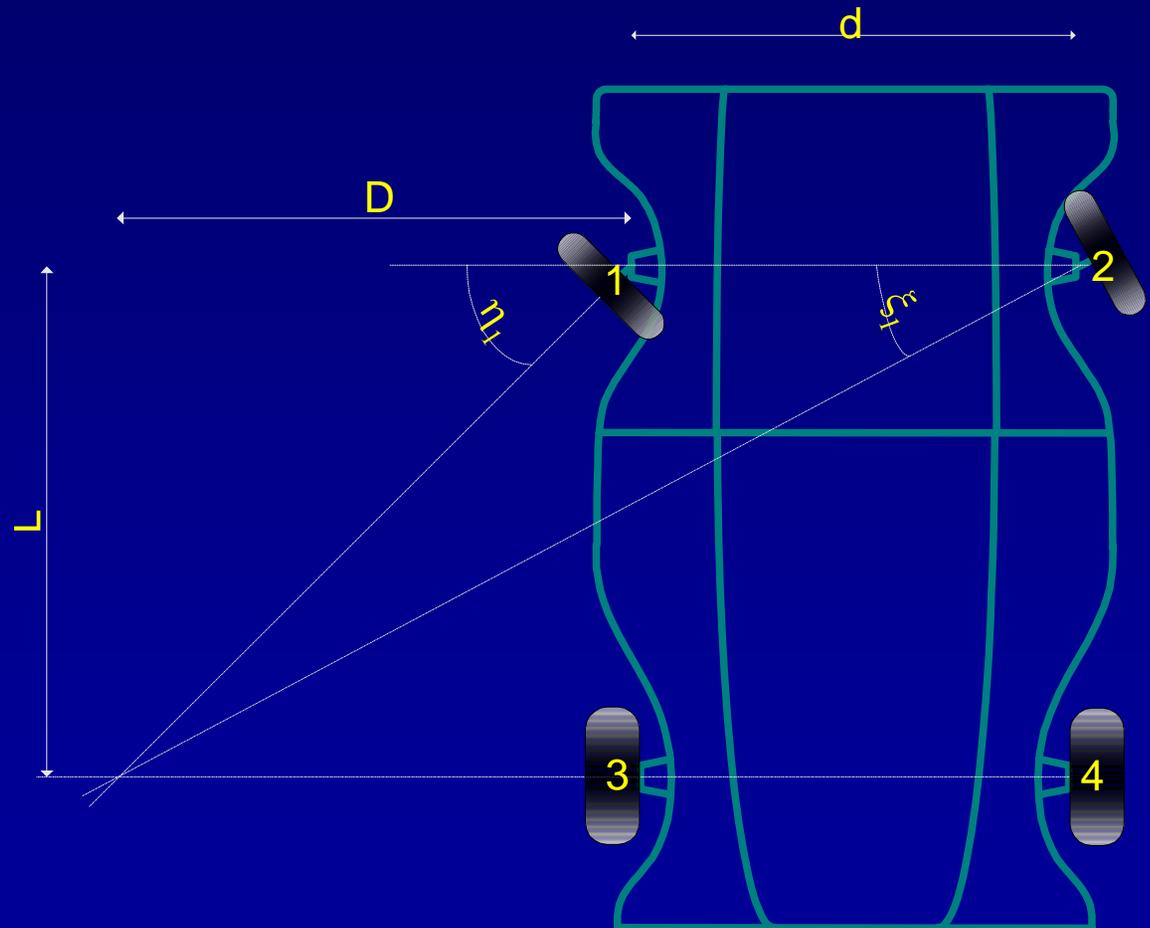
SOLUCIÓN PROPUESTA



ESTUDIO Y MEJORA DE LA PATENTE

Condición de *no-deslizamiento* en vehículo convencional

