

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

ESCUELA DE POSGRADO



TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

CON MENCIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN

Algoritmo LQR en un entorno de simulación Matlab/Simulink para mejorar la respuesta de la suspensión de un robot móvil aplicable en fundos agrícolas de la región La Libertad-Perú

Área de investigación:

Sistemas Inteligentes

Autor:

Br. Bazán Quispe, Jheremy André

Jurado Evaluador:

Presidente: Urrelo Huiman, Luis Vladimir

Secretario: Lazo Aguirre, Walter Aurelio

Vocal: Cerna Sanchez, Eduardo Elmer

Asesor:

Dr. Prado Gardini, Sixto Ricardo

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9135-2663>

TRUJILLO - PERÚ

2024

Fecha de Sustentación: 06/09/2024

Algoritmo LQR en un entorno de simulación Matlab/Simulink para mejorar la respuesta de la suspensión de un robot móvil aplicable en fundos agrícolas de la región La Libertad-Perú

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	cris.usil.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	ijassa.ipu.ru Fuente de Internet	1%
5	Jheremy Andre Bazan Quispe, Ricardo Jesus Huaman Kemper, Sixto Ricardo Prado Gardini. "Linear Quadratic Regulator (LQR) Control for the Active Suspension System of a Four-Wheeled Agricultural Robot", 2023 IEEE XXX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 2023 Publicación	1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

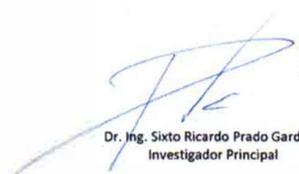
Apagado

Declaración de originalidad

Yo, SIXTO RICARDO PRADO GARDINI, docente del Programa de Estudio Ing. Electrónica, de la Universidad Privada Antenor Orrego, asesor de la tesis de investigación titulada "ALGORITMO LQR EN UN ENTORNO DE SIMULACIÓN MATLAB/ SIMULINK PARA MEJORAR LA RESPUESTA DE LA SUSPENSIÓN DE UN ROBOT MÓVIL APLICABLE EN FUNDOS AGRÍCOLAS DE LA REGIÓN LA LIBERTAD-PERÚ", autor Jheremy André Bazán Quispe, dejo constancia de lo siguiente:

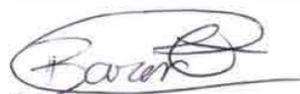
- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 6%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el (12 de noviembre del 2024).
- He revisado con detalle dicho reporte y la tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las normas establecidas por la Universidad.

Lugar y fecha: 12/11/2024


Dr. Ing. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal

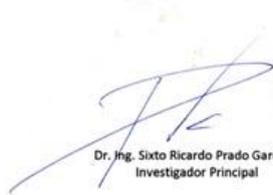


Prado Gardini Sixto Ricardo
DNI: 18099692
ORCID 0000-0002-9135-2663
FIRMA


Jheremy André Bazán Quispe
DNI: 70545552
FIRMA:

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi querida familia y amigos por su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.



Dr. Jhg. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal



AGRADECIMIENTO

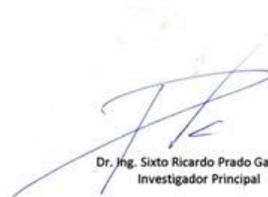
Agradezco a Dios y mi familia por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

Al Dr. Ing. Ricardo Prado, por su valiosa guía y asesoramiento a la realización de la misma.

Jheremy Bazán Quispe reconoce el apoyo financiero del Proyecto Concytec Banco Mundial para el desarrollo de la presente investigación, a través de su unidad ejecutora Pro CIENCIA y del proyecto 171-2020- FONDECYT “Desarrollo de un sistema robótico auto localizable con capacidad de mapeo de su entorno y procesamiento mediante inteligencia artificial para mejorar la exactitud de las proyecciones agrícolas de arándanos en agroindustrias de la Región La Libertad-Perú”.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

Jheremy Bazán Quispe


Dr. Ing. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal



RESUMEN

La presente investigación desarrolla un algoritmo LQR (Regulador Cuadrático Lineal) en el entorno de MATLAB/Simulink para simular el control de la suspensión activa de un robot móvil aplicable a fundos agrícolas de la región La Libertad. El algoritmo LQR tiene como propósito mejorar la respuesta de la suspensión activa del robot con respecto a uno de suspensión pasiva en el escenario de mantener el contacto llantas-suelo sin afectar el confort del movimiento. La metodología planteada en esta investigación asocia cuantitativamente los ángulos de cabeceo y balanceo (roll y pitch) del robot móvil. Es decir, el algoritmo LQR gobierna la suspensión activa tal que se obtienen valores de los ángulos de balanceo y cabeceo asociados a poses o reconfiguraciones del robot móvil que aseguren (dentro de un rango permitido) el contacto llanta-suelo sin afectar el confort. Finalmente, se presentan los resultados de la validación del trabajo en un entorno virtual configurable para emular las características propias de diferentes terrenos agrícolas tanto en textura, fricción e irregularidades.

Por el Br. Jheremy André Bazán Quispe

Palabras clave: LQR, MATLAB/Simulink, Suspensión activa, roll, pitch.

ABSTRACT

The present research develops an LQR (Linear Quadratic Regulator) algorithm in the MATLAB/Simulink environment to simulate the control of the active suspension of a mobile robot applicable to agricultural beds in the La Libertad region. The purpose of the LQR algorithm is to improve the response of the active suspension of the robot with respect to a passive suspension in the scenario of maintaining tire-ground contact without affecting the comfort of movement. The methodology proposed in this research quantitatively associates the pitch and roll angles (roll and pitch) of the mobile robot. That is, the LQR algorithm governs the active suspension such that values of the roll and pitch angles associated with poses or reconfigurations of the mobile robot are obtained that ensure (within a permitted range) tire-ground contact without affecting comfort. Finally, the results of the validation of the work are presented in a configurable virtual environment to emulate the characteristics of different agricultural lands in terms of texture, friction and irregularities.

By Br. Jheremy André Bazán Quispe

Keywords: *LQR, MATLAB/Simulink, Active suspension, roll, pitch.*

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO I: INTRODUCCION.....	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. ANTECEDENTES	16
2.2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	24
CAPÍTULO III: METODOLOGIA	27
3.1. POBLACIÓN	27
3.2. MUESTRA	27
3.3. UNIDAD DE ANÁLISIS:.....	27
3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	27
3.7. DISEÑO DE CONTRASTACIÓN	29
3.8. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	29
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	31
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	51
CONCLUSIONES.....	53
RECOMENDACIONES.....	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	60
ANEXO 1	61
ANEXO 2	62
ANEXO 3	63
ANEXO 4	65

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ENTORNO DE PROGRAMACIÓN DE BLOQUES – SIMULINK.	18
FIGURA 2: CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SUSPENSIÓN.	19
FIGURA 3: MODELO DE VEHÍCULO COMPLETO DE 4 RUEDAS.	20
FIGURA 4: DIVISIÓN DE MECANISMOS PARA SUSPENSIÓN ACTIVA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD.	31
FIGURA 5: MODELO DEL MECANISMO 1 DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA.	32
FIGURA 6: <i>GRAFICA DE LA RELACIÓN ENTRE AB vs θ</i>	34
FIGURA 7: MODELAMIENTO DEL MECANISMO 2 DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA DE 6 BARRAS.	34
FIGURA 8: MECANISMO 2 DE 6 BARRAS EN CONFIGURACIÓN DE 2 LAZOS VECTORIALES CERRADOS.	35
FIGURA 9: RELACIÓN ENTRE LONGITUD DEL ACTUADOR LINEAL (CM), CON LA ALTURA DEL ROBOT (CM).	37
FIGURA 10: RELACIÓN ENTRE LONGITUD DEL ACTUADOR LINEAL (L) EN CM, CON LA MITAD DE LA DISTANCIA ENTRE RUEDAS EN CM.	37
FIGURA 11: RESPUESTA DEL SISTEMA PASIVO AL APLICAR EL COMANDO STEP.	40
FIGURA 12: RESPUESTA DEL SISTEMA CON SUSPENSIÓN ACTIVA CONTROL LQR AL APLICAR COMANDO STEP.	41
FIGURA 13: DIAGRAMA DE SISTEMA EN SIMULINK.	42
FIGURA 14: ENTORNO DE SIMULACIÓN ESCENARIO 1, CON MONTÍCULOS.	43
FIGURA 15: PERFIL DE CARRETERA 1 PARA LAS 4 RUEDAS EN LA SIMULACIÓN DEL ESCENARIO 1.	43
FIGURA 16: ANGULO DE BALANCEO EN SUSPENSIÓN PASIVA Y EN SUSPENSIÓN ACTIVA EN SIMULACIÓN 1.	44
FIGURA 17: ANGULO DE CABECEO EN SUSPENSIÓN PASIVA VS ACTIVA, PARA SIMULACIÓN 1.	45
FIGURA 18: DESPLAZAMIENTO DE ZC PARA SUSPENSIÓN PASIVA Y ACTIVA, SIMULACIÓN 1.	45
FIGURA 19: ENTORNO DE SIMULACIÓN 2, CON DESNIVELES TIPO HUECOS O BACHES.	46
FIGURA 20: PERFIL DE CARRETERA PARA LAS 4 RUEDAS EN SIMULACIÓN 2.	47
FIGURA 21: ANGULO DE BALANCEO PARA SUSPENSIÓN PASIVA VS ACTIVA, SIMULACIÓN 2.	48
FIGURA 22: ANGULO DE CABECEO PARA SUSPENSIÓN PASIVA VS ACTIVA, SIMULACIÓN 2.	48
FIGURA 23: DESPLAZAMIENTO DE ZC PARA SUSPENSIÓN PASIVA VS ACTIVA, SIMULACIÓN 2.	49

ÍNDICE DE TABLAS

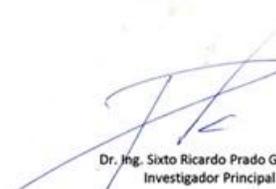
TABLA 1	27
TABLA 2	28
TABLA 3	28
TABLA 4	40
TABLA 5	46
TABLA 6	52
TABLA 7	52

CAPÍTULO I

INTRODUCCION

*“La educación es el arma más poderosa que puedes usar
para cambiar el mundo”*

Nelson Mandela.



Dr. Ing. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal

CAPÍTULO I: INTRODUCCION

Los robots móviles terrestres son en la actualidad los robots de servicios más populares en el mundo, se los puede ver en aplicaciones domésticas, urbanas, industriales, agroindustriales y en defensa (Raj y Kos, 2022). La creciente aplicación de los robots móviles dentro de las actividades previamente mencionadas, se debe a que presentan (en comparación a la actividad humana) una mayor precisión, eficiencia, repetibilidad y velocidad. Además mantienen estas prestaciones técnicas en actividades consideradas como complejas, repetitivas y peligrosas (Benalcazar, 2022).

Por otro lado, en la última década, en la industria y en especial en la agroindustria a nivel mundial se ha incrementado el nivel de automatización y robotización en sus diferentes fases productivas a fin de mejorar la eficiencia en el uso de los insumos, así como maximizar el rendimiento agrícola, todo ello sin afectar el medio ambiente. En ese contexto, actualmente es muy frecuente observar dispositivos robóticos móviles y maquinas automatizadas en los fundos agrícolas de los países desarrollados como elementos colaboradores al recurso humano. Esta dinámica de actuación proyecta un crecimiento exponencial de la robótica en la agroindustria, desde los 60.000 robots comercializados en el 2008 a más de 700.000 que se prevé vender en el año 2025 (Council for Agricultural Science and Technology, 2020).

