

## Capítulo 5

# Resultados experimentales

En este capítulo se exponen las soluciones a los problemas relacionados con el manejo físico de las señales, necesarias para la implementación física de los controladores diseñados en el capítulo anterior. Además, se muestran los resultados experimentales obtenidas a partir de lecturas físicas del sistema realimentado con los controladores diseñados en el capítulo anterior.

### 5.1. Acondicionamiento de las señales

Para acondicionar las señales de los potenciómetros se conectan a  $12V$  y tierra, tomando la medición de la terminal central. Esto se ilustra en la figura 5.2. Posteriormente se obtiene una ecuación lineal que relacione voltaje y posición; de esta manera la tarjeta obtiene una lectura de voltaje que se puede interpretar para saber en qué posición se encuentra el carro, el balancín o el péndulo.

La obtención de las ecuaciones lineales que relacionan la posición con el voltaje se hace de forma experimental, tomando varias mediciones de voltaje en diferentes posiciones y realizando una regresión lineal del tipo  $Ax + B$ .

Para el caso del potenciómetro ubicado en el carro, la recta que describe la relación entre el voltaje y la posición está dada por  $z = 0.2454V_{potcar} - 1.4149$ , donde  $z$  es la posición expresada en metros. La recta que describe la relación entre la posición y el voltaje en el potenciómetro que detecta el movimiento del péndulo es  $\alpha = -0.3863V_{potpend} + 2.276$ , donde  $\alpha$  es la posición angular de la barra y está expresada en radianes. Por su parte la relación posición-voltaje en el potenciómetro del balancín, está descrita por  $\theta = -0.0774V_{potbal} + 0.512$ , donde  $\theta$  es la posición angular del balancín expresada en radianes; para el caso del modelo del sistema de péndulo-carro-balancín, la recta anterior cambia de signos, esto se debe a que en el modelo se consideran ángulos positivos aquellos que tienen un sentido antihorario.

También es necesario filtrar las señales adquiridas por los potenciómetros debido a que existe una gran cantidad de ruido en ellas. Véase A.3

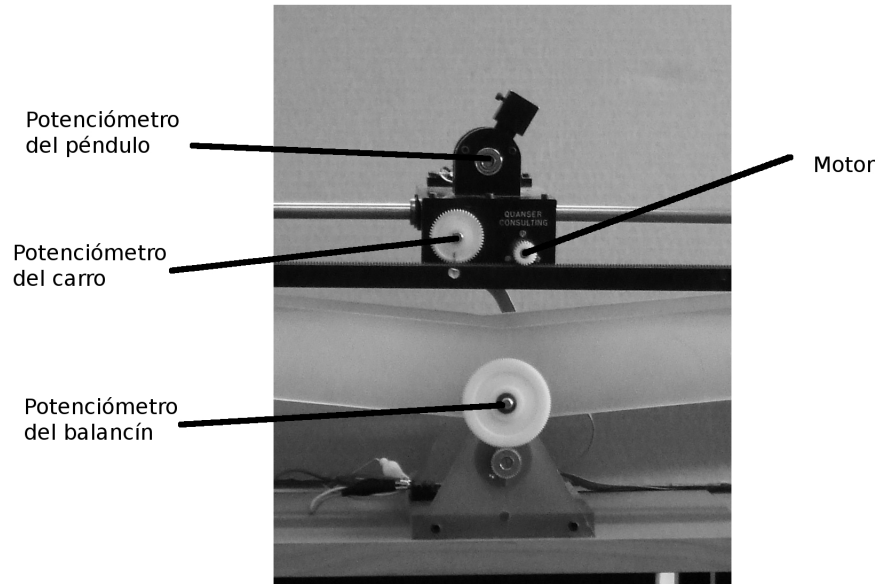


Figura 5.1: En la figura se muestran los potenciómetros y el motor

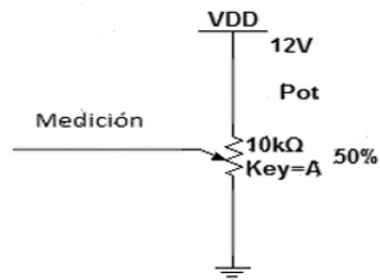


Figura 5.2: Conexión de los potenciómetros

## 5.2. LQR balancín

Al implementar de forma física el controlador diseñado en el capítulo anterior, se obtienen los resultados mostrados en las figuras 5.3 y 5.4. El sistema físico tiende a estabilizarse en el punto deseado, además es capaz de compensar

