

# Capítulo 1

## Introducción

En esta tesis se presentan diversos diseños de controladores difusos y lineales para los sistemas de balancín y péndulo invertido. Para obtener los modelos matemáticos de estos sistemas se utilizan las ecuaciones de equilibrio de fuerzas; por su parte, para la obtención del modelo matemático del péndulo invertido sobre el balancín, se hace uso del método de Euler-Lagrange. Para cada sistema estudiado se diseñan dos tipos de controladores distintos. En el primer caso (controlador LQR) es necesario realizar la linealización de los modelos en torno a un punto de equilibrio. Por otro lado, el diseño de los controladores difusos, se obtiene a partir de observaciones y conocimientos empíricos de los sistemas.

Los controladores diseñados se utilizan para simulaciones y, posteriormente implementaciones físicas. Con los datos obtenidos en este trabajo, se comparan las técnicas de control utilizadas.

## Objetivos

Esta tesis tiene como objetivo analizar, diseñar e implementar controladores para sistemas mecánicos subactuados con punto de equilibrio inestable. Para lo cual se emplea la técnica de control lineal denominada LQR, así como técnicas de control difuso, para los sistemas de péndulo invertido y balancín. De esta manera se pretende observar ventajas y desventajas que ofrece cada técnica de control, con base en el siguiente criterio de comparación:

- Sobrepasso
- Tiempo de asentamiento
- Consumo energético
- Saturación
- Tiempo de procesamiento

Posteriormente se pretende diseñar un controlador no lineal, de tipo difuso, que sea capaz de estabilizar al sistema de péndulo invertido con balancín.

## Justificación

Los sistemas utilizados en esta tesis, el péndulo invertido y el balancín, cuentan con características de interés en el área de control, por ejemplo su modelo es no lineal, son sistemas subactuados y cuentan con puntos de equilibrio inestables, por lo que son comunes en el área académica. Se elige la técnica de control LQR, debido a que los modelos matemáticos de los sistemas se pueden linealizar de una manera sencilla por medio de herramientas de cómputo, lo mismo ocurre al momento de sintonizar los controladores. Mientras que los controladores difusos resultan atractivos debido a que no se requiere un modelo matemático del sistema, restando importancia a parámetros desconocidos de éstos.

Por su parte se ha elegido el criterio de comparación mencionado, para conocer ventajas y desventajas que presenta cada técnica de control, en cuanto, al desempeño de los controladores implementados de forma física.

El sistema de péndulo-carro-balancín además de presentar las características de los sistemas anteriores, presenta un mayor reto al contar con un más variables y únicamente un actuador para controlarlas. Los tres sistemas ilustran principios fundamentales de control, teniendo semejanzas con robots bípedos y robots que escalan superficies.

## Antecedentes

Para el sistema de péndulo invertido existe una vasta bibliografía, tal es el caso de los trabajos [8, 14]. Se pueden encontrar diseños de controladores difusos para sistemas muy similares al péndulo invertido con el que se trabaja en esta tesis; combinaciones de un controlador difuso con un modo deslizante en [10], o incluso comparaciones entre un controlador difuso y alguna otra técnica de control en [11]. Por su parte, para el sistema de balancín se tiene como antecedente [3], en el cual se utiliza un controlador difuso en combinación con un LQR. Resulta conveniente retomar los trabajos anteriores ya que la manera en la que atacan el problema de control o el modelado de los sistemas resultan útiles para el desarrollo de la tesis.

Para obtener el modelo del sistema de péndulo-carro-balancín se tienen como antecedentes los trabajos [18, 19, 22]. Es posible observar en los tres artículos citados, la presencia de dos masas (carros), mientras que en este trabajo únicamente hay una; lo anterior ocasiona que el modelo sufra modificaciones, así mismo la manera de resolver el problema de control también es distinta, al considerar las implicaciones de la ausencia de la masa de contrapeso.

## Motivación

De antemano la teoría de los controladores difusos y la de los controladores LQR muestran características distintas, pudiendo esbozar ventajas de cada técnica para algunos problemas; no obstante, con el criterio de comparación que

se ha elegido, es posible encontrar ventajas en la implementación física de controladores para sistemas electromecánicos subactuados, particularmente de los estudiados en esta tesis. Lo anterior es de gran interés debido a que los sistemas electromecánicos subactuados, con características similares a las de los sistemas en estudio, son encontrados de manera frecuente en problemas reales de ingeniería.

En lo referente al sistema de péndulo-carro-balancín, se han utilizado controladores no lineales para atacar el problema de control [18, 19], en el caso del primero se utiliza una matriz de ganancia, que permanece constante, para controlar al sistema. Mientras que en el segundo se utiliza un control  $H_\infty$ , sin embargo, no se realiza la implementación física de éste. Por su parte en [22] se hace uso de un modelo lineal del sistema para implementar un controlador LQR. La novedad del presente trabajo es que el sistema sólo cuenta con una masa y se intenta controlar mediante técnicas distintas a las usadas en los trabajos mencionados.

## Resumen del trabajo

Esta tesis se divide en seis capítulos. El capítulo dos tiene como objetivo explicar cada una de las herramientas que se utilizan para el desarrollo del trabajo. En este capítulo de la tesis se dan definiciones importantes para las siguientes secciones.

En el capítulo tres se lleva a cabo el modelado de los sistemas de péndulo invertido y balancín; así como las observaciones necesarias para el diseño de los controladores respectivos.

Durante el capítulo cuatro se diseñan en forma teórica, posibles controladores para los sistemas con los cuales se trabaja, se presentan simulaciones y observaciones a partir de éstas.

En el capítulo cinco se implementan de manera física los controladores previamente diseñados, obteniendo resultados experimentales.

A lo largo del capítulo seis se analizan de los resultados experimentales y de las simulaciones de capítulos anteriores, se hacen observaciones y se obtienen las conclusiones del trabajo realizado. Se compara entre las diferentes técnicas utilizadas para el control de los sistemas, se justifican los resultados obtenidos y se plantean trabajos futuros.

## Logros

En este trabajo, se lograron implementar de manera física distintos controladores, para los sistemas de péndulo invertido y balancín. A partir de los resultados experimentales, se tienen elementos suficientes para hacer una comparación de acuerdo al criterio elegido, mostrando ventajas y desventajas de los controladores LQR y las técnicas de control difusas respectivamente, teniendo un panorama de cuándo y cómo se puede, utilizar cada una de estas técnicas

de control en forma práctica, en sistemas subactuados que presentan comportamientos no lineales e incertidumbres paramétricas.

Para el caso particular del sistema carro-péndulo-balancín, se logró diseñar un control LQR capaz de estabilizar al sistema en una pequeña región cercana al punto de equilibrio. Además, se hacen observaciones acerca de las limitantes físicas del sistema; que resultan importantes para trabajos futuros con éste.