En este contexto, una de las aplicaciones que más impulso ha tenido en estos últimos años (especialmente en agricultura) es la navegación autónoma de robots móviles. Este es un proceso de múltiples tareas e integración de diversos conocimientos dado que en general debe desplazarse en entornos no estructurados (obstáculos y desniveles inesperados). Por lo cual es importante desarrollar robots con capacidad de realizar monitoreo y mapeo local, movilización autónoma y estabilización para evitar volcaduras y cumplir exitosamente con las tareas programadas (Ponce, 2021).

El desplazarse sobre terrenos genera cambios en la posición y orientación del robot, estos cambios son directamente proporcionales a las variaciones en los ángulos de balanceo y cabeceo (roll y pitch) del robot. Sin embargo, si los cambios en posición y orientación son bruscos entonces la precisión del trabajo del robot puede ser afectada al incrementarse el error

entre la trayectoria planificada y la trayectoria real, así como un aumento del consumo energético (Xinhuai et al., 2020). Adicionalmente, la irregularidad del terreno puede hacer perder el contacto llanta-suelo generando inestabilidad en el vehículo, pérdida temporal de la fuerza de arrastre de la rueda, contactos bruscos o rebotes afectando con ello la parte mecánica de la suspensión y dañando los actuadores (Ni et al., 2020). Encontrar una alternativa que minimice los efectos negativos (sobre los robots móviles) de transitar por terrenos irregulares o no estructurados se hace necesario para asegurar un movimiento estable de un robot móvil con aplicaciones agrícolas.

Las aplicaciones de robots móviles a nivel nacional, se realizan dentro de ambientes controlados, con terrenos o suelos que no presentan notorias irregularidades y por lo tanto no cuentan con un sistema de suspensión efectivo. Por ejemplo, el robot móvil con ruedas mecánicas desarrollado por Andy Reque (Reque et al., 2021) para la desinfección del Covid 19 se aplica en ambientes interiores altamente controlados y de pisos muy regulares y suaves lo que no exige tener un sistema de suspensión. También, en la publicación de José Cornejo (Cornejo et al., 2022) simularon con Matlab y Solidworks un Robot Agrícola Cartesiano-Paralelo Tripteron Montado en Plataforma Móvil de 4 Ruedas sembrador de semillas para invernaderos en el cusco, que por las características del terreno no requería suspensión ni activa ni pasiva.

En el norte del Perú, la agroindustria del arándano ha presentado un crecimiento exponencial en los últimos años incrementando su volumen de producción en 495% desde el 2016 hasta el 2021 (Crisologo Salazar et al., 2021). El Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA), considera a la región La Libertad como líder agroexportador de arándanos con 7580 hectáreas dedicadas a su cultivo y 17 plantas de procesamiento del mismo fruto (SENASA, 2021).

Una de las tareas más importantes en la producción del arándano es la Proyección Agrícola anual del Arándano, que es un proceso por el cual se trata de predecir las etapas tróficas y productivas de los arándanos para un período de un año. Si estas proyecciones no coinciden con la realidad, afectará los rendimientos del arándano y aumentará el costo de todo el proceso de producción (personal empleado en el campo, transporte de personal, materiales para la cosecha, transporte de carga al sitio de producción), capacidad de producción, plan de negocios,

logística de exportación, etc.). Cuanto mayor sea la diferencia entre lo proyectado y lo real, mayor será el impacto negativo en la producción y los costos de arándanos.

El uso de tecnología se presenta como una alternativa para mejorar la precisión de las proyecciones. En ese sentido en la Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO) específicamente en el Laboratorio de Investigación Multidisciplinaria (LABINM) línea robótica se desarrolla un robot móvil con capacidad de navegación autónoma por fondo agrícola a fin de ejecutar técnicas de muestro para las Proyecciones Agrícolas Anuales del Arándano. Sin embargo, se debe considerar que los fundos agrícolas de la región La Libertad son muy diferentes entre sí dependiendo mucho de si se encuentran próximos o no a la costa. Por lo que, se considera que los fundos agrícolas son terrenos irregulares y que presentan muchas variaciones para lo cual se requiere aplicar una estrategia de control que asegure la estabilidad del vehículo en su desplazamiento por fundos agrícolas. Esta estrategia de control requiere leyes de control eficientes para lograr reducir el error entre el trabajo deseado y el que realmente se alcanza, minimizando a su vez el consumo de recursos computacionales en su implementación. En esa línea, el control LQR (en inglés, Linear Quadratic Regulator), aborda el problema de regulación optimizando un índice cuadrático mediante una solución lineal. Es decir, minimiza una función cuadrática o índice de coste a fin de reducir el error, en un periodo de tiempo previamente definido. Por lo tanto, proporciona una solución óptima (William Honorio, 2022).

Lo expuesto anteriormente, conlleva a formular el siguiente problema: **¿En qué medida el desarrollo de un algoritmo de Control LQR en un entorno de simulación MATLAB/SIMULINK mejora la respuesta de la suspensión de un robot móvil aplicable en fundos agrícolas de la región La Libertad-Perú?**, y proponer como objetivo principal “Desarrollar un algoritmo de control LQR en un entorno de simulación MATLAB/ SIMULINK para mejorar la respuesta de la suspensión de un robot móvil aplicable en fundo agrícola de la Región La Libertad-Perú”, el cual se fracciona en los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el modelo cinemático del robot móvil con suspensión activa para identificar los estados del robot en el algoritmo de control.
- Implementar el algoritmo LQR en Matlab teniendo como base el modelo cinemático desarrollado a fin de controlar la suspensión activa.

- Simular el sistema de control con el modelo matemático obtenido utilizando el software Simulink.
- Realizar el análisis comparativo entre el comportamiento de una suspensión pasiva la suspensión activa con control LQR.

Aquí se plantea la siguiente hipótesis “El desarrollo de un algoritmo de Control LQR en un entorno de simulación MATLAB/SIMULINK, mejorara la respuesta de la suspensión de un robot móvil aplicable en fundos agrícolas de la región La Libertad-Perú”.

El desarrollo del presente trabajo de tesis “Algoritmo LQR en un entorno de simulación MATLAB/SIMULINK para mejorar la respuesta de la Suspensión de un Robot Móvil aplicable en Fundos Agrícolas de la región La Libertad-Perú”, tiene como justificación los siguientes criterios:

Conveniencia: Mantener la estabilidad del Robot Móvil, presentará beneficios en el movimiento del robot, para mantener mucho más firme la plataforma superior del vehículo, y poder realizar mediciones por medio de los sensores mucho más exactas. Permitirá que la cámara tome imágenes mucho mejor enfocadas, para su posterior procesamiento.

Relevancia social: El robot en conjunto, permitirá que los fundos agrícolas realicen las proyecciones de producción de los arándanos mucho más precisas. De esa manera, se generarán los puestos de trabajo necesarios para la recolección, procesamiento y embalaje de los arándanos producidos en La Libertad.

Implicaciones prácticas: El uso del Algoritmo LQR para el control de la suspensión activa permitirá mantener la estabilidad del movimiento en terrenos irregulares, como pueden ser dentro del Sector Agrícola. De igual manera dicho control para suspensiones activas, pueden ser usadas para automóviles, brindando mayor confort para los ocupantes, y mejorar la estabilidad durante los giros o desniveles pronunciados manteniendo las ruedas sujetas al suelo.

Valor teórico: La presente investigación, permitirá tener una visión adicional sobre los sistemas de suspensión activa dentro de los vehículos a nivel nacional. Que podrán ser

aplicables a robots móviles de exploración o rescate, y con mayor implicancia para el Perú, que presenta distintos tipos de terrenos y con muchas distribuciones.

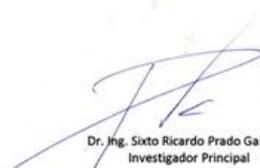
El presente trabajo de tesis comprende los siguientes capítulos: El capítulo 1 es la Introducción, donde se detalla la relevancia del proyecto de investigación y se define la problemática; el capítulo 2 contiene el marco teórico donde se muestra los antecedentes, situación actual de las investigaciones sobre suspensiones activas en robots móviles y se extrae información útil para la investigación, se estudian conceptos e información sobre las suspensiones activas, el control LQR, MATLAB/SIMULINK y la dinámica de los vehículos de 4 ruedas; en el capítulo 3 se trata la metodología donde se explica las técnicas, métodos e instrumentos, la muestra, población, operacionalización de variables dependiente e independiente, los procedimientos, diseño de contrastación, procesamiento y análisis de datos; en el capítulo 4 se describen los resultados donde se interioriza en la explicación de cómo se obtienen los objetivos específicos planteados. En el capítulo 5 se expone la discusión, donde se interpretan los resultados de las estadísticas realizadas de acuerdo al tipo de investigación utilizada. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones donde se sintetiza los resultados del trabajo de investigación y los trabajos futuros.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

*“Comienza haciendo lo que es necesario, después lo que es posible
y de repente estarás haciendo lo imposible”*

San Agustín.



Dr. Ing. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Los trabajos de investigación que se consideran relevantes y pertinentes a la tesis propuesta aquí son los siguientes:

Ángel Rodríguez, John Figueredo, Juan Chica, (2019), en su trabajo de investigación titulado “Navegación de un robot móvil autónomo aplicado a la agricultura de precisión: Principios y aplicaciones de geolocalización en un cultivo de prueba”, diseña un robot seleccionando los sensores para el control y la navegación del mismo en ambientes no controlados, concluyendo que el uso de sensores ópticos tipo Lidar presentan una notoria ventaja en aplicaciones de localización y navegación autónoma del robot (Ángel A. Rodríguez A. et al., 2019). Sin embargo, la estabilidad del movimiento del robot móvil ante irregularidades del terreno (asumen terrenos uniformes) está fuera del alcance de su investigación.

Reza Mohammadikia, Mortaza Aliasghary, (2019), en su trabajo de investigación titulado “Design of an interval type-2 fractional order fuzzy controller for a tractor active suspension system”, diseña un controlador PID difuso que actúa sobre la suspensión activa del vehículo para minimizar las fluctuaciones irregulares que se transmiten a la cabina del conductor. Para ello compararon diferentes tipos de controladores siendo el PID difuso de orden fraccional de intervalo tipo 2 basado en el Algoritmo BBO de Optimización el que mejor respuesta logro en el sistema de suspensión activa del vehículo (Mohammadikia & Aliasghary, 2019).

José Cornejo, Ricardo Palomares, Mario Hernández, Diego Magallanes y Sergio Gutierrez, (2022), en su trabajo de investigación “Mechatronics Design and Kinematic Simulation of a Tripteron Cartesian-Parallel Agricultural Robot Mounted on 4-Wheeled Mobile Platform to Perform Seed Sowing Activity”, diseñaron un Robot agrícola del tipo cartesiano-paralelo Tripteron montado en una plataforma móvil de 4 ruedas para siembra de semillas en invernaderos del Cusco, para ello proponen acoplar una cámara al robot a fin de que

reconozca la trayectoria de siembra y el lugar preciso donde ubicar las semillas. El diseño se validó en simulación (Cornejo et al., 2022).

Manh Long Nguyen, (2022), en su trabajo de investigación “Application of MIMO Control Algorithm for Active Suspension System: A New Model with 5 State Variables”, usan el algoritmo de control LQR para gobernar la respuesta de un sistema de suspensión activa con actuador hidráulico, reduciendo adecuadamente los desplazamientos y aceleraciones de la masa suspendida. En general, los valores de desplazamiento y aceleraciones no superan el 2,68 % de aquellos con suspensión pasiva (Nguyen et al., 2022).

2.2. Marco Teórico

En este trabajo se utilizan los siguientes conocimientos especializados:

2.2.1 Matlab

Matlab es una plataforma que cuenta con un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, análisis y visualización de datos y programación, utilizada por la comunidad científica para la programación de algoritmos y modelos iterativos (Mathworks, 2023b).

El uso de Matlab es bastante popular, ya que es utilizado para realizar simulaciones digitales, análisis de eigenvalores, simulación de sistemas lineales y no lineales, simulaciones en tiempo real, data science, inteligencia artificial, machine learning, procesamiento de señales y robótica. (Twum-darko & Town, 2013).

