

# Sistema de control para la conducción automática de coches a escala guiados por raíl –Slot–

X. Navarro Bosque, R. Rodríguez Solá, M.C. Casas Castillo  
Departamento de Física e Ingeniería Nuclear (DFEN)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)  
Escola Universitària Politècnica de Vilanova i la Geltrú (EUPVG)  
Av/Victor Balaguer s/n Vilanova i la Geltrú C.P. 08800  
E-mail: [javier.navarro@upc.es](mailto:javier.navarro@upc.es), Tfno:938 967 718 Fax: 938 967 700

## 1. Resumen

Presentamos una experiencia docente orientada a la realización de proyectos fin de carrera, que consiste en el diseño y construcción de un sistema de control que permita la conducción automática de coches a escala 1/32 guiados por raíl.

En las diferentes fases del proyecto se recurre a distintas disciplinas: la física, para estudiar el comportamiento del coche en los circuitos; los sistemas de control, en el estudio y aplicación de los distintos sensores que permiten recoger los datos necesarios; los circuitos electrónicos, que traducen estos datos en señales comprensibles para el ordenador; la informática que permite el proceso de las señales a la vez que envía las órdenes necesarias para optimizar el recorrido y, finalmente, el sistema de actuación, que recoge estas órdenes y las ejecuta en el vehículo.

Una característica de este proyecto es que permite variaciones en sus diferentes fases. Podemos mencionar que los sensores pueden ser de tipo óptico (células fotoeléctricas) o magnéticos (Hall) o inductivos o eléctricos, el sistema electrónico puede enviar señales al ordenador bien por cable o vía radio, el *software* puede limitarse a conseguir que el coche no se salga del circuito o puede reconocerlo para optimizar las sucesivas vueltas. Esta flexibilidad permite elegir el grado de dificultad del trabajo, ajustarlo teniendo en cuenta, por ejemplo, las limitaciones de tiempo de realización y facilita distinguir las calidades de los diferentes trabajos.

En la experiencia que tenemos el alumno agradece esta flexibilidad ya que puede amoldar el trabajo a sus posibilidades, también valora positivamente la aplicación práctica de su trabajo. En este sentido, esperamos que diferentes grupos de trabajo realicen el proyecto a la vez, escogiendo distintas alternativas técnicas de las mencionadas anteriormente. Propondremos entonces, como "fin de fiesta", una competición entre los diferentes modelos construidos que premie el esfuerzo de los grupos de trabajo que consigan los mejores prototipos.

## 2. Descripción del sistema "Slot"

### 2.1. Del juego a la competición

El SLOT, popularizado y conocido por el nombre de *SCALEXTRIC* (nombre de marca comercial) consiste en conducir coches a escala 1/32 por determinadas pistas, que configuran la trayectoria del movimiento de los mismos. Con este sistema de juego se realizan diferentes tipos de competiciones donde fundamentalmente hemos de ser más rápidos que nuestros competidores, con el objetivo de dar más vueltas a un circuito determinado, o emplear el mínimo tiempo posible para realizar un determinado número de vueltas.

En el momento en que el juego se transforma en competición intentaremos que nuestros coches den las máximas prestaciones posibles, y para conseguir tal propósito tendremos que conocer tan a fondo como sea posible el sistema coche-pista y explotar al máximo sus posibilidades.

### 2.2. Descripción de las pistas

En la siguiente imagen se pueden ver pistas de Slot de la marca NINCO



Las pistas de Slot *Standard* son fundamentalmente de dos tipos: rectas y circunferencias. Existen pistas que no pueden ser catalogadas entre los dos tipos anteriores como las de cambio de carril, las *chicanes* i las flexibles. Estas últimas quedaran fuera de nuestro estudio.

Se puede apreciar que el tramo de *PISTA* mostrado presenta dos carriles y que cada carril tiene una hendidura –SLOT– por donde circulará la guía del coche; en los límites de cada hendidura, y a nivel del suelo hay elementos metálicos por donde el motor toma la corriente para su movimiento.



### 2.3. Descripción del coche

En las imágenes siguientes se puede ver un coche MERCEDES C-KLASS de la casa NINCO. Estas reproducciones están hechas a escala 1/32 del modelo real.



