



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



# **Control convexo basado en observador adaptable aplicado a un vehículo autónomo**

Protocolo que presenta

**Alejandro Alvarado Algarin**

Director de tesis:

**Dr. Francisco Ronay López Estrada**

Codirector de tesis: **Dr. Omar Hernández González**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

16/12/2021

# Contents

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
1.1	Introducción y antecedentes . . . . .	2
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.2.1	General . . . . .	3
1.2.2	Específicos . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>4</b>
2.1	Modelado no lineal . . . . .	6
2.2	Observadores de estados . . . . .	8
2.2.1	Observador Luenberger . . . . .	9
2.3	Modelo no lineal de un vehículo autónomo . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>14</b>
3.1	Metodología propuesta . . . . .	14
3.2	Impacto/beneficio . . . . .	16
3.3	Programa de actividades, calendarización y presupuesto . . . . .	16
3.4	Infraestructura requerida . . . . .	18

**Referencias**

**19**

**A Anexos**

**20**

\*

# Chapter 1

## Introducción

### Resumen

1/4 cuartilla

LA PORTADA HACERLA EN WORD E INCRUSTARLA. ES LO MÁS FÁCIL.

### 1.1 Introducción y antecedentes

3 cuartillas máximo

Introducción al problema de estudio que deberá considerar una revisión exhaustiva del estado del arte para demostrar el enfoque adecuado y pertinencia del trabajo de investigación. Reverenciar en formato adecuado APA, Harvard, IEEE. Para los de la línea de control es Harvard en IFAC style. Citas al autor o citas al trabajo.

Como se menciona en el trabajo de [Alma et al. \(2019\)](#), los observadores adaptables.... [Cita al trabajo](#). Algunas técnicas han demostrado amplia aplicabilidad tales como observadores lineales ([Bersani et al. 2019](#)), observadores convexos ([Martinez et al. 2021](#)), entre otros.-

## 1.2 Objetivos

1/2 cuartilla máximo

### 1.2.1 General

Design and implement a convex control system applied to a mobile robot whose non-measurable states and parameters will be estimated through an adaptive observer.

### 1.2.2 Específicos

- Make an extensive study of the mathematical structure of mobile robots systems.
- Rewrite the system's model with as nonlinear convex structure
- Develop an adaptive observer for the estimation of parameters and states of the system, such as the rolling resistance, and validate the estimation in a simulation.

# Chapter 2

## Marco teórico

3 a 7 cuartillas

NO ES UN GLOSARIO DE TÉRMINOS

Texto tomado de:

[www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n2/m4.html](http://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n2/m4.html)

El Marco teórico es el resultado de los dos primeros pasos de una investigación (la idea y planteamiento del problema), ya que una vez que se tiene claro que se va a investigar, es el “manos a la obra” de la investigación. Consiste en analizar y presentar las teorías que existen sobre el problema a investigar, también incluye los trabajos e investigaciones que existen y todos los antecedentes sobre lo que se va a desarrollar como investigación. El marco teórico se refiere a todas las fuentes de consulta teórica de que se puede disponer sobre el problema a investigar.

La función general del marco teórico es acondicionar la información científica que existe sobre lo que se va a investigar, para tener conocimiento científico nuevo, ya que nos sirve para: no cometer errores en nuestro estudio a desarrollar o a prevenirlos de ser posible, nos da guías de cómo hacer nuestro estudio o a dónde dirigirlo, nos da una clave o claves de referencia (marco de referencia) para ir interpretando los resultados que se vayan obteniendo en la investigación, nos ayuda a centrarnos en el problema estudiado y no desviarnos de él, nos ayuda a elaborar más adelante la hipótesis, nos ayudara a descubrir nuevo conocimiento científico. En general es de

donde se alimentara de información el inicio de la investigación para ir dándole forma a lo que pretendemos hacer.

Ahora en términos amplios comprende dos etapas, la primera, es revisar todas las fuentes de información antes mencionadas, pero sólo todo aquello que se relacione o sea útil para nuestra investigación (el tema) y se debe de extraer de manera cuidadosa las referencias que sean de utilidad para nuestros objetivos, solo lo más importante y actual; la segunda, se refiere a que el investigador debe de adoptar una postura u opinión propia sobre la teoría consultada (para el investigador adoptar una propia teoría) ,es decir, su propio punto de vista o como está abordando la información que maneja.