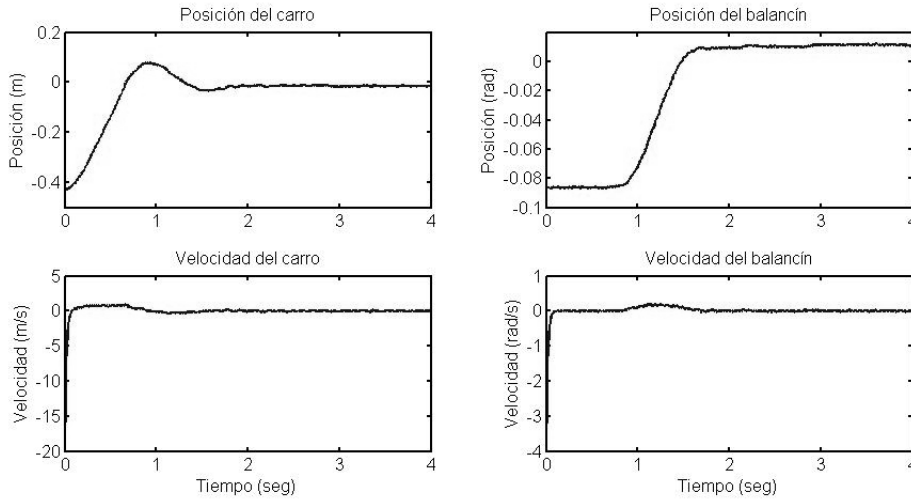


Figura 5.3: Comportamiento físico del sistema masa-balancín con un control LQR

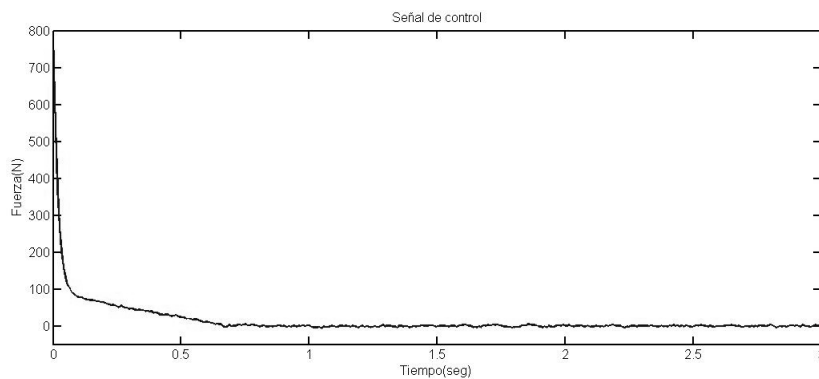


Figura 5.4: Señal de control para el sistema de masa-balancín

pequeñas fuerzas externas aplicadas sobre el riel balancín; los resultados muestran un error aproximado de  $0.02rad$  y de  $2cm$ , en las respectivas posiciones. A partir de lo observado se determina que el controlador cumple con la función de mantener al riel del balancín en una posición cercana a la línea paralela a la base de éste, siendo el objetivo principal del control implementado.

Los resultados experimentales muestran un sobrepaso importante en la señal de control, así como oscilaciones en la posición del carro. Lo anterior se debe a una ganancia alta en la posición del carro. No obstante, con la matriz  $Q$  elegida se consigue estabilizar al sistema aproximadamente en  $1.5seg$ , siendo este el

mejor tiempo obtenido.

### 5.3. Control difuso para el balancín

Para implementar de manera física el controlador difuso diseñado es necesario reducir el tiempo de procesamiento requerido para el sistema difuso. Esto se debe a que utilizar un bloque que evalúe el sistema en tiempo real con *Simulink*, consume demasiados recursos de cómputo, por lo que se forman tablas que contengan valores de salida correspondientes a combinaciones de valores de entrada. Se hace un mapeo en el cual se evalúan valores de salida ante distintos vectores de entrada, guardando los resultados en las tablas mencionadas; con éstas se realiza una interpolación lineal, la cual reduce el tiempo de procesamiento brindando un valor casi idéntico al del controlador difuso. Lo anterior logra reducir el tiempo necesario de  $14ms$  a  $10ms$  por muestra.