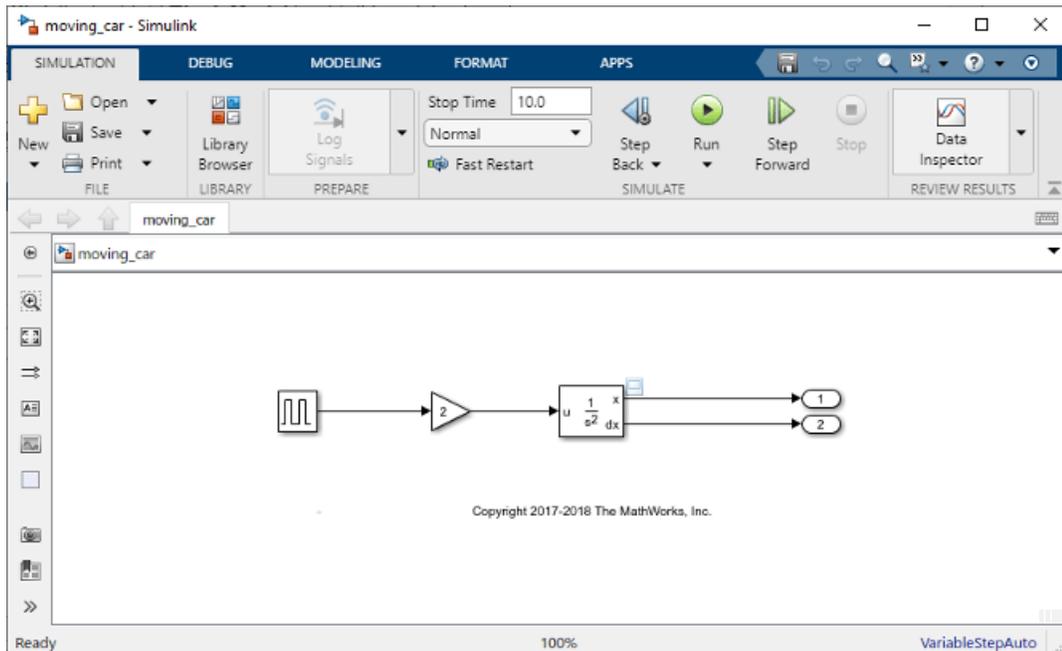
Este software permite programar y desarrollar herramientas, cálculos o procesos propios y personalizados, estas funciones se almacenan en archivos m-files, los cuales podemos usar como subprogramas, que lleven a cabo operaciones matriciales, diferenciales e iterativas (Shakeer et al., 2022).

2.2.2 Simulink

Simulink se presenta como una herramienta de programación o simulación en bloques desarrollada por Mathworks. Esta herramienta permite simular sistemas físicos antes de su implementación, que permite realizar pruebas o análisis desde los primeros pasos en el montaje o ensamblaje de prototipos (Horri y Pietraszko, 2022).

Simulink se caracteriza por la facilidad del uso de bloques y la amplitud de su librería, que permite definir o construir el modelo con los elementos básico encontrados en la librería (integradores, ganancias, etc.), el entorno de Simulink se muestra en la siguiente figura.

Figura 1: Entorno de programación por bloques – Simulink.



Fuente: (Mathworks, 2023a)

Integrar el uso de Simulink y Matlab, potencia ambas herramientas al usar entornos de programación por texto y gráfico, estas herramientas pueden interactuar de manera que los parámetros de los bloques de Simulink son definidos desde alguna variable de Matlab, las señales y sistemas pueden ser intercambiadas entre Matlab y Simulink (Mathworks, 2023c).

2.2.3 Sistemas de Suspensión

Existen tres tipos de suspensión vehicular: Pasiva, Activa y Semiactiva.

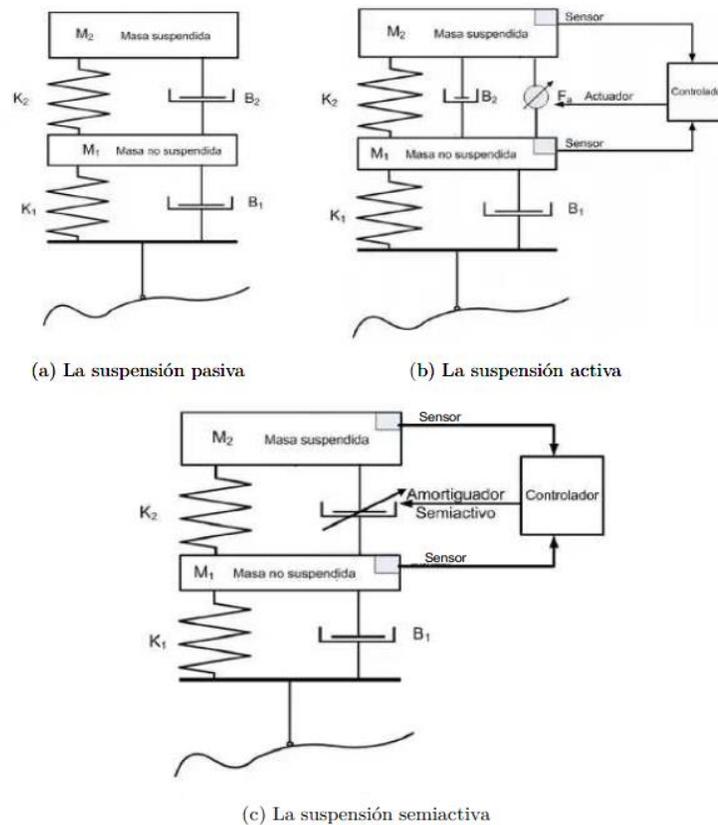
2.2.3.1 Suspensión Pasiva

No reciben directamente energía externa (Figura 2a). Almacenan energía mediante resortes y la disipan mediante amortiguadores. Sus parámetros son fijos y corresponden a un compromiso entre las características del terreno, la carga soportada y el confort (Hurel Ezeta et al., 2013).

2.2.3.2 Suspensión Activa

Almacena, disipa e introduce energía al sistema por medio de actuadores, cuyo accionar es regulado a través de sensores y controladores (Figura 2b). En estos sistemas las fuerzas activas pueden ser generadas mediante actuadores: electrohídricos, Neumáticos y electromagnéticos. Los sensores se emplean para registrar el comportamiento del vehículo ante las perturbaciones y así definir la respuesta de acuerdo al objetivo de control (Ni et al., 2020).

Figura 2: Clasificación de los Sistemas de Suspensión.



Fuente: (Hurel, 2015)

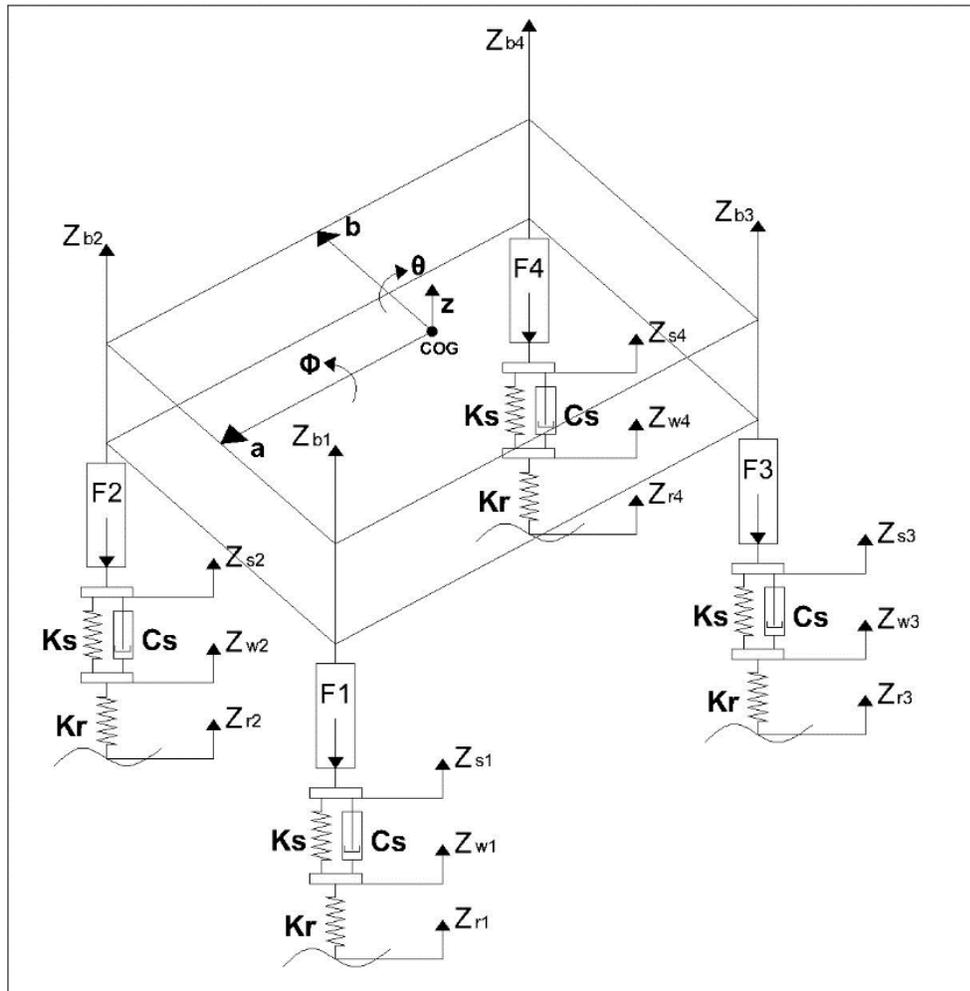
2.2.3.3 Suspensión Semi-Activa

Tiene amortiguadores cuyo coeficiente de amortiguamiento es modificado por un control externo (Figura. 2c). Generalmente, estas suspensiones controlan las frecuencias bajas con elementos activos y las frecuencias altas con elementos pasivos (Marco Antonio Alamo-Viera, 2016).

2.2.4 Sistema de Suspensión en Vehículo de 4 Ruedas

El comportamiento dinámico de un robot móvil, en términos generales, puede ser representado por un sistema lineal de 11 grados de libertad (GDL), una carrocería (masa suspendida), cuatro masas no suspendidas (representan a las cuatro llantas) y por el sistema de suspensión. Este último conecta la masa suspendida a las cuatro masas no suspendidas (Figura 3).

Figura 3: Modelo de vehículo completo de 4 ruedas.



Fuente: (Hamed et al., 2015)

La masa suspendida tiene tres grados de libertad: desplazamiento vertical, rotación sobre el eje X (roll) y rotación sobre el eje Y (pitch) aplicadas al centro de gravedad (COG, por sus siglas en inglés). Las cuatro masas no suspendidas están distribuidas como sigue: uno en el frente izquierdo, otro frente derecho, trasero izquierdo y

finalmente trasero derecho, cada uno de ellos representa un GDL en las direcciones verticales $Z_{b1}, Z_{b2}, Z_{b3}, Z_{b4}$ respectivamente y cuatro GDL que son el control generado por los 4 actuadores o motores lineales.

A fin de simplificar el problema del modelamiento dinámico se realizan las siguientes tres suposiciones:

1. Las cuatro ruedas del robot son rígidas y de accionamiento independiente.
2. El ángulo de dirección de cada rueda se fija en 0.
3. El robot se desplaza sobre una pendiente lateral plana.

Entonces se establecen las ecuaciones de movimiento de la suspensión del robot móvil de cuatro ruedas según (Attia, 2018):

La ecuación del movimiento vertical del cuerpo está dada por:

$$m\ddot{z} = F1 + F2 + F3 + F4 \quad (1)$$

Donde:

m , es la masa del cuerpo suspendido.

\ddot{z} , es la aceleración en el eje z del cuerpo suspendido.