Si el investigador se sintiese confundido en el desarrollo de esta tercera fase debe inmediatamente acudir a sus preguntas de investigación que elaboro en la segunda fase de su proyecto ya que en el marco teórico es donde puede descubrir aspectos como, sólo existen esbozos de lo que se pretende estudiar y no trabajos formales, que existe mucho material de apoyo que ayudara a la investigación, que ya alguien estudio y desarrollo de manera completa lo que pretendes desarrollar, o que solo existe información empírica o histórica del tema, en fin, el marco teórico se puede decir coloquialmente que son trozos de información dispersos, que sólo el que investiga sabrá como acomodarlos.

No se debe de perder de vista que en el hacerse llegar de información para el proyecto se debe de jerarquizar la información, ya que ésta se clasifica de acuerdo a la fiabilidad, el sitio de donde se obtiene, como se obtiene y como fuentes de información se clasifican en primarias, secundarias y terciarias; por lo que entre ellas existen diferencias marcadas. Siempre un investigador en esta etapa debe tomar notas sobre las referencias ya que las fuentes son diversa como: Libros, revistas, periódicos, películas, seminarios, conferencias, entrevistas, tesis, documentos públicos o privados. Al final lo que se pretende en éste trabajo es tener una herramienta de utilidad para el investigador.

## 2.1 Modelado no lineal

El modelado matemático es la representación de las dinámicas del comportamiento de un sistema físico mediante ecuaciones y se construye a partir del conocimiento de los fenómenos que rigen al sistema o mediante experimentación (Burns 2001). En teoría de control, se suele trabajar preferentemente con sistemas lineales, ya que facilitan el diseño de controladores. Sin embargo, en la realidad a mayoría de sistemas físicos presentan no linealidades cuyas dinámicas se pierden en los sistemas linealizados. Pasar del estudio de sistemas lineales al estudio de sistemas no lineales surgen nuevas dificultades, porque muchas de las herramientas de análisis implementadas se vuelven más complejas, y el principio de superposición deja de ser válido. Por otro lado, el análisis de estabilidad ya no se generaliza al sistema como ocurre en los sistemas lineales en donde se especifican sobre algún punto de equilibrio debido a que los sistemas no lineales pueden tener más de un punto de equilibrio.

En la práctica se efectúan linealizaciones de sistemas no lineales en algún punto de equilibrio. Esto es válido en un gran número de sistemas y aplicaciones, pero es importante reconocer que esto no representa el comportamiento de manera global al sistema, solo lo hace para puntos cercanos al punto de operación.

### Ejemplo: Modelado de sistema no lineal

Considérese el ejemplo del péndulo de la Figura 2.1. Se considera una bola de masa  $m$  suspendida por un cable de longitud  $l$  sin masa; donde  $\theta$  representa el desplazamiento angular.

Si se efectúa un análisis aplicando la segunda ley de movimiento de Newton, se analizan las fuerzas que se aplican en la masa al final del péndulo siendo estas el peso de la bola en dirección  $F_g$  y se asume una resistencia al movimiento interpretada como una constante de fricción  $k$  que a su vez se considera proporcional a la velocidad  $\dot{\theta}$



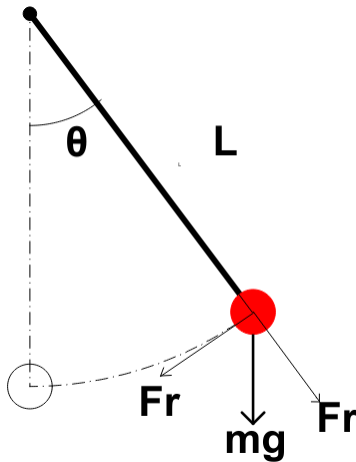


Figure 2.1: Diagrama de péndulo simple

$$ml\ddot{\theta} = -mg\sin\theta - kl\dot{\theta} \quad (2.1)$$

Para llevar la ecuación anterior al espacio de estados se realiza un cambio de variable:

$$x_1 = \theta$$

$$x_2 = \dot{\theta}$$

Posteriormente, se derivan las expresiones para obtener:

$$\dot{x}_1 = \dot{\theta} = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{\theta} = -\frac{g}{L}\sin x_1 - \frac{k}{m}x_2$$

Se calcula la matriz Jacobiana:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g}{L}\cos\theta & -\frac{k}{m} \end{bmatrix}$$

El sistema es linealizable en su punto de equilibrio, esto es, si se asume que el ángulo  $\theta$  al cual

oscila el péndulo es cercano a cero. el término  $x_2$  queda como

$$\dot{x}_2 = \ddot{\theta} = -\frac{g}{L}x_1$$

Por lo que el Jacobiano se vuelve únicamente:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{g}{l} & -\frac{g}{k} \end{bmatrix}$$