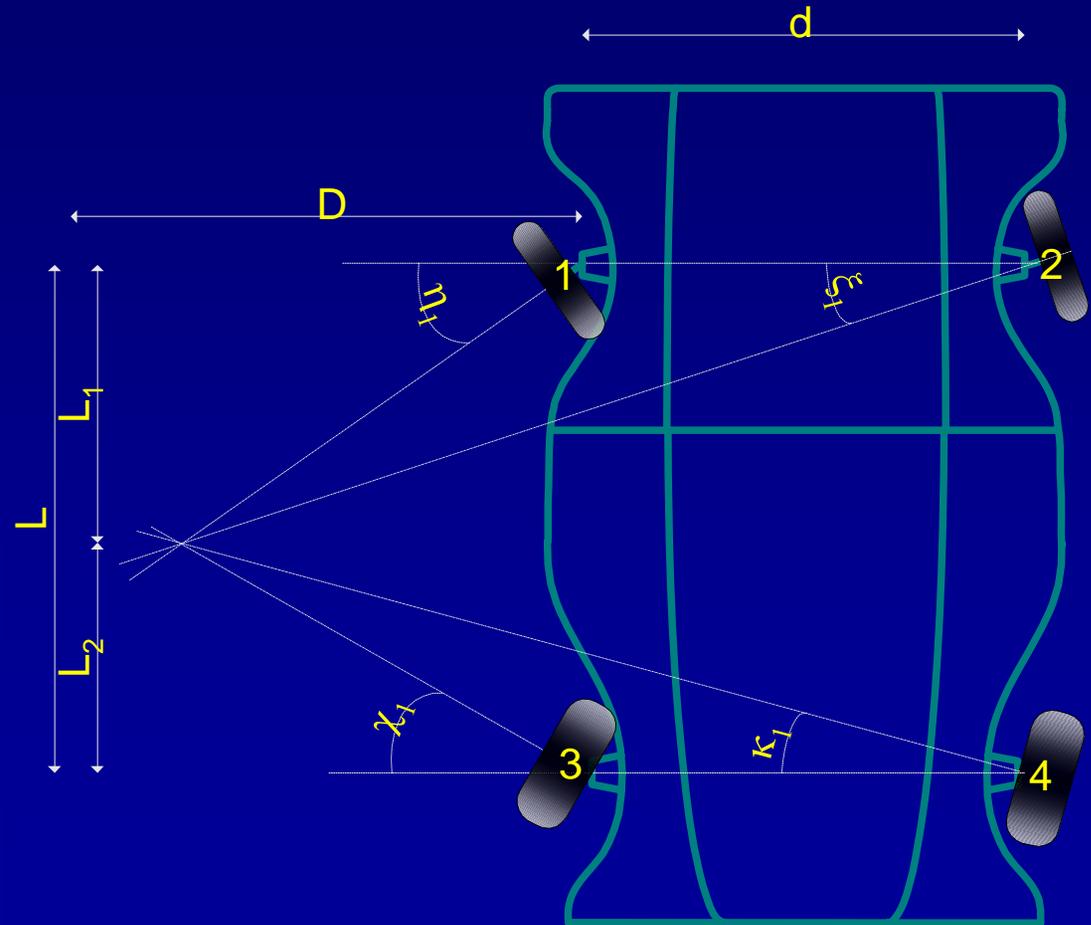
$$\operatorname{tg} \xi_1 = \frac{\operatorname{tg} \eta_1}{1 + \frac{d}{L} \operatorname{tg} \eta_1}$$