$F1, F2, F3, F4$; las fuerzas verticales en las direcciones verticales $Z_{b1}, Z_{b2}, Z_{b3}, Z_{b4}$.

La ecuación del movimiento de cabeceo (pitch) del cuerpo está dada por:

$$I_p\ddot{\theta} = a * F1 + a * F2 - a * F3 - a * F4 \quad (2)$$

Donde:

I_p , es el momento de inercia en pitch.

$\ddot{\theta}$, es la aceleración de pitch.

a , es la distancia en el eje X del COG hacia el centro de las ruedas delanteras y traseras.

La ecuación del movimiento de balanceo (roll) del cuerpo está dada por:

$$I_r\ddot{\Phi} = b * F1 - b * F2 + b * F3 - b * F4 \quad (3)$$

Donde:

I_r , es el momento de inercia en roll.

$\ddot{\Phi}$, es la aceleración de roll.

b , es la distancia en el eje Y del COG hacia el centro de las ruedas derechas e izquierdas.

El movimiento de la suspensión se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$m_{s1} * \ddot{z}_{s1} + F1 = K_s * (z_{w1} - z_{s1}) + C_s * (\dot{z}_{w1} - \dot{z}_{s1}) \quad (4)$$

$$m_{s2} * \ddot{z}_{s2} + F2 = K_s * (z_{w2} - z_{s2}) + C_s * (\dot{z}_{w2} - \dot{z}_{s2}) \quad (5)$$

$$m_{s3} * \ddot{z}_{s3} + F3 = K_s * (z_{w3} - z_{s3}) + C_s * (\dot{z}_{w3} - \dot{z}_{s3}) \quad (2)$$

$$m_{s4} * \ddot{z}_{s4} + F4 = K_s * (z_{w4} - z_{s4}) + C_s * (\dot{z}_{w4} - \dot{z}_{s4}) \quad (3)$$

Las ecuaciones del movimiento vertical de las ruedas son:

$$m_{w1} * \ddot{z}_{w1} = -K_s * (z_{w1} - z_{s1}) - C_s * (\dot{z}_{w1} - \dot{z}_{s1}) - K_r(z_{w1} - z_{r1}) \quad (8)$$

$$m_{w2} * \ddot{z}_{w2} = -K_s * (z_{w2} - z_{s2}) - C_s * (\dot{z}_{w2} - \dot{z}_{s2}) - K_r(z_{w2} - z_{r2}) \quad (4)$$

$$m_{w3} * \ddot{z}_{w3} = -K_s * (z_{w3} - z_{s3}) - C_s * (\dot{z}_{w3} - \dot{z}_{s3}) - K_r(z_{w3} - z_{r3}) \quad (5)$$

$$m_{w4} * \ddot{z}_{w4} = -K_s * (z_{w4} - z_{s4}) - C_s * (\dot{z}_{w4} - \dot{z}_{s4}) - K_r(z_{w4} - z_{r4}) \quad (6)$$

Las ecuaciones del (1) al (11), en este trabajo, se usan como base para modelar el movimiento de un robot móvil de cuatro ruedas con accionamiento independiente entre sí, con movimiento cinemático del tipo diferencial y simetría morfológica mecánica con respecto al COG. Por otro lado, se puede asumir que los desplazamientos verticales son pequeños, lo que permite simplificar el modelado de movimiento según:

$$z_{r1} = z - a\theta + b\phi \quad (7)$$

$$z_{r2} = z - a\theta - b\phi \quad (8)$$

$$z_{r3} = z + a\theta + b\phi \quad (9)$$

$$z_{r4} = z + a\theta - b\phi \quad (10)$$

2.2.5 Algoritmo Regulador Cuadrático Lineal (LQR)

Uno de los retos más grandes de los sistemas de suspensión activa, es elegir su adecuada estrategia de control. El control LQR por sus palabras en inglés (Linear Quadratic Regulator), aborda el problema de regulación que resuelve optimizando un índice cuadrático mediante una solución lineal. El controlador cuadrático lineal minimiza una función cuadrática (William Honorio, 2022).

La función costo viene definida por:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} e(t) \partial t \quad (11)$$

En donde se intenta reducir el error, $e(t)$, en un periodo de tiempo de t_0 a t_f , además considerando que el error puede ser negativo o positivo es necesario elevar al cuadrado para que los valores negativos no se resten de la sumatoria de errores. Por lo que en índices cuadráticos la función costo viene dada por la siguiente ecuación (Moussadek y Mouffok, 2022):

$$J = \int_{t_0}^{t_f} e(t)^2 \partial t \quad (12)$$

Además, es necesario contar con la restricción de control, definida por la entrada de los actuadores al sistema dinámico:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (e(t)^2 - p * u(t)^2) \partial t \quad (13)$$

Donde p es la ponderación o ganancia de los valores de entrada.

Se puede definir la función costo como la sumatoria de los estados del robot restados por las entradas de control elevados al cuadrado.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (estados^2 - entradas^2) \partial t \quad (14)$$

Se considera a los estados como la matriz X que integra todos los valores de $x_1, x_2, \dots x_n$, por lo cual, se puede obtener que:

$$estados^2 = (x_1^2 + x_2^2 + \dots x_n^2) = X^T * X \quad (15)$$

De igual manera para las entradas se trabaja con la matriz U :

$$\text{entradas}^2 = (u_1^2 + u_2^2 + \dots u_n^2) = U^T * U \quad (16)$$

Y se obtiene la siguiente función costo:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (X^T Q X + U^T R U) \partial t \quad (17)$$

Donde Q y R , son las matrices de ponderaciones (ganancias) necesarias para cumplir con el problema de optimización. Las matrices Q y R son matrices reales, simétricas, constantes y definidas positivas (Goncalves Da Silva et al., 2019). Se puede inferir que si $Q > R$ la regulación de estados es más rápida, pero considera un mayor coste energético, mientras si $Q < R$ la regulación es más lenta, pero se utiliza menor cantidad de energía. La ganancia K de realimentación, se obtiene de:

$$K = R^{-1} B' P \quad (18)$$

Donde B , es la matriz de ganancias de la entrada de control en el espacio de estados y P se obtiene de resolver la ecuación de Riccati (Sir Elkhatem y Naci Engin, 2022):

$$A' P + P A - P B R^{-1} B' P + Q = 0 \quad (19)$$

2.3. Marco Conceptual

Robot móvil: Es un sistema que cuenta con diversos subsistemas de percepción, planificación, control de movimientos y locomoción que interaccionan entre sí. El sistema de percepción le permite al robot móvil identificar y posteriormente adaptarse a entornos y eventos cambiantes (González Jiménez y Ollero Baturone, 2015).

Algoritmos de Control: Mantienen una variable controlada para operar dentro de rangos aceptables y cumplir con el trabajo deseado (De Miguel Lázaro, 2017).

Estabilidad del vehículo: Es la capacidad de mantener el equilibrio sobre el suelo, y tiene dos condicionantes, que todas las ruedas se encuentren siempre en contacto con el suelo y que la variación de los ángulos de cabeceo y balanceo sean pequeñas y controladas (Tomás Jover et al., 2004).

Suspensión Activa: Aquí se introduce energía al sistema por medio de un actuador (del tipo eléctrico, neumático o hidráulico) que permite a un robot móvil alterar sus

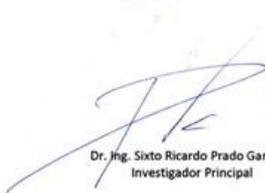
configuraciones estructurales variando su centro de masa y evitando volcarse al transitar por terrenos no uniformes (Jiang et al., 2019).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

“La verdadera sabiduría está en reconocer la propia ignorancia”

Sócrates.



Dr. Jng. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal

CAPÍTULO III: METODOLOGIA

En este capítulo se plantean las técnicas, métodos e instrumentos utilizados para evaluar los marcos de desarrollo.

3.1. Población

Modelos de Robots Móviles de 4 ruedas con suspensión activa aplicable en fundos agrícolas de la Región La Libertad.

3.2. Muestra

En el proyecto de Investigación se utiliza el modelo de robot móvil de 4 ruedas con suspensión activa aplicable en fundos agrícolas de la Región La Libertad, implementado en el LABINM–UPAO.

3.3. Unidad de Análisis:

Control de Robots Móviles en terrenos no estructurados.

3.4. Operacionalización de variables

VI: Algoritmo de Control LQR en un Entorno de Simulación de MATLAB/SIMULINK.

VD: Respuesta de la suspensión activa en el modelo de un robot móvil.

En la Tabla 1, se muestra la operacionalización de la variable dependiente:

Tabla 1

Operacionalización de Variable Dependiente

Variable dependiente: Respuesta de la suspensión activa de un robot móvil.			
Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento de Investigación
Estabilidad del robot móvil	Altura de ruedas	Centímetros	Graficas de Posición
	Ángulos pitch and roll	Grados Sexagesimales	Graficas de aceleración

Nota. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 2, se muestra la operacionalización de la variable independiente:

Tabla 2*Operacionalización de Variable Independiente*

Variable independiente: Algoritmo de Control LQR en un Entorno de Simulación de MATLAB/SIMULINK.			
Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento de Investigación
Algoritmo de control LQR	Tiempo de estabilización	Milisegundos (ms)	Log de Procesos
	Efectividad del control (error)	Porcentaje (%)	Grafica de Retroalimentación de Planta real

Nota. Fuente: Elaboración Propia**3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos**

Para el presente proyecto de investigación se utilizaron diferentes técnicas o instrumentos, los cuales se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3*Operacionalización de Variable Independiente*

Método o Técnica	Instrumento
Pruebas estandarizadas de control	Log de Procesos
Simulación y cuantificación de parámetros	Gráficos de Aceleración Gráficos de Posición

Nota. Fuente: Elaboración Propia**3.6. Procedimientos**

La presente investigación tiene las siguientes fases como procedimiento metodológico:

Fase 1: Análisis y Modelado de la cinemática de la suspensión activa del robot móvil para ambientes irregulares, usando la teoría de síntesis de mecanismos.

Fase 2: Implementación del Algoritmo de Control LQR en el entorno de MATLAB/SIMULINK, mediante estrategias de control realimentado por los estados deseados y reales.

Fase 3: Configuración del control de la suspensión activa sintonizando los valores de Q y R, para obtener una ganancia de realimentación adecuada para el sistema robótico modelado.

Fase 4. Validación del Algoritmo de Control LQR aplicado al modelo de suspensión activa del robot móvil movilizándose en un entorno virtual de terreno irregular.

Fase 5. Comparación de las respuestas del robot móvil con y sin una suspensión activa controlada, en un mismo escenario de entorno virtual de terreno irregular.

3.7. Diseño de contrastación

Tipo de Estudio:

- Explicativo

Diseño del estudio:

Cuasiexperimental.

G1 O1 X O2

G2 O3 - O4

Diseño de Investigación Experimental: proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones o estímulos (variable independiente), para observar los efectos que se producen (variable dependiente). Se diferencia de la investigación de campo por la manipulación y control de variables

3.8. Procesamiento y análisis de datos

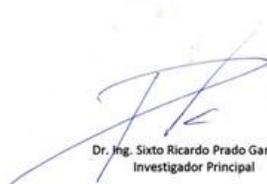
El procesamiento y análisis de resultados se realizará con pruebas de confiabilidad del tipo Alpha de Crombach y normalización, así como, pruebas paramétricas aplicables a la comparación de respuesta de una suspensión pasiva frente a una suspensión activa, como la prueba T Student.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

*“El que aprende y aprende y no practica lo que sabe, es como el que ara y
ara y no siembra”*

Platón.