EL ejemplo ilustra proceso común de modelado de un sistema no lineal y su respectiva linealización sobre un punto de equilibrio. No obstante hay que recordar que la linealización respecto a un punto de equilibrio otorgará aproximaciones cada vez menos precisas conforme se aleje el sistema de dicho punto de equilibrio. En teoría mediante la aceleración es factible calcular la velocidad y posición del péndulo; sin embargo, debido al ruido que presentan los sensores el cálculo de las variables derivadas de la aceleración suele ser muy impreciso. Aunado al problema de instrumentación, se encuentra también el problema de parametrización, por ejemplo, los coeficientes de fricción no son fáciles de calcular y en este caso se tiene como resultado un modelo que no está calibrado adecuadamente. Por otro lado, si no se cuenta con un sensor adecuado porque su costo de implementación es excesivo en comparación con la aplicación deseada, o es directamente imposible de implementar o de medir el estado deseado, existe una herramienta que genera estimaciones de estados del sistema a partir del modelo del mismo, el observador de estados.

## 2.2 Observadores de estados

Un observador de estados es una herramienta matemática que combina las salidas y entradas de la planta con el modelo de la misma para obtener una estimación de sus estados. La implementación de un observador entrega una estimación asintótica al valor real del estado no medible. Antes de diseñar un observador se debe realizar un análisis de observabilidad. La observabilidad es una propiedad del sistema que indica si los estados internos del sistema pueden ser estimados a partir

de las salidas medibles del sistema. La matriz de observabilidad se define como:

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{np \times n} \quad (2.2)$$

Un sistema es observable si el rango, es decir, el número de filas linealmente independientes de la matriz de observabilidad es igual al número  $n$  de variables de estado. Una vez que la prueba de observabilidad resulta exitosa, se pasa al diseño del observador de estado.

### 2.2.1 Observador Luenberger

El observador de Luemberger, nombrado así por las aportaciones del Dr. David Gilbert Luenberger en su trabajo de disertación de doctorado ([Luenberger 1963](#)) es un estimador de estados, es decir, un algoritmo capaz de estimar los estados no medibles de un sistema lineal. Consiste en una réplica del modelo del sistema dinámico más una ganancia que múltipla el error de estimación. Para un sistema en espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

El observador Luenberger tiene la forma:

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.4)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (2.5)$$

Donde el símbolo de acento circunflejo indica estimación, se está obteniendo un valor aprox-

imado al verdadero, y el término  $L(y - \hat{y})$  es conocido como factor de corrección, el cual es la diferencia entre la salida estimada y la salida real. Idealmente, la diferencia entre la variable estimada y la variable en la realidad tiende asintóticamente a cero.

Partiendo del sistema en espacio de estados en 2.3 y del observador 2.4 se puede deducir que:

$$x - \hat{x} = (A - LC) \quad (2.6)$$

Por lo que el diseño del observador depende de la resolución de una desigualdad lineal matricial.

## 2.3 Modelo no lineal de un vehículo autónomo

La dinámica del vehículo depende de numerosas variables y se describe en gran medida por comportamientos no lineales.