ESTUDIO Y MEJORA DE LA PATENTE

Condición de *no-deslizamiento* en posición *sentidos opuestos*

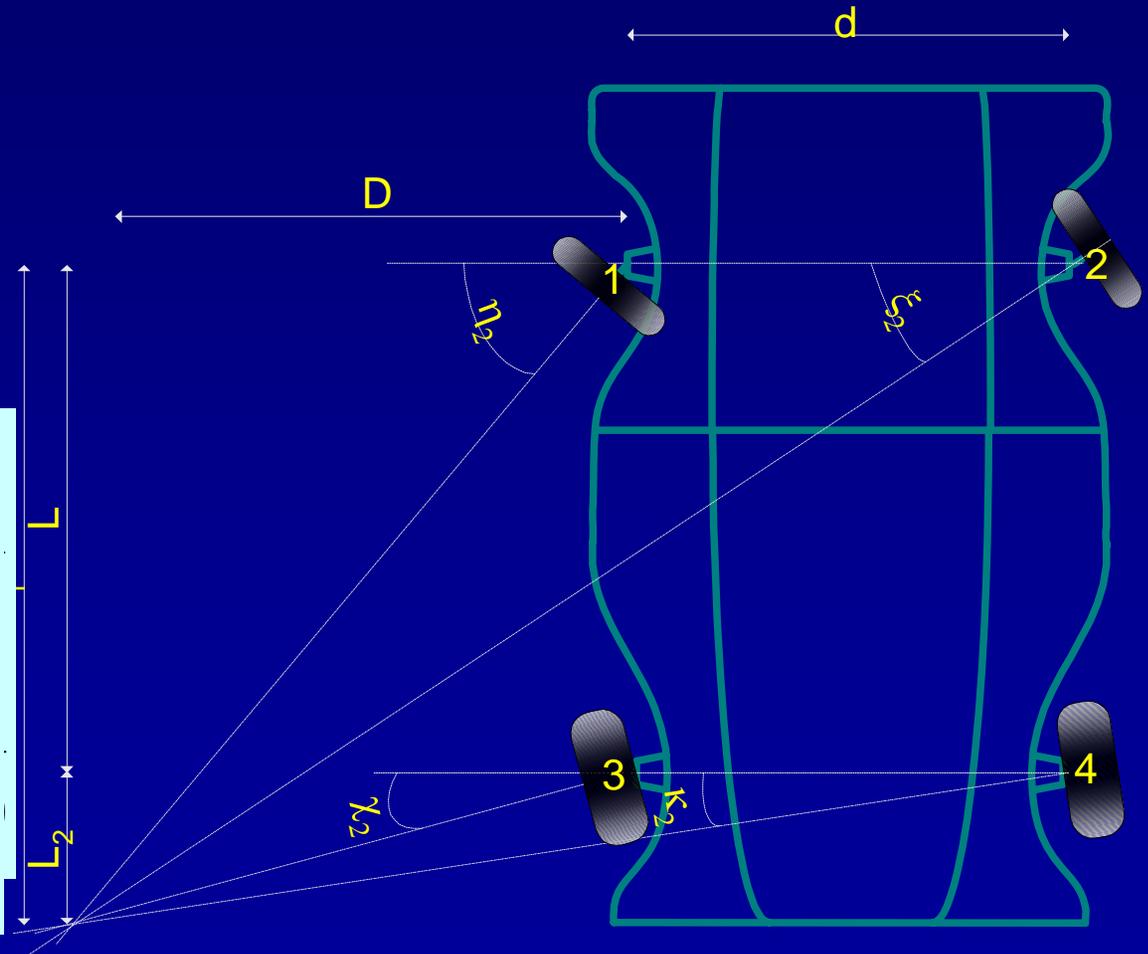
$$\begin{aligned} (1) \quad (1) \quad \operatorname{tg}(\chi_1) &= k \cdot \operatorname{tg}(\eta_1) \\ (2) \quad \operatorname{tg} \xi_1 &= \frac{\operatorname{tg} \eta_1}{1 + \frac{d}{L} \cdot (1+k) \cdot \operatorname{tg} \eta_1} \\ (3) \quad \operatorname{tg}(\kappa_1) &= k \cdot \operatorname{tg}(\xi_1) \\ &= \frac{k \cdot \operatorname{tg} \eta_1}{1 + \frac{d}{L} \cdot (1+k) \cdot \operatorname{tg} \eta_1} \end{aligned}$$