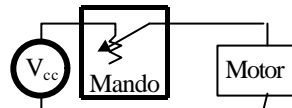
En una primera aproximación podemos pensar que estos coches son como un paralelepípedo de  $10 \times 5 \times 2 \text{ cm}^3$  de los cuales un 35% están ocupados por los elementos propios del coche, ruedas, motor, cables y anclajes de la carrocería.

Los factores fundamentales para describir el movimiento del coche en las pistas son: la guía con el portatrencillas, por donde se alimenta un pequeño motor de corriente continua, que comunica el movimiento a las ruedas posteriores donde está la tracción.

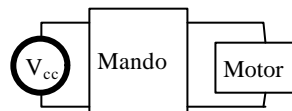
## 2.4. Descripción del controlador tradicional de velocidad: mando

Existen en el mercado dos tipos de controladores de velocidad del coche, que los llamaremos mandos eléctricos y mandos electrónicos.

Los mandos eléctricos ponen una resistencia variable entre la fuente de alimentación y el motor del coche de forma que variando manualmente el valor de la resistencia del mando se varia la diferencia de potencial aplicada al motor y por tanto su velocidad.



Los mandos electrónicos son relativamente modernos y solo los fabrica para el "consumo" la casa NINCO. Su funcionamiento es más complicado que los anteriores y no están teniendo una acogida favorable dentro del mundo del Slot. Cabe mencionar, que de momento estos mandos no están permitidos en las carreras tradicionales.



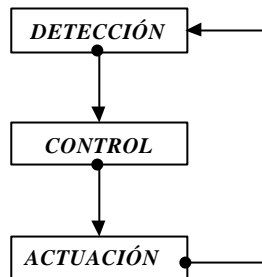
A continuación presentamos la descripción que proporciona la casa NINCO de su mando electrónico VARIO 16

<p><b>MANDO ELECTRÓNICO</b> <b>VARIO 16</b></p>	<p>El gráfico muestra 8 curvas pertenecientes a los diferentes estilos de conducción seleccionables</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mando electrónico sin resistencia</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Freno eléctrico</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selector con 16 combinaciones</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 112 puntos de control</li> </ul>	

### 3. Propuesta del problema

Nos proponemos construir sistemas que sean capaces de conducir los coches por los circuitos de Slot de forma automática y por tanto que controlen los parámetros físicos que afectan al movimiento del mismo. El objetivo será poder competir con otros sistemas automáticos e incluso con pilotos reales (personas).

Para construir el sistema de conducción automática deberemos tener en cuenta los siguientes aspectos básicos: *detección*, *control* y *actuación*. Estos aspectos quieren ser el reflejo de una conducción tradicional: ver y memorizar el circuito e intentar que el coche corra lo más rápido posible sin tener salidas de pista.



#### 3.1. La detección

El sistema ha de ser capaz de reconocer la situación en la que se encuentra el coche con relación a la pista. Para poder realizar esta tarea son posibles dos tipos de actuaciones: situar detectores en la pista o bien dotar al coche de detectores de reconocimiento de pista y/o de posición en pista.

La primera de estas opciones es aconsejable como un primer proceso para la puesta en práctica de la segunda, e incluso se podría plantear para que su realización corriera a cargo de estudiantes de secundaria. –Una experiencia tal ha sido llevada a cabo por el profesor Alberto Navarro en el instituto de secundaria IES Sant Martí de Provençat de Barcelona con la colaboración de alumnos de último curso de Bachillerato–

En nuestros estudios con este tipo de sistemas hemos podido constatar que nos hacen falta detectores cada 4 metros aproximadamente, colocados de forma estratégica; si pensamos en circuitos tipo rally “grandes” de unos 40 metros de cuerda, con 10 sensores podríamos realizar un control de conducción aceptable, y este número de sensores parece más que razonable. Esta opción presenta el inconveniente que los circuitos tradicionales de competición (que son circuitos largos) disponen de un único detector, el de la “salida-meta” no siendo aplicable este tipo de detección.

La segunda de las opciones es mucho más atractiva ya que el sistema de detección es autónomo, por tanto independiente del circuito lo que permite la conducción y la competición en pistas tradicionales. Esta opción será mucho más laboriosa y presentará muchas más dificultades técnicas que el alumno o grupo de alumnos –equipo- deberán solucionar.