Dr. Jhg. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

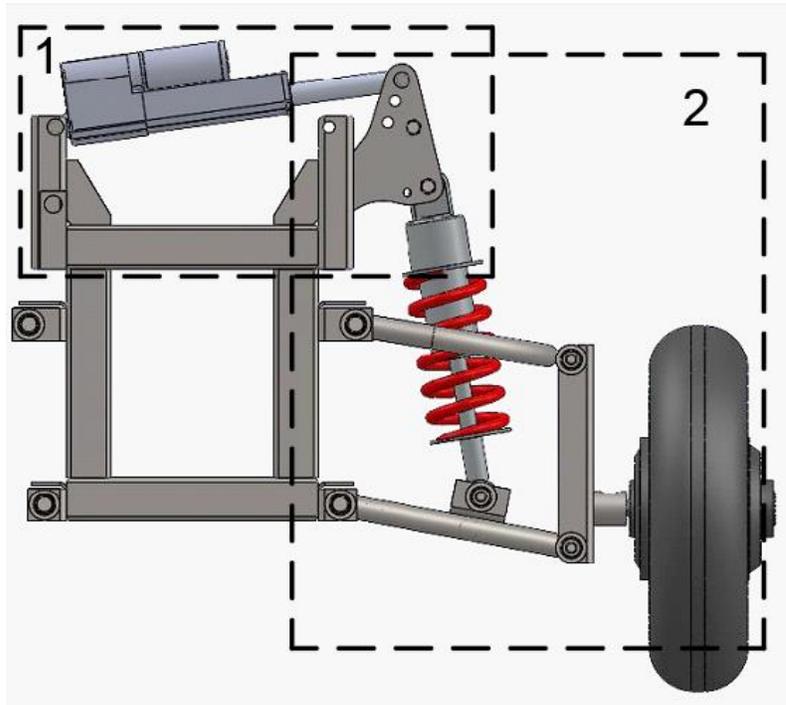
En este capítulo se desarrolla la metodología descrita previamente a fin de alcanzar las metas planteadas en los objetivos específicos:

- a) **Determinar el modelo cinemático del robot móvil con suspensión activa para identificar los estados del robot en el algoritmo de control.**

El robot móvil ajusta el ángulo de balanceo mediante su suspensión activa. A fin de tener un control efectivo sobre este ajuste se determina el modelo cinemático del robot considerando la suspensión activa, que a su vez tiene dos grados de libertad (por rueda) acoplados linealmente (Figura 4).

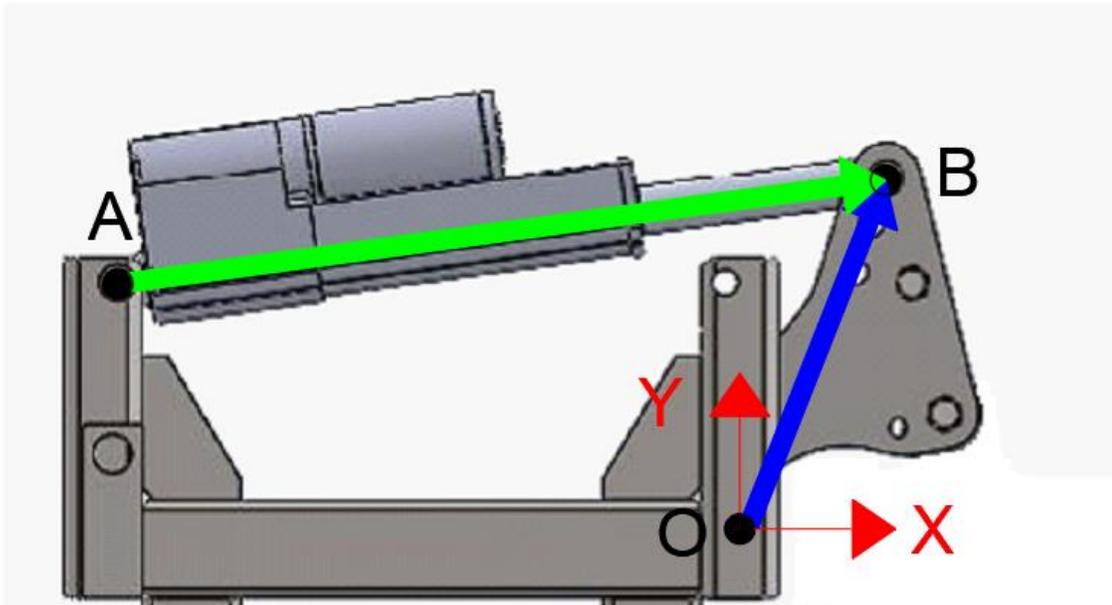
La suspensión activa está conformada por dos mecanismos: 1) el cuerpo del robot (Fijo), el actuador lineal y parte superior del balancín (conjunto al que ahora se le llamara mecanismo 1); y 2) parte inferior del balancín (conjunto al que ahora se le llamara mecanismo 2). Ambos mecanismos se detallan a continuación.

Figura 4: División de Mecanismos para suspensión activa de 2 grados de libertad.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5: Modelo del Mecanismo 1 del sistema de suspensión activa.



Fuente: Elaboración Propia

Modelamiento del Mecanismo 1 (Figura 5). Aquí se modela la interacción entre el actuador lineal y el balancín, cuando el eje del actuador lineal se desplaza hacia fuera o hacia adentro del actuador. Para ello se define un sistema de referencia con origen en el punto de contacto, O, entre la superficie del robot (fijo) con el balancín (se asume un contacto tipo punto y sin deformación en la zona de contacto), eje X (horizontal) paralelo al eje de ataque del actuador lineal (cuando está en su posición de reposo) y el eje Y perpendicular al eje X (vertical). En base a este sistema de referencia y asumiendo que los contactos son del tipo punto y no presentan deformación se definen los siguientes elementos geométricos:

A: Punto de contacto entre la superficie del robot y el inicio del actuador lineal, se considera que cae en el plano XY.

B: Punto de contacto entre el extremo del eje del actuador lineal y el balancín, se considera que cae en el plano XY.

Para la distancia desde el punto O al punto B, se define el vector \vec{P} , con módulo conocido ya que es la longitud del extremo superior del balancín, y con ángulo de inclinación θ .

De donde siempre se cumple que las proyecciones de \vec{P} sobre los ejes X e Y son:

$$P_x = \|\vec{P}\| * \cos(\theta) \quad (20)$$

$$P_y = \|\vec{P}\| * \sen(\theta) \quad (21)$$

Por lo que el punto B está definido por las coordenadas (P_x, P_y) , y el punto A siempre es fijo y conocido. Y dado que se asume contactos sin deformación, entonces se cumple:

$$A = (x_1, y_1) = (-26, 9) \quad (22)$$

$$B = (x_2, y_2) = (\|\vec{P}\| * \cos(\theta), \|\vec{P}\| * \sen(\theta)) \quad (23)$$

La distancia entre dos puntos, se obtiene de la siguiente ecuación.

$$\overline{AB} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (24)$$

reemplazando (27) y (28) en (29), se obtiene:

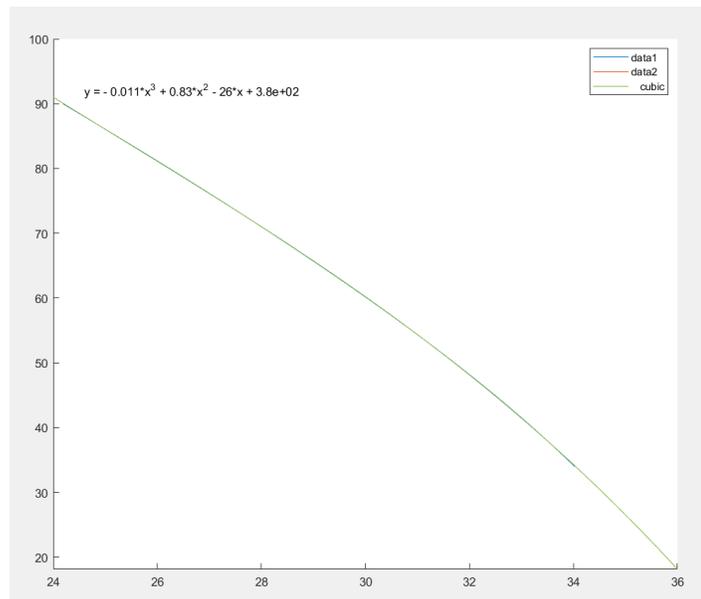
$$\overline{AB} = \sqrt{(\|\vec{P}\| * \cos(\theta) + 26)^2 + (\|\vec{P}\| * \sen(\theta) - 9)^2} \quad (25)$$

La ecuación (30) relaciona el movimiento del eje del actuador lineal en cm (\overline{AB}) con el giro del balancín en grados sexagesimales (θ). Esta ecuación tiene funciones no lineales y a fin de despejar θ se usa determinadas funciones de Matlab, que da la siguiente expresión:

$$\theta = -0.0109 * \overline{AB}^3 + 0.8262 * \overline{AB}^2 - 25.7641 * \overline{AB} + 384.4087 \quad (26)$$

En la Figura 5 se muestra \overline{AB} vs (θ), con punto de inicio del actuador lineal en 24cm (eje retraído) y punto final en 36cm (eje expandido).

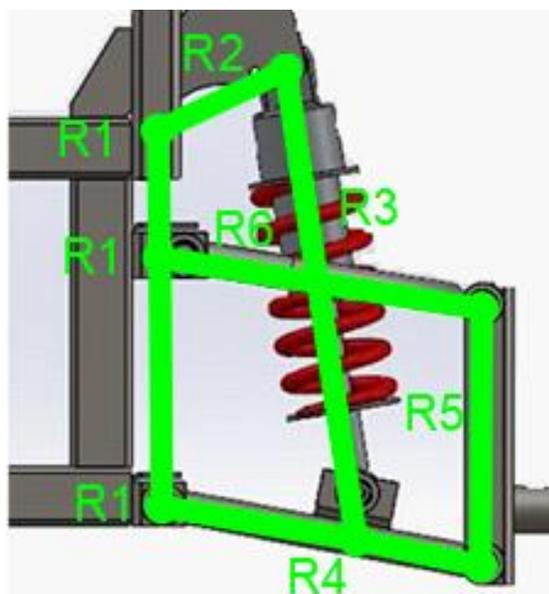
Figura 6: Grafica de la relación entre \overline{AB} vs θ .



Fuente: Elaboración Propia

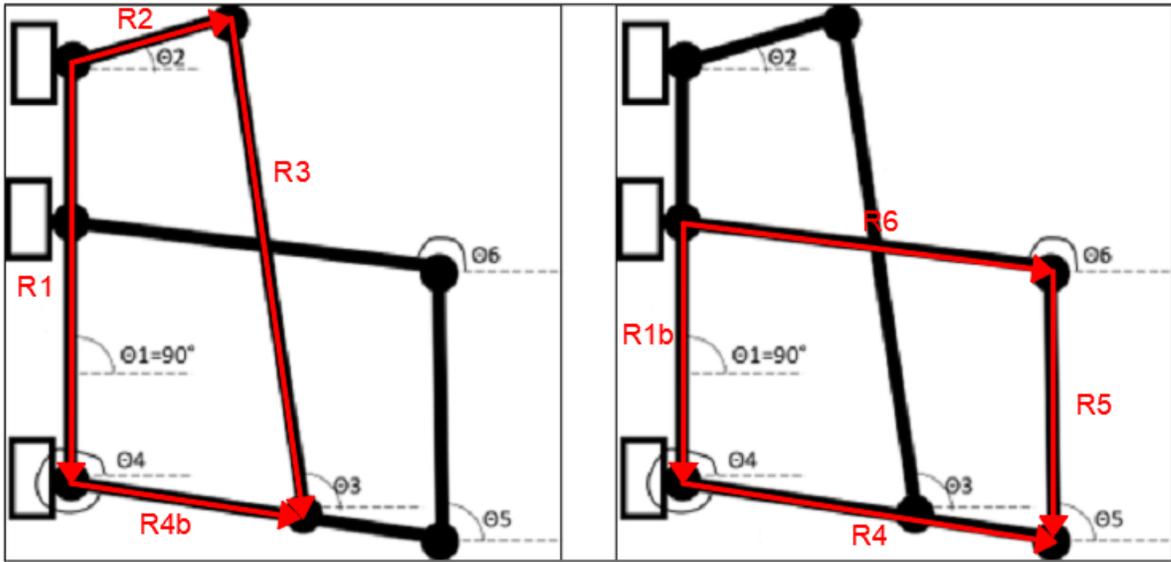
Modelamiento del Mecanismo 2 (Figura 7). Aquí se consideran seis barras, cinco móviles que empiezan desde el borde inferior del balancín hasta el soporte de la rueda y una barra fija que es el cuerpo del robot, las que se representan mediante dos lazos vectoriales cerrados, esto facilita el análisis del movimiento de las barras (Figura 8).