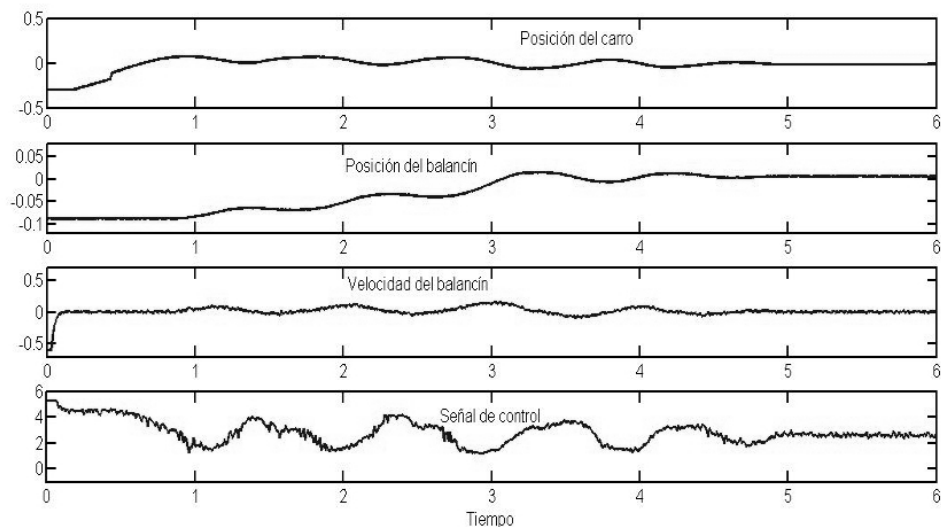


Figura 5.5: Comportamiento de los estados y de la señal de control para el sistema masa-balancín controlado por métodos difusos

El desempeño del sistema se muestra en la figura 5.5, donde se observa que el sistema en comparación con el controlador lineal, tarda más tiempo en llegar al punto deseado, no presenta tantas oscilaciones y el gasto energético es considerablemente menor. De lo anterior se concluye que el controlador difuso cumple con el objetivo de mantener al riel del balancín en una posición cercana a la línea paralela a la base de éste, presentando un error menor al del controlador lineal con ganancias menores y siendo capaz de compensar fuerzas externas

aplicadas al riel del balancín.

## 5.4. LQR péndulo

Al implementar de forma física el controlador lineal para el péndulo invertido se tienen los resultados mostrados en las figuras 5.6 y 5.7. De los datos obtenidos se observa que los estados del sistema, principalmente las posiciones, presentan importantes oscilaciones; además de lo anterior el carro no logra llegar al punto deseado. No obstante, el controlador cumple con su principal función que es mantener en una posición vertical a la barra, siendo capaz de compensar pequeñas fuerzas externas aplicadas a ésta.