En esta opción le debemos pedir al sistema de detección que sea capaz de detectar la posición del coche en la pista i su orientación relativa al raíl de la misma, con el objetivo de poder reconocer el circuito y poder tomar decisiones en consecuencia.

#### 3.2. El control

El subsistema de control será el encargado de capturar, acondicionar y emitir la información proporcionada por los sensores y procesarla para poder tomar decisiones sobre el comportamiento presente y futuro del coche. Podemos pensar en dos tipos de sistemas de control: los específicos para esta

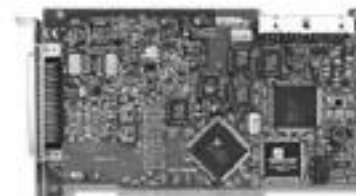
tarea y sistemas genéricos de captura de datos y procesamiento de los mismos, por ejemplo ordenadores personales (PC) y periféricos externos de captura de datos.

Los sistemas específicos son muy atractivos para poder plantear proyectos final de carrera ya que la complicación teórica y técnica para su realización es muy grande. Este tipo de sistemas tienen la ventaja de ser -o poder ser- muy rápidos en el procesamiento de las señales y en su posterior tratamiento. En contra, estos sistemas pueden llegar a ser tan complicados de realizar que lleguen a ser irrealizables como un proyecto final de carrera.

En la actualidad los sistemas genéricos (PC) han llegado a ser tan rápidos en la realización de cálculos que representan una alternativa válida para poder realizar las tareas en las que estamos interesados. Por otro lado, que el alumno pueda trabajar con herramientas con las que está familiarizado supone una pequeña ayuda para poder realizar el proyecto y son herramientas que sin duda utilizará en su futura carrera profesional. Por otra parte existe gran cantidad de periféricos para la captura de datos externos desde el PC que se pueden controlar con lenguajes de alto y altísimo nivel.

Por ejemplo la tarjeta capturadora K8000 de la casa Velleman se puede controlar con Basic, tanto para MS-DOS, POWER BASIC, como para WINDOWS, VISUAL BASIC, con C y con PASCAL.

**Velleman PC INTERFACE  
BOARD K8000**



**NATIONAL  
INSTRUMENTS 6023E**

Las tarjetas captadoras de la casa NATIONAL INSTRUMENTS 6023E, de precio reducido, pueden ser controladas con lenguajes visuales [Visual Basic, Visual C] y con lenguajes GRAFICOS tales como el LAB-VIEW.

### **3.3. La actuación**

Una vez controlados los datos, hemos de actuar sobre el coche para modificar, si es necesario, la velocidad del mismo. En el caso que nos ocupa esta actuación es muy simple, ya que el único parámetro modificable es la diferencia de potencial que aplicamos al motor del coche. En realidad este tipo de control no es más que la simulación del control por mando tradicional eléctrico y en realidad el control de un motor de corriente continua puede, o incluso debe, hacerse por medio de regulación de ciclos de señales cuadradas. Esta última posibilidad permite volver a elegir entre por lo menos dos métodos para realizar la actuación.

## **4. Disciplinas involucradas en la realización del proyecto**

Todo lo comentado anteriormente nos induce a que la realización del proyecto no la pueda realizar un solo alumno de ingeniería técnica. Para la realización de un proyecto competitivo, pueden -o incluso deben- cooperar y coordinarse entre sí diferentes especialistas con el fin de que cada uno de ellos aporte sus conocimientos específicos básicos, que con toda probabilidad no lo son para el resto de miembros del equipo.

En este proyecto deben intervenir especialistas en Software, en Hardware y en Mecánica. Estas tres disciplinas básicas se pueden encontrar entre las ingenierías técnicas de Telecomunicaciones, Electrónica, Mecánica e Informática, entre otras.

Los ingenieros en telecomunicaciones o electrónica pueden ocuparse de los dispositivos electrónicos, el Hardware; los mecánicos de la tarea de situar en el coche estos dispositivos de forma operativa; y los informáticos de realizar los programas que hagan funcionar todo el sistema.