Figura 7: Modelamiento del Mecanismo 2 del sistema de suspensión activa de 6 barras



Fuente: Elaboración Propia

Figura 8: Mecanismo 2 de 6 barras en configuración de 2 lazos vectoriales cerrados.



Fuente: Elaboración Propia

Las Ecuaciones que se derivan de los dos lazos vectoriales cerrados son:

$$R2 + R3 - R4b - R1 = 0 \quad (27)$$

$$R6 + R5 - R1b - R4 = 0 \quad (28)$$

En (32) y (33) se aplica el método de Euler, obteniéndose:

$$r2 * e^{i\theta2} + r3 * e^{i\theta3} - r4b * e^{i\theta4} - r1 * e^{i\theta1} = 0 \quad (29)$$

$$r6 * e^{i\theta6} + r5 * e^{i\theta5} - r1b * e^{i\theta1} - r4 * e^{i\theta4} = 0 \quad (30)$$

Una identidad valida en el método de Euler es:

$$e^{ix} = \cos(x) + i \operatorname{sen}(x) \quad (31)$$

Reemplazando (36) en (34) y (35) y manipulando tal que se separen los componentes imaginarios de los reales se obtiene:

$$r2 * \cos(\theta2) + r3 * \cos(\theta3) - r4b * \cos(\theta4) - r1 * \cos(\theta1) = 0 \quad (32)$$

$$r2 * \operatorname{sen}(\theta2) + r3 * \operatorname{sen}(\theta3) - r4 * \operatorname{sen}(\theta4) - r1 * \operatorname{sen}(\theta1) = 0 \quad (33)$$

$$r6 * \cos(\theta6) + r5 * \cos(\theta5) - r4 * \cos(\theta4) - r1b * \cos(\theta1) = 0 \quad (34)$$

$$r6 * \operatorname{sen}(\theta6) + r5 * \operatorname{sen}(\theta5) - r4 * \operatorname{sen}(\theta4) - r1b * \operatorname{sen}(\theta1) = 0 \quad (35)$$

Las ecuaciones (37), (38), (39) y (40) definen las funciones desde donde se obtienen θ_3 , θ_4 , θ_5 , θ_6 y dado que $\theta_1 = 90^\circ$, entonces:

$$\vec{X}_n = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$F_{xn} = \begin{bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ f(3) \\ f(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r2 * \cos(\theta_2) + r3 * \cos(\theta_3) - r4 * \cos(\theta_4) \\ r2 * \text{sen}(\theta_2) + r3 * \text{sen}(\theta_3) - r4 * \text{sen}(\theta_4) - r1 \\ r6 * \cos(\theta_6) + r5 * \cos(\theta_5) - r4b * \cos(\theta_4) \\ r6 * \text{sen}(\theta_6) + r5 * \text{sen}(\theta_5) - r4b * \text{sen}(\theta_4) - r1b \end{bmatrix} \quad (37)$$

La Ecuación (42) presenta diferentes no linealidades y por lo tanto se resuelve mediante el método numérico iterativo de Newton-Raphson, el que se basa en el siguiente principio:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (38)$$

Y en su formato matricial (sistema de ecuaciones) se representa como:

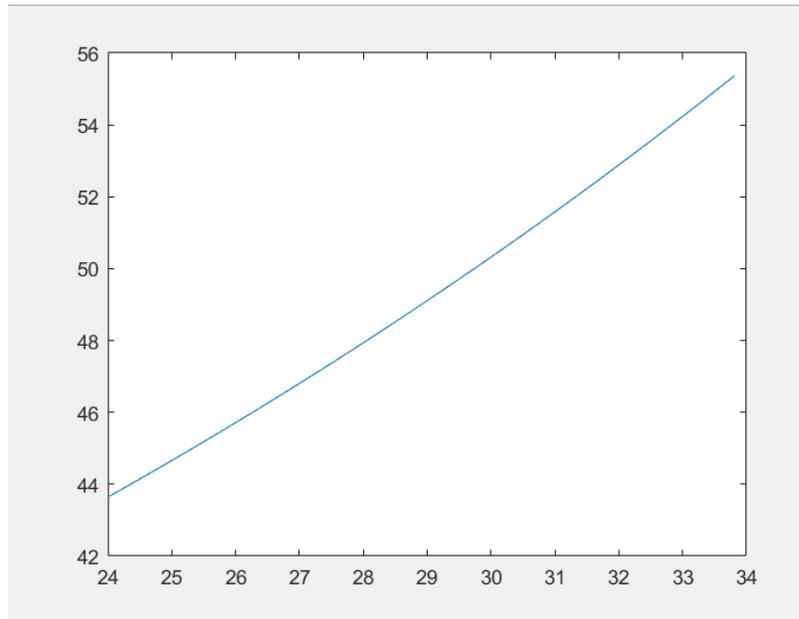
$$X_{n+1} = X_n - \frac{F(X_n)}{J(F(X_n))} = X_n - [J(F(X_n))]^{-1} * F(X_n) \quad (39)$$

Donde, $J(F(X_n))$ es el Jacobiano de $F(X_n)$:

$$J(F(X_n)) = \begin{bmatrix} \frac{d(f(1))}{d(x1)} & \dots & \frac{d(f(1))}{d(xn)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d(f(n))}{d(x1)} & \dots & \frac{d(f(n))}{d(xn)} \end{bmatrix} \quad (405)$$

En la Figura 9 se muestra la relación entre la longitud del actuador lineal (L) y la altura del robot al ejecutar (en Matlab) el método de Newton-Raphson.

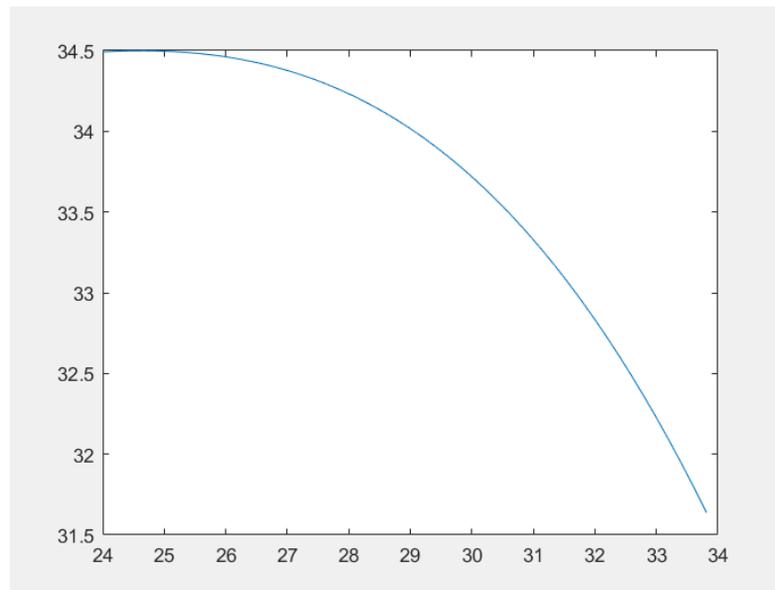
Figura 9: Relación entre longitud del actuador lineal (cm), con la altura del robot (cm).



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 10 se muestra la relación entre el actuador lineal con la mitad de la distancia entre dos ruedas paralelas, al ejecutar (en Matlab) el método de Newton-Raphson.

Figura 10: Relación entre longitud del actuador lineal (L) en cm, con la mitad de la distancia entre ruedas en cm.



Fuente: Elaboración Propia

Además, se obtiene la ecuación que define la altura de la suspensión del robot.

$$h_i = 0.00026 * L^3 - 0.0012 * L^2 + 0.61 * L + 26 \quad (41)$$

Y la ecuación que define la distancia entre el COG hasta las ruedas del robot.

$$w_i = -0.0018 * L^3 + 0.12 * L^2 - 2.4 * L + 51 \quad (42)$$

b) Implementar el algoritmo LQR en base al modelo cinemático desarrollado a fin de controlar la suspensión activa.

Dado el sistema de 11 GDL descrito en la Sección 2.2.3 (ver Figura 2) en el que se cumple que la suspensión activa enlaza a la masa suspendida con las cuatro masas no suspendidas (una masa igual a una rueda), los que a su vez rebotan verticalmente con respecto a la masa suspendida. El comportamiento del sistema descrito previamente puede representarse mediante espacio de estados, según:

$$\dot{X}_{(t)} = A * X_{(t)} + B * U_{(t)} + E * Zr_{(t)} \quad (43)$$

Donde:

$X_{(t)}$, estados del robot.

$U_{(t)}$, entradas de control (Actuador).

$Zr_{(t)}$, perturbación generada por las irregularidades del camino.

A , matriz de ganancias para los estados del robot.

B , matriz de ganancias para las entradas de control.

E , matriz de ganancias para la perturbación generada por el perfil del camino.

Siendo $X_{(t)}$ y su derivada, $\dot{X}_{(t)}$, como sigue:

$$X_{(t)} = [\varphi_s \ \theta_s \ Z_s \ Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ Z_4 \ \dot{\varphi}_s \ \dot{\theta}_s \ \dot{Z}_s \ \dot{Z}_1 \ \dot{Z}_2 \ \dot{Z}_3 \ \dot{Z}_4]^T \quad (44)$$

$$\dot{X}_{(t)} = [\dot{\varphi}_s \ \dot{\theta}_s \ \dot{Z}_s \ \dot{Z}_1 \ \dot{Z}_2 \ \dot{Z}_3 \ \dot{Z}_4 \ \ddot{\varphi}_s \ \ddot{\theta}_s \ \ddot{Z}_s \ \ddot{Z}_1 \ \ddot{Z}_2 \ \ddot{Z}_3 \ \ddot{Z}_4]^T \quad (45)$$

Y $U_{(t)}$ y $Zr_{(t)}$ se definen como:

$$U_{(t)} = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T \quad (46)$$

$$Zr_{(t)} = [Z_{r1} \ Z_{r2} \ Z_{r3} \ Z_{r4}]^T \quad (47)$$

Las matrices A , B y E (anexo 3) se determinan al manipular las ecuaciones (1), (2), (7), (8), (9), (10), y (11), obteniéndose con ello los valores de $[\varphi_s \ \theta_s \ Z_s \ Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ Z_4]$, que al ser derivados se completa la matriz $X_{(t)}$.

A fin de implementar el algoritmo LQR es necesario determinar los valores de Q y R , los que se obtienen mediante técnica de prueba y error. Si los valores de Q son muy grandes entonces se genera elevados transitorios en la señal de salida. Por otro lado, si los valores de R son muy grandes entonces afecta la reacción de la acción de control.

En este trabajo se considera una regulación de acción rápida (dado el comportamiento de la suspensión activa), por lo que los valores de Q deben ser grandes, y los valores de R deben ser pequeños, según:

$$Q = 10^6 * I_{14 \times 14} \quad (48)$$

$$R = 0.1 * I_{4 \times 4} \quad (49)$$

El algoritmo LQR, se implementa en un script de Matlab (Anexo 4) y desde ahí se obtiene la matriz de realimentación K (ver Sección 2.2.4) del control LQR. La que se multiplica con $X_{(t)}$ (K es de dimensión de 4×14) para obtener los valores de $U_{(t)}$. Los valores de la matriz K , para diferentes pruebas se muestran en la Tabla 4.