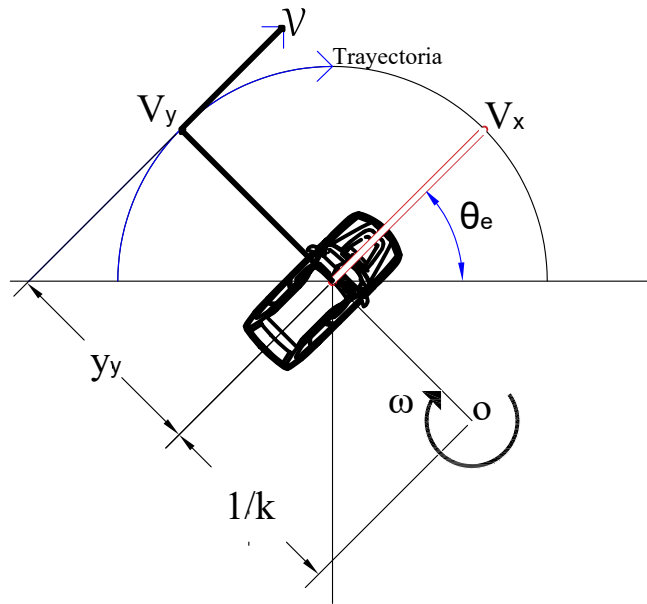


Figure 2.2: Dinámica del vehículo

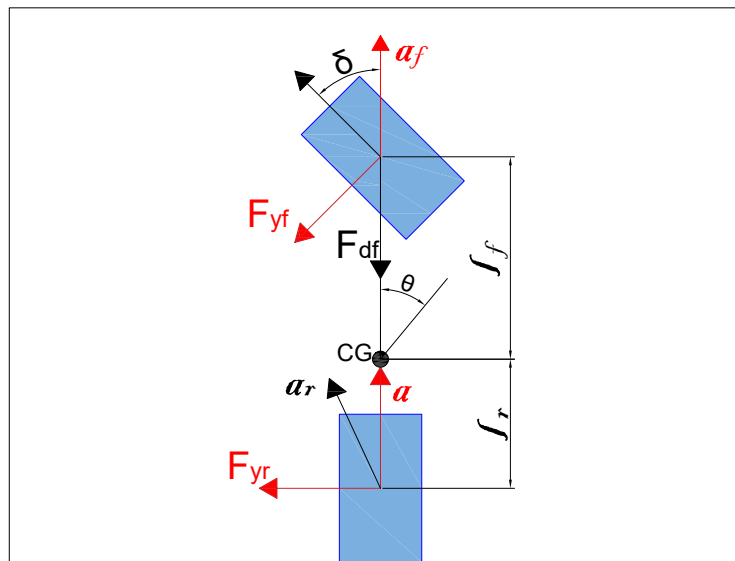


Figure 2.3: Dinámica de las ruedas del vehículo

Basándose en [Alma et al. \(2019\)](#) se puede observar el siguiente modelo para vehículo autónomo:

$$\begin{aligned}
\dot{v}_x &= a + -F_y \sin \delta - F_{df} + \omega v_y \\
\dot{v}_y &= \frac{F_{yf} \cos \delta + F_{yr}}{m} + \omega v_x \\
\dot{\omega} &= \frac{F_{yf} l_f \cos \delta - F_{yr} l_r}{I} \\
\dot{y}_e &= v_x \sin \theta_e + v_y \cos \theta_e \\
\dot{\theta}_e &= \omega - \frac{v_x \cos \theta_e - v_y \sin \theta_e}{1 - y_e k} \\
\alpha_f &= \delta - \tan^{-1} \left( \frac{v_y}{v_x} - \frac{l_f \omega}{v_x} \right) \\
\alpha_r &= -\tan^{-1} \left( \frac{v_y}{v_x} + \frac{l_r \omega}{v_x} \right) \\
F_{yf} &= C_f \alpha_f \\
F_{yr} &= C_r \alpha_r \\
F_{dj} &= \mu m g + \frac{1}{2} \rho C_{dA} V_x^2
\end{aligned}$$

En la tabla 2.1 se definen los términos de las ecuaciones involucradas en el sistema.

Los vectores de estados y entradas están definidas como:

$$x = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} \delta \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Tabla 2.1: Nomenclatura de las variables

---

$m$	Masa del vehículo
$g$	Constante gravitacional
$a_f$	Aceleración longitudinal del vehículo
$v_x$	Velocidad longitudinal del vehículo
$v_y$	Velocidad lateral del vehículo
$\dot{v}_x$	Aceleración longitudinal del vehículo
$\dot{v}_y$	Aceleración lateral del vehículo
$a_r$	Aceleración longitudinal del vehículo
$a_f$	Aceleración longitudinal del vehículo
$\omega$	Velocidad angular de la llanta
$\dot{\omega}$	Aceleración angular de la llanta
$a_f, a_r$	Aceleración longitudinal de la llanta
$F_{yr}, F_{yf}$	Fuerzas laterales de cada llanta
$a_f$	Aceleración longitudinal del vehículo
$l_r$	Distancia entre llanta trasera y centro de gravedad
$l_f$	Distancia entre llanta delantera y centro de gravedad
$\sigma$	Ángulo de giro de la llanta
$\mu$	Coefficiente de fricción estático
$\rho$	Densidad del aire a 25 °C
$C_{dA}$	Producto del coeficiente. de arrastre y el área de la sección transversal del vehículo

# Chapter 3

## Metodología

### 3.1 Metodología propuesta

#### UNA CUARTILLA y media

La metodología respalda los resultados explicando las técnicas de investigación y proporcionando una hoja de ruta para llegar a las conclusiones. Una metodología eficaz y bien redactada describe las tácticas utilizadas, explica por qué los métodos elegidos y cómo éstos conducen directamente a las respuestas a las preguntas planteadas en la investigación. **NO ES UNA LISTA DEL SUPER, en cada sección deben indicarse lo que se planea hacer, como se realizará, que resultados se esperan obtener en cada fase.** El siguiente es un ejemplo de metodología, la organización y escritura final dependerá de su director de tesis.