Hay que hacer una especial mención a los trabajos de ingeniería mecánica, ya que los posibles dispositivos electrónicos que hay que situar dentro del coche tienen un espacio practicable para su ubicación muy reducido y se han de compatibilizar con los dispositivos existentes en los coches de Slot de escala 1/32. Hay que tener en cuenta que un coche de las características de las que estamos trabajando el volumen del mismo es de aproximadamente  $10 \times 5 \times 2 \text{ cm}^3$ , lo que implica con toda seguridad el tener que realizar trabajos con precisiones de décimas de milímetro y por ejemplo los aspectos de circuitería electrónica trabajarlos con tecnología SMT (Surface Mounted Technology).

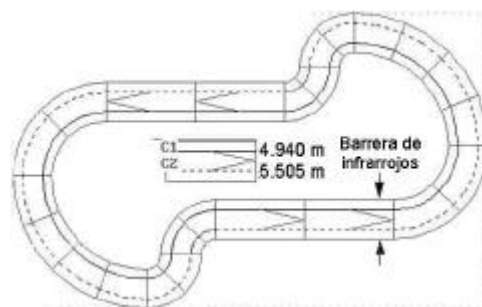
## 5. Dos soluciones iniciales

Con el fin de ofrecer a los diferentes equipos de alumnos la posibilidad de realizar un proyecto viable y sobre todo para poder ayudarles a superar diferentes obstáculos que durante la realización del mismo se presentaran, hemos construido dos sistemas de conducción automatizada. Cronológicamente, el primero ha sido desarrollado por profesores del Departament de Física i Enginyeria Nuclear de la Universitat Politècnica de Catalunya, y se encuadra dentro de los sistemas con detectores en la pista. El segundo ha sido realizado por el alumno Juan Ballesteros Valenzuela, como proyecto final de carrera, con la imprescindible participación del profesor Jordi Prat (codirector) del Departamento de Enginyeria Electrònica de la misma universidad y está basado en detección autónoma.

### 5.1. Detectores en la pista

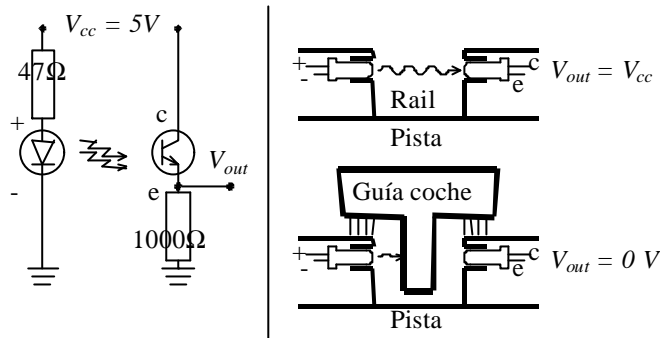
El material necesario para la realización de este estudio es muy simple: un detector de paso, una tarjeta para realizar la captura del dato proporcionado por el detector, un PC, una fuente de alimentación de 16 V, un circuito de Slot y un par de coches.

El circuito de Slot utilizado para la aplicación de este método, ha sido cedido por la empresa NINCO, y es el que se muestra a continuación



#### 5.1.1. El detector, detección

El detector de paso está formado por una barrera de infrarrojos; un diodo emisor y un fototransistor (este tipo de barreras suelen ser las utilizadas en los mouse de los PC para detectar el movimiento de la bola del mismo) situados debajo de la guía de la pista, de forma que cuando el coche pasa por el lugar donde está el detector, el haz de luz entre diodo y transistor se interrumpe y el transistor cambia el estado de conducción. Los fabricantes de componentes electrónicos suelen dar ejemplos de barreras infrarrojas; presentamos a continuación un esquema proporcionado por Texas Instruments "Optoelectronics and Image Sensor" Data Book de 1990 en la página 5-21



Este cambio de estado es captado por el sistema de control, que en nuestro caso se trata del K8000 de la casa Velleman que se conecta al puerto paralelo del PC. Utilizando las subrutinas en QBASIC proporcionadas por el fabricante, se realiza la captura del estado del detector.

El programa asociado a la actuación tiene en cuenta la geometría del circuito y el comportamiento del coche en función de la diferencia de potencial aplicada al motor y mediante tablas de espacio-tiempo cambia esta diferencia en función de la posición estimada del coche en la pista. Esta diferencia de potencial se le comunica al motor del coche por medio del mismo periférico K8000.