Un primer escenario de acción de control es tener un sistema pasivo (suspensión pasiva) al que se le aplica la función “step” (escalón unitario) a fin de obtener la respuesta del sistema (Figura 11). Donde las entradas (In(1), In(2), In(3) e In(4)) son respectivamente Z_{r1} , Z_{r2} , Z_{r3} y Z_{r4} y las salidas (Out(1), Out(2) y Out(3)) son respectivamente los parámetros de interés θ , \emptyset y Z .

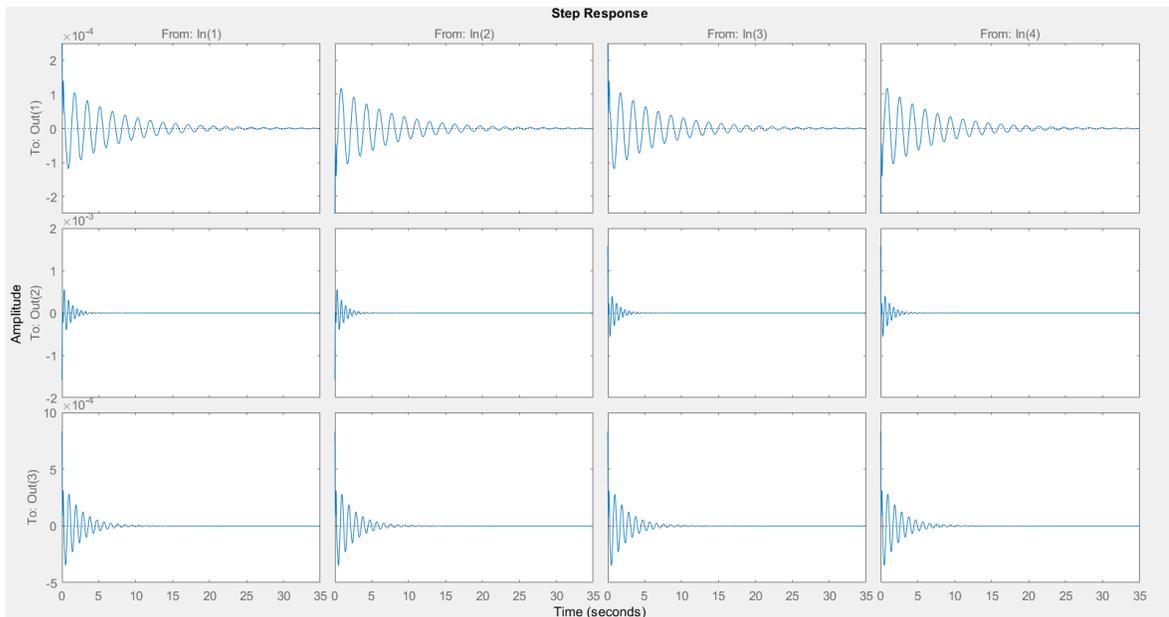
Tabla 4

Valores de Matriz K, para la realimentación en el Control LQR

49.9500998	-49.9500998	49.9500998	-49.9500998
-33.3185317	-33.3185317	33.3185317	33.3185317
49.9500998	49.9500998	49.9500998	49.9500998
-12873.3878	-9912.06651	2026.439	4896.92619
-9912.06651	-12873.3878	4896.92619	2026.439
2026.439	4896.92619	-12873.3878	-9912.06651
4896.92619	2026.439	-9912.06651	-12873.3878
2663.63905	-2663.63905	2663.63905	-2663.63905
-2566.88244	-2566.88244	2566.88244	2566.88244
2391.43567	2391.43567	2391.43567	2391.43567
-2008.37649	260.788315	-95.8582444	-144.96107
260.788315	-2008.37649	-144.96107	-95.8582444
-95.8582444	-144.96107	-2008.37649	260.788315
-144.96107	-95.8582444	260.788315	-2008.37649

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 11: Respuesta del sistema pasivo al aplicar el comando STEP.



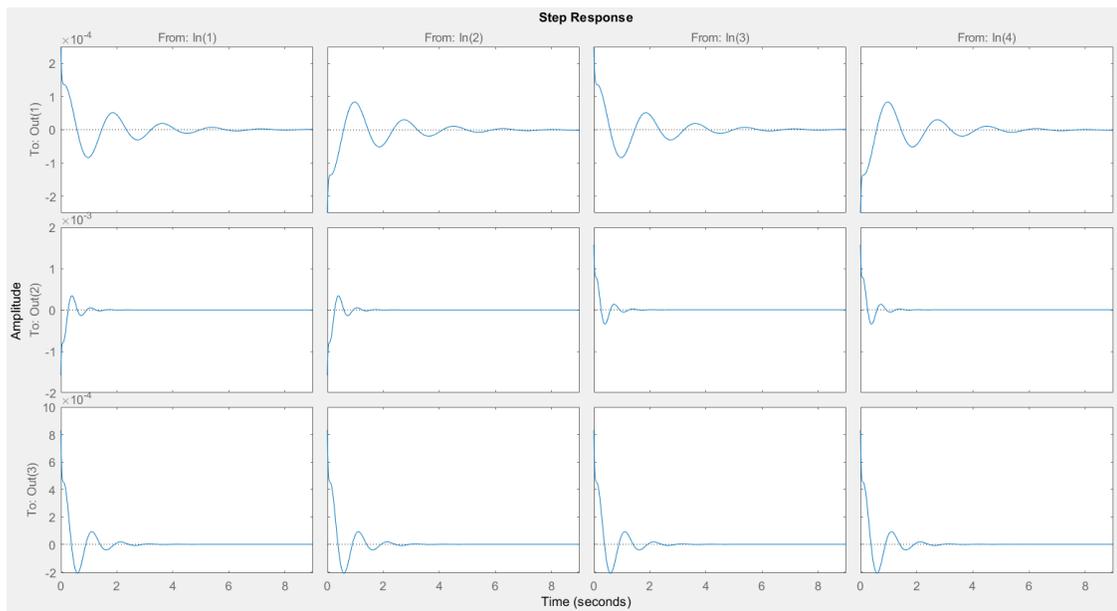
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 11 se observa que la respuesta al escalón unitario de la suspensión pasiva estabiliza al sistema con respecto a la variable θ a los 35 segundos, con una amplitud de

hasta 2×10^{-4} grados. En el caso de \emptyset , el sistema se estabiliza a los 5 segundos con una amplitud máxima de 2×10^{-3} y por último Z que se estabiliza a los 15 segundos con una amplitud de hasta 10×10^{-4} metros. En todos los casos descritos previamente se produce una oscilación prolongada, lo que podría afectar a todos los demás subsistemas del robot móvil.

En un segundo escenario se usa suspensión activa con control LQR y matriz de ganancia de realimentación K . Aquí también se aplica un escalón unitario y la respuesta del sistema se muestra en la Figura 12. El tiempo de alcanzar la estabilidad de las variables de interés son: θ a los 8 segundos; \emptyset a los 2 segundos y Z a los 4 segundos. Y en todos ellos se cumple una oscilación reducida.

Figura 12: Respuesta del sistema con suspensión activa control LQR al aplicar comando STEP.

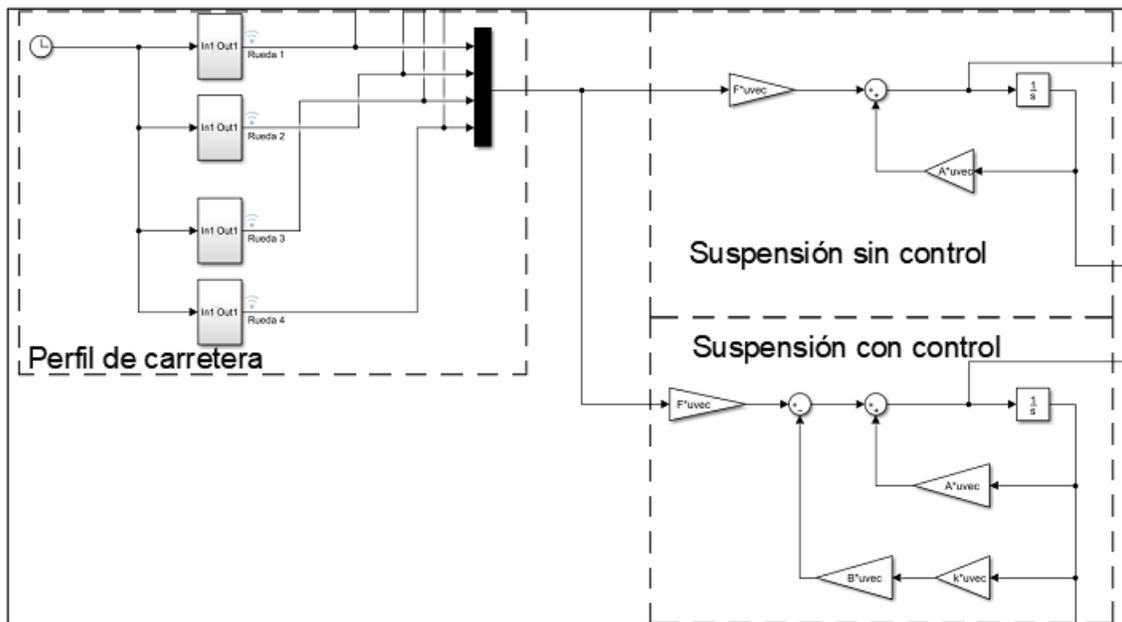


Fuente: Elaboración Propia

c) Simular el sistema de control con el modelo matemático obtenido mediante Simulink.

En la Figura 13 se muestra el diagrama de bloques en Simulink de la suspensión pasiva, suspensión activa con control LQR y perturbaciones (emulando irregularidades en el terreno agrícola). Las irregularidades del terreno (perfil de carretera) se aproximan mediante una señal sinusoidal que se aplica a cada rueda, según:

Figura 13: Diagrama de sistema en Simulink.



Fuente: Elaboración Propia

$$z_{ri} = \begin{cases} \frac{h}{2}(1 - \cos(\omega t)) & , \text{si } t_0 \leq t \leq t_0 + \frac{\lambda}{v} \\ 0 & , \text{otros casos} \end{cases} \quad (50)$$

$$\omega = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (51)$$

Donde:

h , es la altura del montículo.

λ , es la longitud de la onda.

v , es la velocidad del robot.

ω , es la frecuencia del perfil de Carretera o terreno irregular.

t_0 , es el tiempo de inicio del bache.

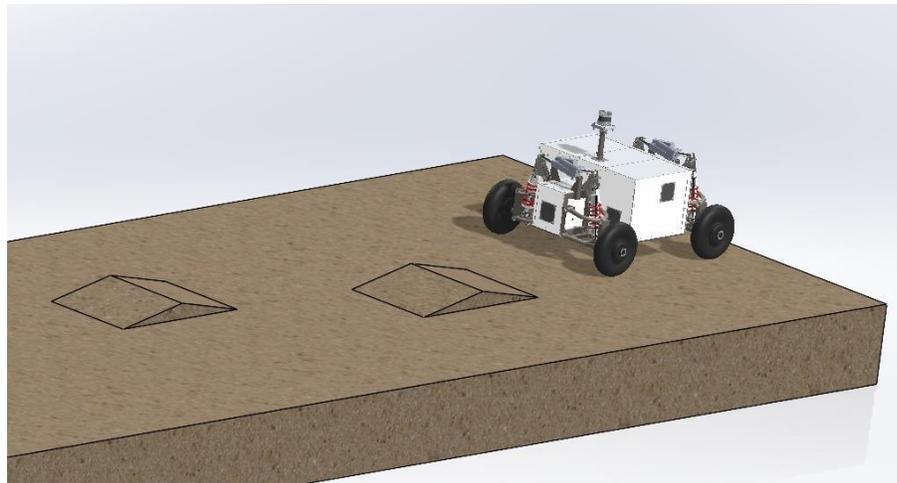
d) Realizar el análisis comparativo entre el comportamiento de una suspensión pasiva y una suspensión activa con control LQR.