ESTUDIO Y MEJORA DE LA PATENTE

Condición de *no-deslizamiento* en posición *mismo sentido*

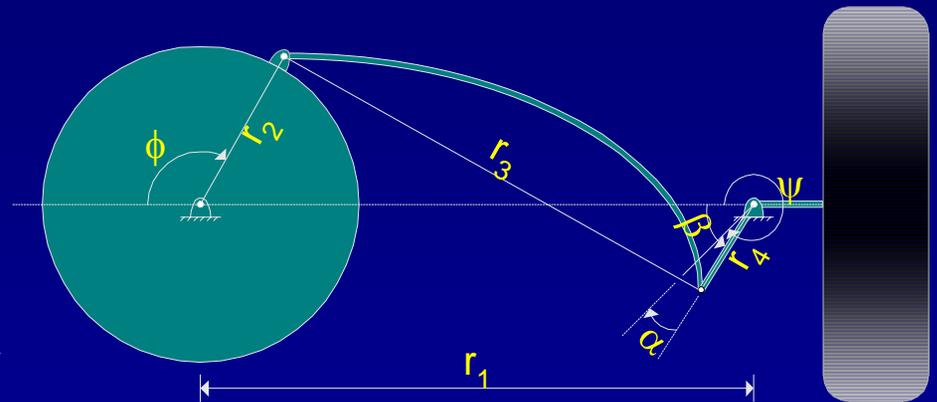
$$\begin{aligned} (1) \quad \text{tg}(\chi_2) &= k \cdot \text{tg}(\eta_2) \\ (2) \quad \text{tg}(\xi_2) &= \frac{\text{tg} \eta_2}{1 + \frac{d}{L} \cdot (1-k) \cdot \text{tg} \eta_2} \\ (3) \quad \text{tg}(\kappa_2) &= k \cdot \text{tg}(\xi_2) \end{aligned}$$



Diseño de la cadena trasera de dirección

- Problema de síntesis cinemática:

- Datos: r_1, r_2
- Incógnitas: r_3, r_4, β
- Posiciones de precisión



$$\begin{array}{l} \phi_1 \rightarrow \psi_1 = -\beta + \alpha_1 \\ \phi_2 \rightarrow \psi_2 = -\beta + \alpha_2 \\ \vdots \\ \phi_n \rightarrow \psi_n = -\beta + \alpha_n \end{array}$$

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$
conocidos

Diseño de la cadena trasera de dirección

$$\left(\sum_{i=1}^n [k_2 \cdot \text{sen} \psi_i] \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \cos^2 \psi_i \\ f_1(k_1, k_3, \beta) = 0 \\ f_2(k_1, k_3, \beta) = 0 \\ f_3(k_1, k_3, \beta) = 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} k_1 \\ k_3 \\ \beta \end{pmatrix}_{i+1} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_3 \\ \beta \end{pmatrix}_i - \mathbf{J}_i^{-1} \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}_i \right) + \begin{pmatrix} \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\psi}_3 \end{pmatrix} + \dots$$

siendo

$$\mathbf{J}_i = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial k_1} & \frac{\partial f_1}{\partial k_3} & \frac{\partial f_1}{\partial \beta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial k_1} & \frac{\partial f_2}{\partial k_3} & \frac{\partial f_2}{\partial \beta} \\ \frac{\partial f_3}{\partial k_1} & \frac{\partial f_3}{\partial k_3} & \frac{\partial f_3}{\partial \beta} \end{pmatrix} \quad k_1 = \frac{r_1}{r_4} \quad ; \quad k_3 = \frac{r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 + r_4^2}{2 \cdot r_2 r_4}$$

$$\left(\sum_{i=1}^n \{k_2 \cdot \text{sen} \psi_i\} \cdot \text{sen} \psi_i \right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



SIMULACIÓN CINEMÁTICA

MODELIZACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO



• Coordenadas mixtas



PROBLEMA DE POSICIÓN



$$\Phi_q^T \Phi_q(\mathbf{q}_i) \cdot (\mathbf{q}_{i+1} - \mathbf{q}_i) = -\Phi_q^T \Phi(\mathbf{q}_i)$$