### 5.1.2. Relaciones Voltaje Velocidad

Para establecer la relación entre el voltaje aplicado al motor del coche y su velocidad, hacemos que el coche de una serie de vueltas a un circuito conocido, de longitud  $l$ , a un determinado voltaje  $V$  y medimos el tiempo  $t$  que tarda en recorrerlo. Las hipótesis de trabajo son que la velocidad es constante  $v = l/t$  y que es proporcional al voltaje aplicado  $v = A V + B$ . La diferencia de potencial del motor la comunicamos por una salida digital de 6 bits de la tarjeta K8000 donde  $V = 0$  es el equivalente a 0 voltios aplicados al motor y  $V = 63$  es el equivalente a 10 voltios. Experimentalmente hemos obtenido los resultados siguientes

$v = A V + B$						
Coche	$A$	$S_A$	$B$	$S_B$	Correlación	
<b>F40 –Scalextrix- con diferencial</b>	0.050	0.001	-0.82	0.04	0.9982	$v = 0.05 V - 0.82$
<b>Opel Calibra -NINCO- motor NC1</b>	0.0485	0.0005	-0.83	0.02	0.9993	$v = 0.0485 V - 0.83$

### 5.1.3. Estimación de la posición, control

Conocidas las relaciones velocidad voltaje, estimamos la posición del coche de la forma siguiente: la velocidad media  $v$  está relacionada con el incremento de posición del coche  $D$  y con el incremento de tiempo  $D$  según

$$D = v D = (A V + B) D$$

para cada nuevo paso del programa de control se calcula el  $D$  y como que es conocido el valor de  $V$  estimamos la posición actual del coche en función de la posición anterior

$$x_{\text{actual}} = x_{\text{anterior}} + D$$

El valor de  $x_{\text{actual}}$  nos indica la posición del coche en el circuito lo que nos permite ajustar el valor de la velocidad con el parámetro  $V$  consultando unas tablas previamente construidas para tal efecto.

#### 5.1.4. Tablas posición voltaje, actuación

Se supone que el coche es capaz de soportar una determinada aceleración centrípeta  $a_n$ , que está relacionada con la velocidad  $v$  y con el radio  $r$  de la pista de la forma

$$a_n = v^2/r$$

conocido el radio de la pista ajustamos la velocidad del coche según la relación anterior

$$v = (r a_n)^{1/2}$$

Ya que la pista es conocida, sabemos para cada posición del coche el radio de curvatura de la trayectoria y por tanto para cada posición estamos en condiciones de ajustar la velocidad, esto es el voltaje aplicado al motor del coche.

#### 5.1.5. Conclusión

Este sistema se demostró poco estable en diferentes condiciones. La falta de estabilidad del sistema se produce fundamentalmente porque este es "casi ciego"; sólo tenemos la seguridad de que el coche se encuentra en un punto del circuito, en el lugar donde se sitúa la barrera infrarroja,  $x_{\text{actual}} = 0$  por lo que las estimaciones que podemos hacer a priori sobre la posición del coche en función del tiempo, a medida que transcurre el mismo dejan de ser fiables.

Para solucionar este problema se propusieron las actuaciones siguientes: limitar la longitud del circuito a 5 metros y situar el detector de paso prácticamente al final de una recta, con el propósito de que si ocurren desajustes, estos se produzcan al final del recorrido en zona recta y el coche no salga despedido de la pista.

Los resultados, bajo estas limitaciones, son espectaculares, obteniendo una conducción rápida, durante más de 100 vueltas para diferentes modelos de coches de Slot. Esta conducción, aunque rápida, es perfectamente superable por un piloto real, pero el piloto real no puede superar más de 2 minutos de concentración para la conducción rapidísima. Podemos asegurar que este sistema es más rápido que un pilotaje tradicional en competiciones de resistencia y que es muy prometedor para competiciones de rally.