**Fase 1: Studying and compiling of information:** This step will be focused on the research from articles and published works with the intent of recompiling information regarding the mathematical nonlinear modeling of the mobile robot in order to understand its dynamics. During this step, the design and the implementation of the electronic instrumentation of the robot will take place. This step is crucial, as it is the basis of the entire project, and the correct instrumentation will allow for a better estimation by the subsequent observer design.



**Fase 2: Convex modeling:**

This step will be dedicated to the study of nonlinear convex modeling techniques, LPV and Takegi-Sugeno with the goal of determining the most appropriate approach in developing a convex method that provides the controllability and observability requirements for the design of the controller and the observer respectively. This step will take in consideration the parameters found in the literature. At the end of this step there will be a convex model of the mobile robot system.

**Fase 3: Observer design:** Because there are some parameters of the system that are not directly measurable, for example, the friction coefficient, as well as some states under the same context, like the position of the robot, a strategy for estimation of such states and parameters is required in order to provide the adequate feedback to the controllers. In this step, knowledge of all the system states will be required, so the main effort will be focused on designing a convex adaptive observer. The validation of the estimation will be performed through an IR optitrack camera system available in the institution. At the end of this step, the virtual sensor (adaptive observer) will be ready for the subsequent implementation of the control system.

**Fase 4 Implementation and estimation of the controller:** This step consists of the implementation of a controller. The objective is to be able to estimate the positions of the system and validate such results, considering an embedded system for the programming of the measurement algorithms. A mobile robot with autonomous capacities is the expected product of this step, a system capable of following reference trajectories considering some available sensors and estimating the non-measurable states through the adaptive observer. This prototype will open the opportunity to develop advanced control systems, or new research works, therefore one must make a remark on the importance of this project.

**Fase 5 Data analysis:** This final step will consist of a statistical analysis of the results with the end goal of quantifying the estimation index, convergence times, the robustness of the prototype and its performance. Finally, these results will be redacted into a final thesis report and a scientific article is expected to be written.

## **3.2 Impacto/beneficio**

1/2 cuartilla

## **3.3 Programa de actividades, calendarización y presupuesto**

dos cuartilla máximo

Tabla 3.1: Cronograma de actividades

#	Actividad	Periodo de realización	Entregable	Presupuesto
1	Revisión extensa del estado del arte sobre vehículos aéreos no tripulados, sistemas de detección de fallas y sistemas de control tolerante a fallas de sistemas convexos.	Septiembre- Noviembre 2021	Reporte del Estado del arte	\$0.0
	Se trabajará en el desarrollo del sistema de diagnóstico de fallos mediante observadores de estado, considerando banco de observadores y un enfoque de tipo descriptor. En esta fase también se espera que esté terminada la instrumentación de los casos de estudio, el cual contará con un sistema de adquisición de datos conectados a MATLAB o LABVIEW.			\$15,000,00 Adquisición de material eléctrico tales como sensores, motores de cd, una DAQ para la instrumentación
	Diseño del Sistema de control tolerante a fallas activo basado en un banco de observadores y controladores convexos			
	Escritura de artículo científico y reportes técnicos del proyecto			
	Implementación del sistema de control tolerante a fallas en los prototipos desarrollados.			
	Análisis estadístico de resultados para determinar la reproductibilidad de los algoritmos desarrollados.			
	Escritura de artículo JCR y presentación de exámenes de grado de los alumnos involucrados			

## 3.4 Infraestructura requerida

Máximo una cuartilla

# Bibliography

Alma, M. D. M., Pérez-Estrada, A., Osorio-Gordillo, G., Darouach, M. & Alma, M. (2019), ‘Adaptive observer design for lpv systems’.

Bersani, M., Vignati, M., Mentasti, S., Arrigoni, S. & Cheli, F. (2019), Vehicle state estimation based on kalman filters, *in* ‘2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)’, IEEE, pp. 1–6.

Burns, R. (2001), *Advanced control engineering*, Elsevier.

Luenberger, D. G. (1963), *Determining the state of a linear system with observers of low dynamic order*, Stanford University.

Martinez, J., Aguiar, B., Estrada-Manzo, V. & Bernal, M. (2021), ‘Actuator fault detection for discrete-time descriptor systems via a convex unknown input observer with unknown scheduling variables’, *Mathematical Problems in Engineering* **2021**.

# **Appendix A**

## **Anexos**

INCLUIR SOLO EN CASO DE SER NECESARIOS. INFORMACIÓN ADICIONA QUE NO NECESARIAMENTE SERÁ REVISADA, PERO COMPLEMENTA EL REPORTE.