PROBLEMA DE VELOCIDAD



$$\Phi_q^T \Phi_q \dot{\mathbf{q}} = 0$$



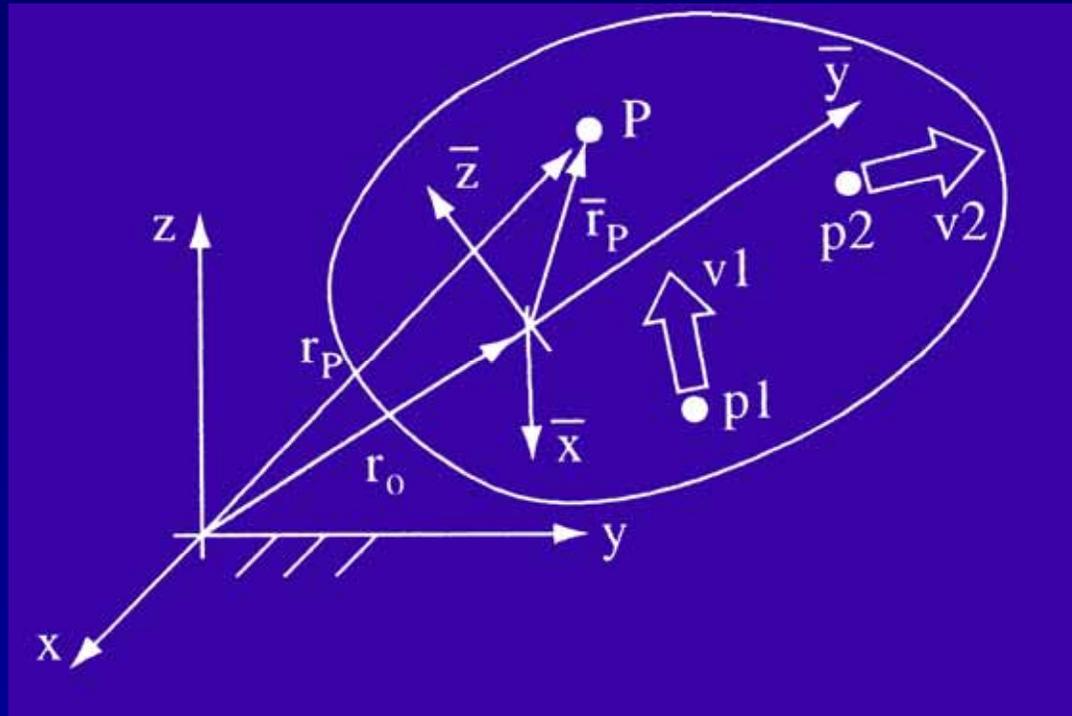
PROBLEMA DE ACCELERACIÓN



$$\Phi_q^T \Phi_q \ddot{\mathbf{q}} = -\Phi_q^T \dot{\Phi}_q \dot{\mathbf{q}}$$



SIMULACIÓN CINEMÁTICA



$$A = [p2 - p1 \quad v1 \quad v2] [\bar{p2} - \bar{p1} \quad \bar{v1} \quad \bar{v2}]^{-1}$$

SIMULACIÓN CINEMÁTICA

VIDEO CINEMÁTICO



SIMULACIÓN DINÁMICA

SIMULACIÓN
DINÁMICA

Obtener el movimiento del sistema conocidas las fuerzas que actúan sobre él

Predecir el comportamiento del sistema (vehículo) a lo largo del tiempo, sin necesidad de construir un prototipo



Ecuaciones de la dinámica

Ecs. LAGRANGE en coordenadas dependientes:
Sistema de ecs.diferenciales-algebraicas (DAE)



$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_{\mathbf{q}}^t \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}$$

$$\Phi = 0$$

Formulación
dinámica

Sistema de ecuaciones
diferenciales ordinarias
(ODE)