Coche	Tiempo promedio en dar una vuelta (s)	Nº vueltas
<b>F40 -Scalexrix- con diferencial</b>	3.01	> 100
<b>Opel Calibra -NINCO- motor NC1</b>	3.25	> 100
<b>PILOTO con el Opel Calibra</b>	2.95	9
<b>PILOTO con el F40</b>	2.91	4

## 5.2. Detección autónoma

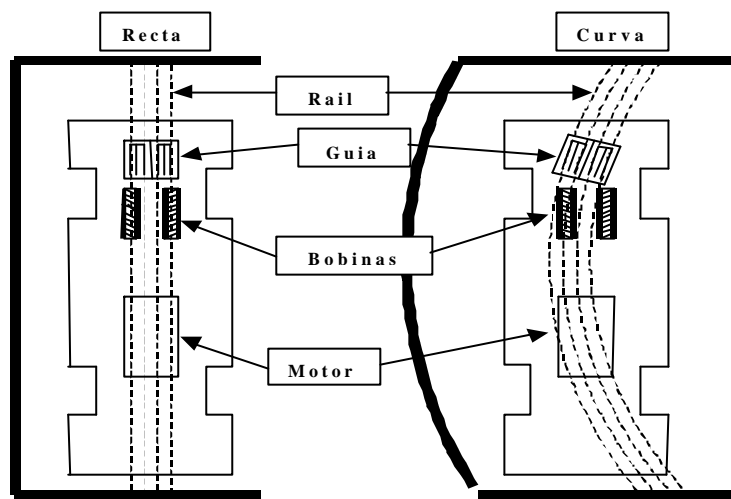
Para la realización de este proyecto se contó con la infraestructura que proporciona la Escola Universitaria de Vilanova i la Geltrú (EUPVG) para la realización de proyectos final de carrera (PFC) y

se encargó el proyecto al alumno Juan Ballesteros Valenzuela, estudiante de la especialidad de Telecomunicaciones. En este sistema la detección se realiza mediante los circuitos electrónicos situados en el coche y se analizan por medio de un PC al que llega la información de los detectores por vía radio.

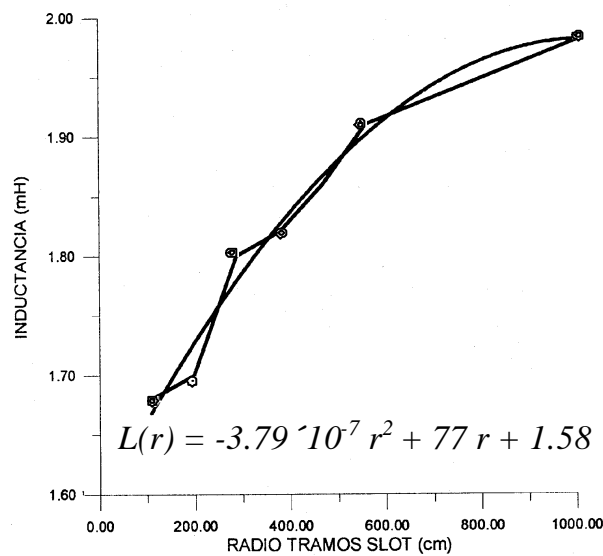
### 5.2.1. La detección

Se utilizaron dos tipos de detectores, uno de posición relativa del coche con relación a la guía de la pista y un segundo detector para conocer la distancia recorrida por el coche.

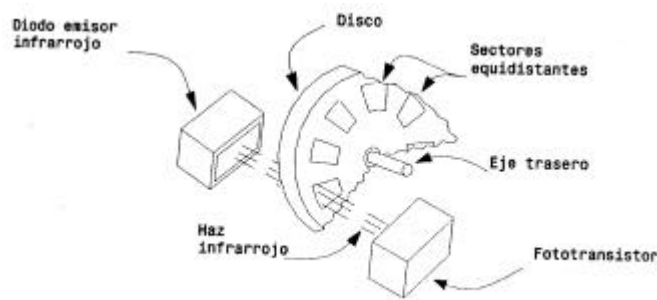
El primer detector consiste en dos bobinas conectadas en serie instaladas en la parte delantera del coche que funcionan como un detector de metal. Si las bobinas están justo encima de los raíles metálicos tienen una determinada inductancia y a medida que el coche se separa de los raíles esta inductancia cambia. Esta separación de las bobinas respecto de los raíles metálicos se produce cuando el coche describe una curva, y en tanto que esta curva es más cerrada (tiene un radio menor) la separación es mayor.



En la siguiente gráfica se muestra la respuesta de las bobinas (inductancia  $L$  en  $mH$ ) para los diferentes radios ( $r$  en  $cm$ ) de las pistas de Slot. A los resultados experimentales se les puede asociar un polinomio de interpolación, que para nuestro caso es  $L(r) = -3.79 \cdot 10^{-7} r^2 + 77 r + 1.58$



El segundo detector es un codificador óptico –encoder- situado en el tren de ruedas posterior.