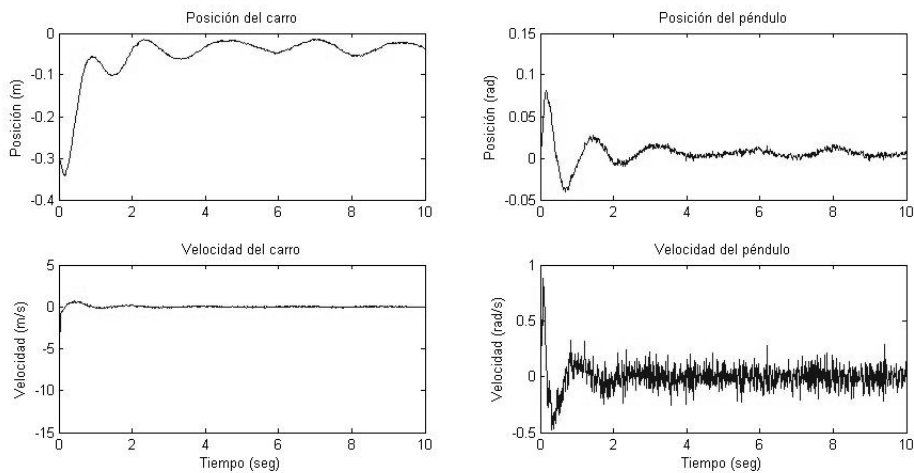


Figura 5.6: Comportamiento de los estados del sistema de péndulo invertido

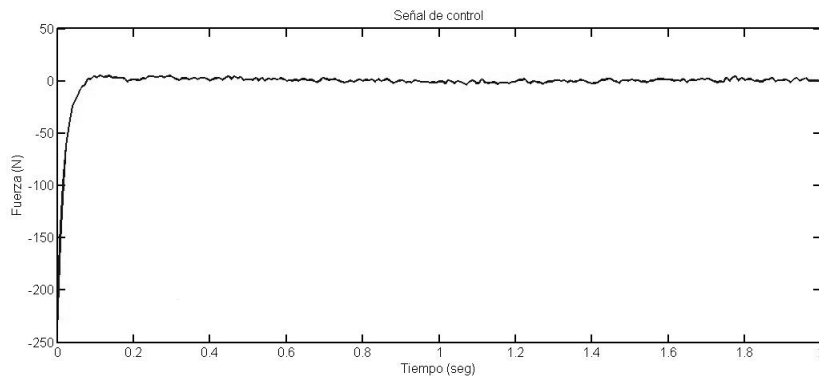


Figura 5.7: Señal de control para el sistema de péndulo invertido

Al igual que en el caso del balancín, la señal de control presenta un sobrepaso grande, resultado de una ganancia alta. Sin embargo, esta ganancia es necesaria para que el controlador responda rápidamente. Respecto a las oscilaciones en la posición del carro, el aumentar el peso de este estado resulta en oscilaciones mucho mayores; mientras que el decrementarlo, hace que el error de convergencia sea mayor.

## 5.5. Control difuso para el péndulo invertido

Para implementar el controlador difuso en forma física, debe realizarse una interpolación multilínea de una manera muy similar a la realizada en la sección 5.3, con el fin de requerir menor tiempo de procesamiento para cada muestra.

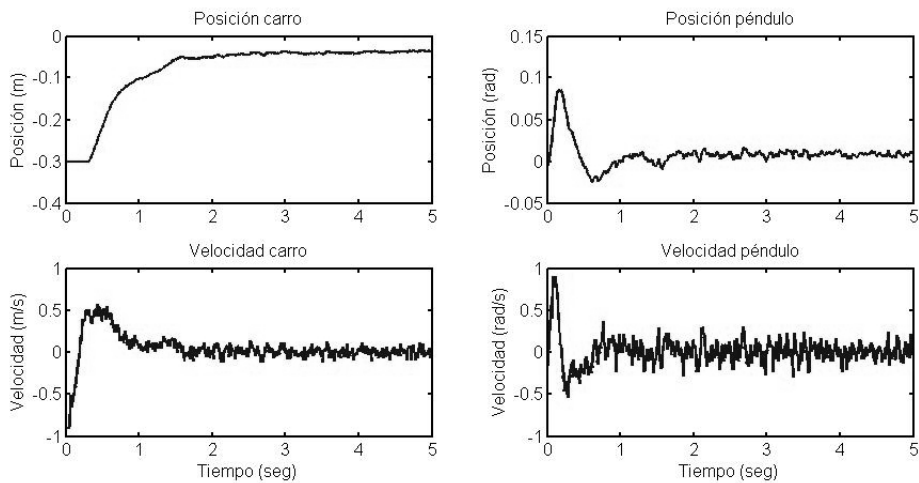


Figura 5.8: Comportamiento de los estados del sistema de péndulo invertido

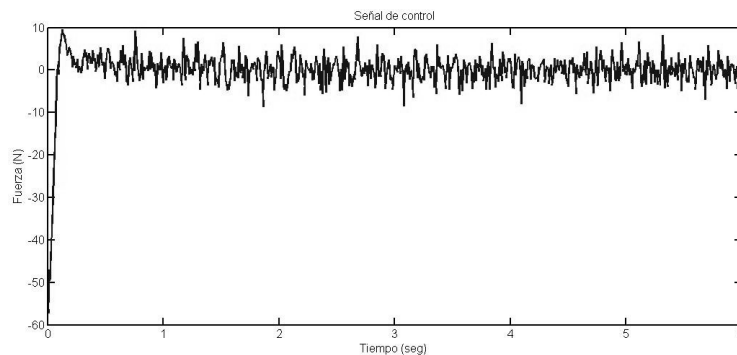


Figura 5.9: Señal de control para el sistema de péndulo invertido

Las figuras 5.8 y 5.9 muestran los resultados obtenidos de las pruebas físicas, en donde se observa que el sistema tiende a estabilizarse en el punto deseado, presentando pequeñas oscilaciones y un error cercano a los  $3cm$  en la posición del carro. El sistema no se estabiliza por completo, sin embargo evita que la barra del péndulo caiga aún ante fuerzas externas aplicadas a ésta.

Haciendo una comparación entre este controlador y el lineal, se hacen varias observaciones, por ejemplo, este controlador tiene una respuesta más rápida que el lineal; así mismo cuando se comparan las señales de control, se encuentra un sobrepaso menor en este controlador, pero se pueden notar oscilaciones mayores en su señal de control. La diferencia más significativa se encuentra en el estado de la posición del carro, para el caso de este controlador las oscilaciones son mucho menores, además de reducir el error.