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

$$\boldsymbol{\lambda}_{i+1}^* = \boldsymbol{\lambda}_i^* + \alpha \Phi_{i+1}$$

Integración
numérica

Lagrange aumentado con
proyecciones de
velocidades y aceleraciones

Regla trapezoidal implícita de
paso simple

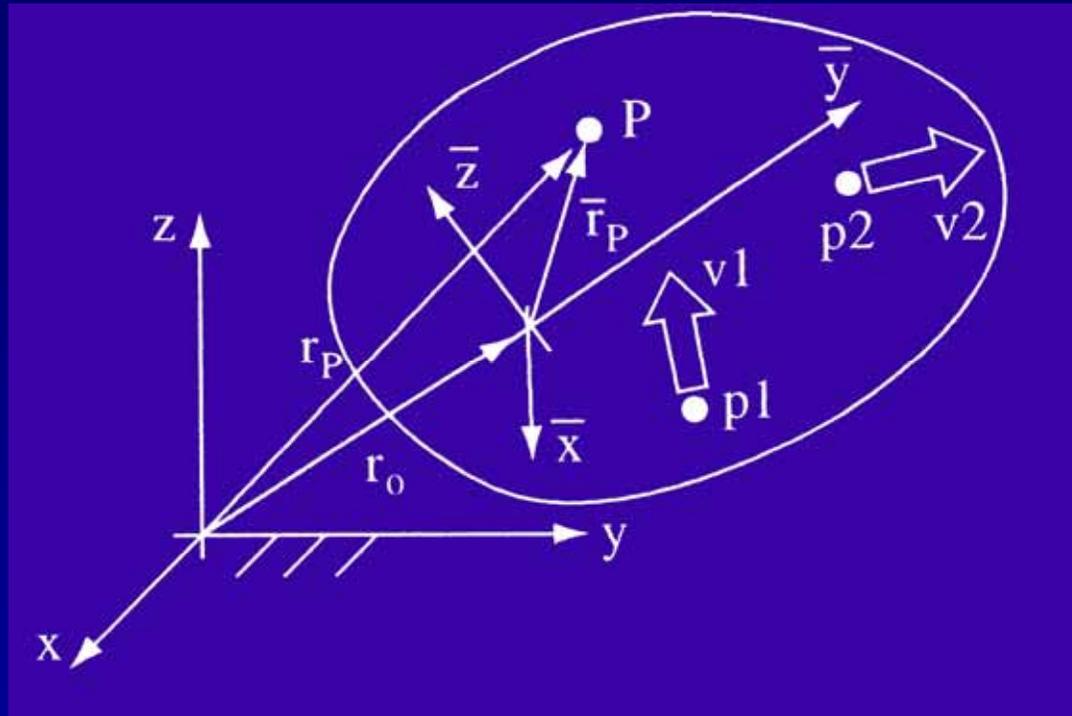


$$\dot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{2}{\Delta t} \mathbf{q}_{n+1} + \hat{\mathbf{q}}_n \quad \text{con} \quad \hat{\mathbf{q}}_n = -\left(\frac{2}{\Delta t} \mathbf{q}_n + \dot{\mathbf{q}}_n \right)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{q}_{n+1} + \hat{\hat{\mathbf{q}}}_n \quad \text{con} \quad \hat{\hat{\mathbf{q}}}_n = -\left(\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{q}_n + \frac{4}{\Delta t} \dot{\mathbf{q}}_n + \ddot{\mathbf{q}}_n \right)$$



SIMULACIÓN DINÁMICA



$$A = [p2 - p1 \quad v1 \quad v2] [p2 - p1 \quad \bar{v}1 \quad \bar{v}2]^{-1}$$

Maniobras realizadas

Maniobras a baja velocidad: Mejoras en la maniobrabilidad

Cambio de sentido



Aparcamiento



Maniobras realizadas

Maniobras a gran velocidad: Mejoras en el comportamiento

Curva rápida (60 km/h)



Rotonda (75 km/h)



Herramientas Informáticas

- Rutinas de cálculo implementadas en FORTRAN
- Modelización de sólidos en I-DEAS
- Salida gráfica: Utilización de la librería gráfica OPEN INVENTOR v2. Programación en C++



Publicaciones derivadas

- CEIG 2001
 - TÍTULO: Estudio de un Sistema Mecánico de Dirección Integral para Vehículos Todoterreno
 - REFERENCIA: Actas del congreso, pp. 337-340
 - LUGAR: Gerona, España. AÑO: Jul 2001

- Artículo enviado a revista internacional
 - TÍTULO: A Fully Mechanical Rear Axle Steering System for Ground Vehicles
 - REVISTA: Vehicle System Dynamics



Publicaciones derivadas

- Artículo enviado a XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (a celebrar):
 - TÍTULO: Sistema Mecánico de Dirección Integral para Vehículos
 - LUGAR: Cadiz, España. AÑO. Dic.2002



Conclusiones

- Se ha conseguido que funcione y se ha mejorado el mecanismo. Mecanismo que funciona y es robusto
- Se ha realizado la simulación cinemática que permite ver el funcionamiento del mecanismo
- Se ha realizado la simulación dinámica que permite ver las ventajas del sistema. Se distinguen:
 - Maniobras a baja velocidad: Relaciones de giro elevadas en las ruedas traseras. Giro a sentidos opuestos o mismo sentido
 - Maniobras a alta velocidad: Relaciones de giro pequeñas para las ruedas traseras. Giro a mismo sentido
- Jugando con los engranajes se puede conseguir un mecanismo que compita en versatilidad con los electrónico-hidráulicos.