Contando el número de cambios de estado en el fototransistor conocemos la distancia recorrida por el coche.

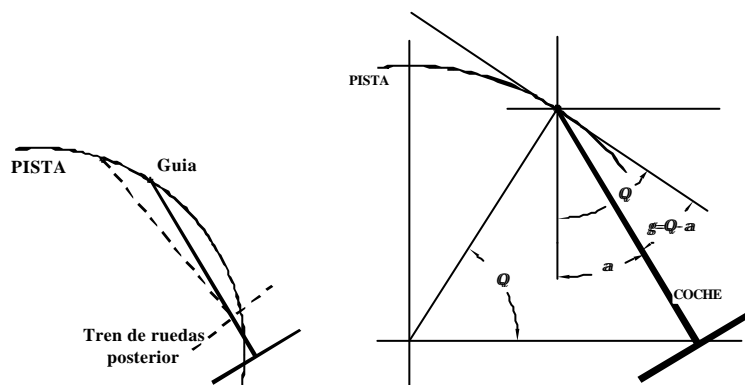
### 5.2.2. El control y la actuación

El control y la actuación se realizan por medio de un PC con el software de control Lab-View®. Las señales emitidas por el coche son recogidas por una estación acondicionadora, construida para tal efecto y procesadas por el software. En este proyecto nos hemos limitado a captar las señales procedentes del coche en las vueltas de reconocimiento, asociarlas a los voltajes aplicados en cada instante y para la “carrera” repetir estos voltajes en función de las señales emitidas por el coche.

### 5.2.3. Modelo cinemático sin desplazamiento lateral. Otros métodos de detección

En relación a este tipo de proyectos, estamos estudiando modelos teóricos de la situación relativa del coche en la pista para poder optimizar los métodos de detección (lo que en este proyecto realiza el detector de metales)

El modelo cinemático sin desplazamiento lateral propone que un pequeño desplazamiento del coche se produce de la siguiente forma: el tren de ruedas posteriores avanza en la dirección del eje del coche, este desplazamiento hará que la guía del coche recorra un espacio hasta a una nueva posición del carril de la pista



La posición del coche relativa a la pista se puede describir en función del parámetro  $g$  Para un coche de longitud  $L$  que circula por una pista de radio  $R$  (para las pistas rectas  $R$  será infinito) y durante un desplazamiento infinitesimal  $ds$  tenemos una ecuación de movimiento

$$\frac{dg}{ds} + \frac{g}{L} = \frac{1}{R} \quad \text{cuya solución es} \quad g(s) = g_0 e^{-\frac{s}{L}} + \frac{L}{R}$$

donde  $g$  es una constante que se determina en función de la posición del coche al principio del tramo de pista estudiado.

Este ángulo  $g$  es susceptible de ser medido experimentalmente por diferentes métodos y con el conocimiento de este ángulo el sistema podrá actuar para optimizar la conducción y para reconocer el tipo de pista donde se encuentra el coche.

## 6. Conclusiones

### 6.1. Generación de proyectos final de carrera

Con el presente trabajo hemos querido poner de manifiesto un aspecto lúdico para la generación de proyectos final de carrera; pero lo que es realmente destacable es el enorme trabajo de ingeniería práctica que se esconde detrás de esta propuesta. Otro aspecto destacable es el sinfín de posibilidades que hay para poder conseguir el objetivo deseado; hemos presentado por lo menos dos propuestas para cada uno de los tres aspectos fundamentales del trabajo y estamos seguros que para cada uno de estos aspectos se pueden tantear muchas más posibles soluciones. Quizás la elección de algunas de estas soluciones haga que el proyecto no sea operativo, pero lo realmente importante es que los alumnos realicen un trabajo de ingeniería “serio” y estén autoincentivados para ello.

### 6.2. Carrera final

Un incentivo para la realización total del proyecto es sin duda el que éste deba funcionar en condiciones de competición lúdica. Con tal propósito se puede plantear una carrera final donde los diferentes proyectos puedan compararse entre sí en condiciones de carrera, otorgando un premio “simbólico” a aquellos proyectos que sean más competitivos.