La simulación en Matlab y Simulink, de la suspensión activa y pasiva del robot móvil ante irregularidades del terreno permite comparar sus respuestas. Aquí se plantean dos escenarios de simulación: 1) El robot móvil moviéndose en un camino con montículos y

2) Robot móvil moviéndose en un camino con baches o huecos. Ambos escenarios se modelan mediante las adecuadas parametrizaciones de las Ecuaciones (55) y (56). Las variables a analizar en las diferentes simulaciones son la aceleración de los ángulos de pitch y roll y la variación en Z de la masa suspendida.

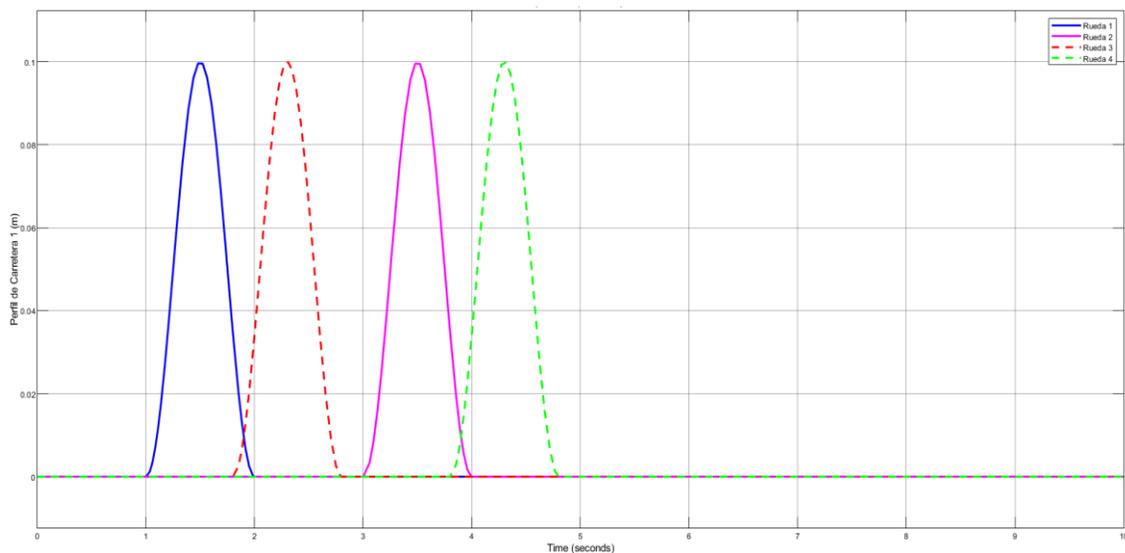
Simulación Escenario 1. En la Figura 14 se muestra el entorno virtual del escenario 1 donde los montículos son emulados virtualmente mediante la siguiente parametrización de las Ecuaciones (55) y (56): $\lambda=1\text{m}$; $v = 1\text{m/s}$ y $h = 0.1\text{m}$. El tiempo de inicio de interacción entre un montículo y una rueda no es igual para todas las ruedas del robot. La rueda 1 inicia a 1s, la rueda 2 a 3s, la rueda 3 a 6s y para la rueda 4 a 8s (Figura 15).

Figura 14: Entorno de simulación escenario 1, con montículos.



Fuente: Elaboración Propia

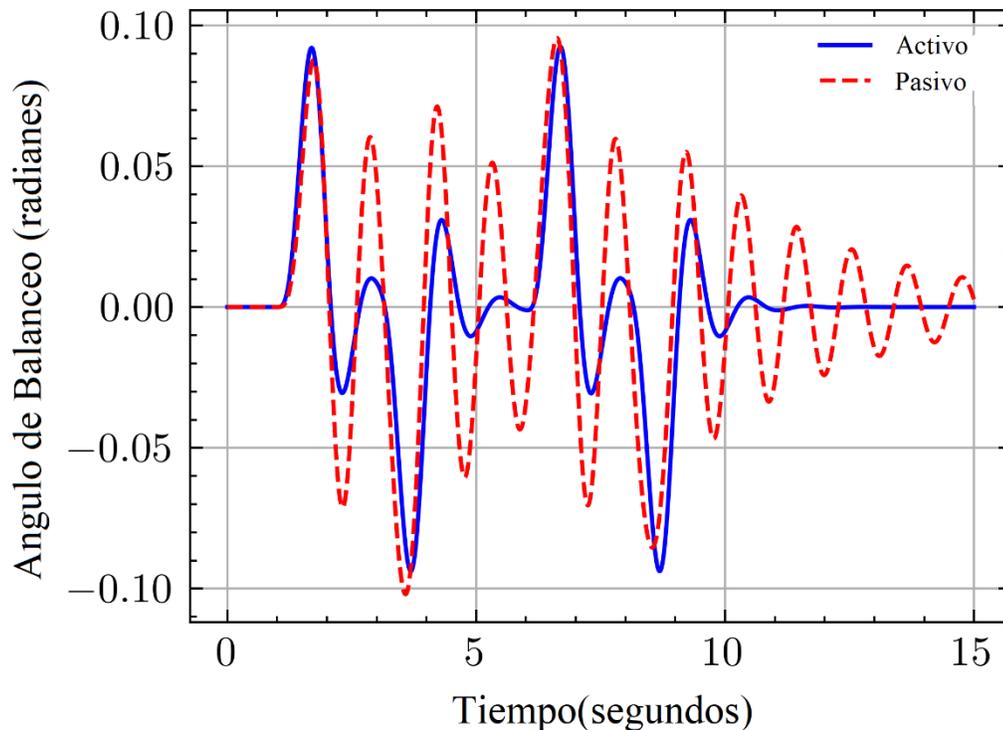
Figura 15: Perfil de Carretera 1 para las 4 ruedas en la simulación del escenario 1.



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 16 se muestra la respuesta del ángulo de balanceo tanto para el caso de suspensión pasiva (línea roja entre cortada) como para el caso de suspensión activa (línea turquesa). El tiempo de estabilización en el caso activo se logra a los 15 segundos mientras que en caso pasivo en este periodo de tiempo aún sigue oscilando con una pronunciada amplitud.

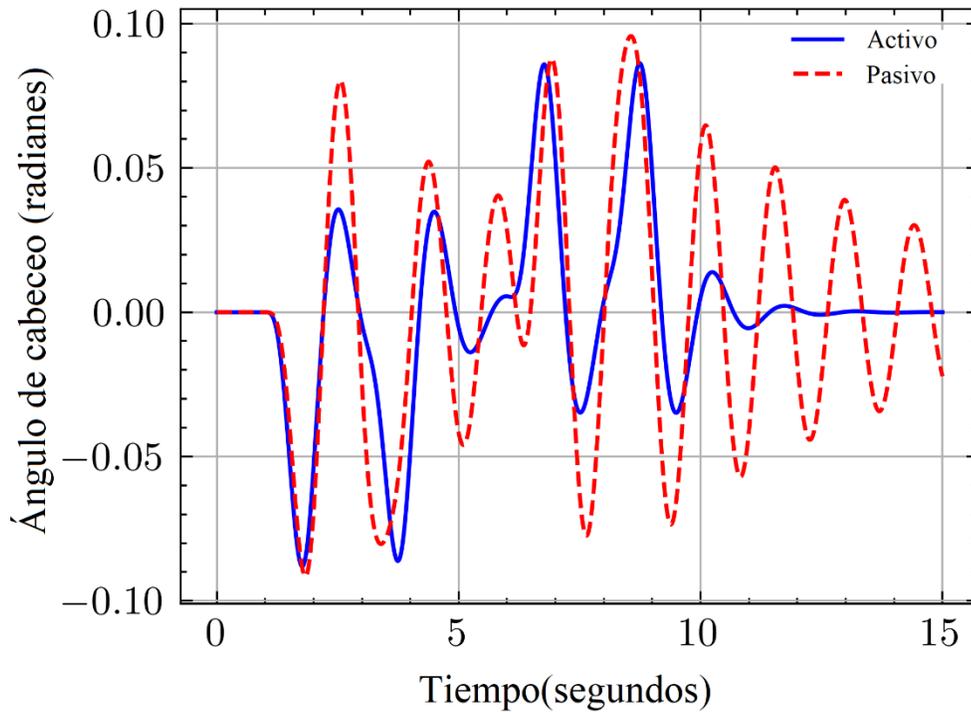
Figura 16: *Angulo de Balanceo en suspensión Pasiva y en suspensión Activa en simulación 1.*



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 17 se muestra la respuesta del ángulo de cabeceo para ambos casos. Donde el tiempo de estabilización es mejor en la suspensión activa. Sin embargo, la suspensión activa presenta picos más elevados debido a los altos valores de la matriz Q del control LQR que gana rapidez de respuesta a costa de una mayor amplitud en su reacción. Aquí se considera que los efectos no deseados de estos picos son absorbidos sin problema por la robustez y estabilidad de la estructura mecánica del robot móvil y por la correcta elección de los elementos del sistema suspensor.

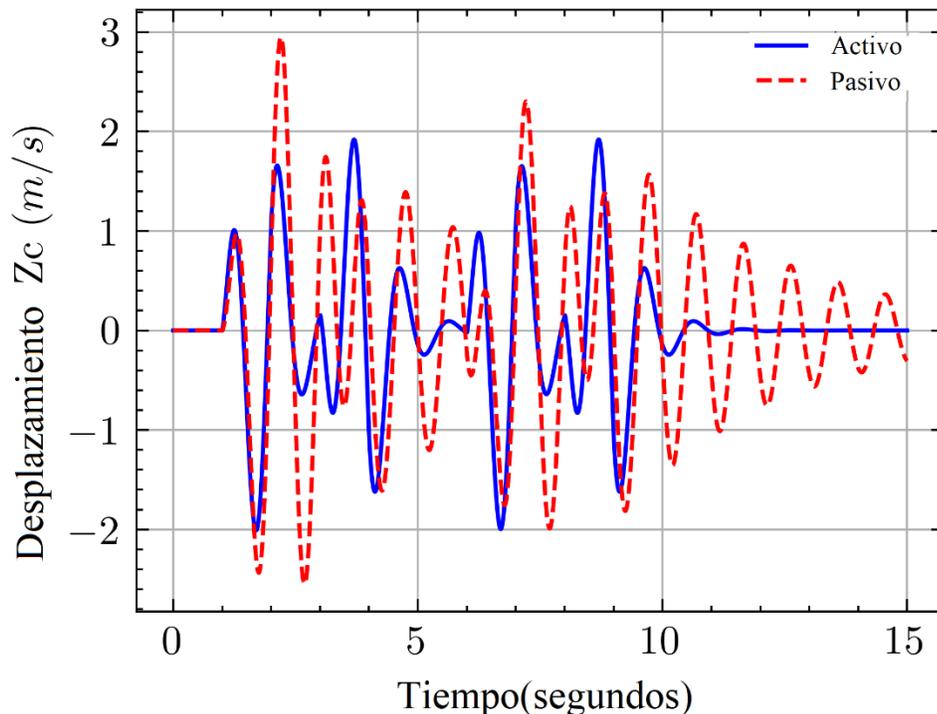
Figura 17: *Angulo de Cabeceo en suspensión Pasiva vs Activa, para Simulación 1.*



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 18 se muestra el comportamiento del desplazamiento vertical Z, para ambos casos de suspensión, donde la respuesta mantiene la dinámica mostrada para las dos variables previas de interés.

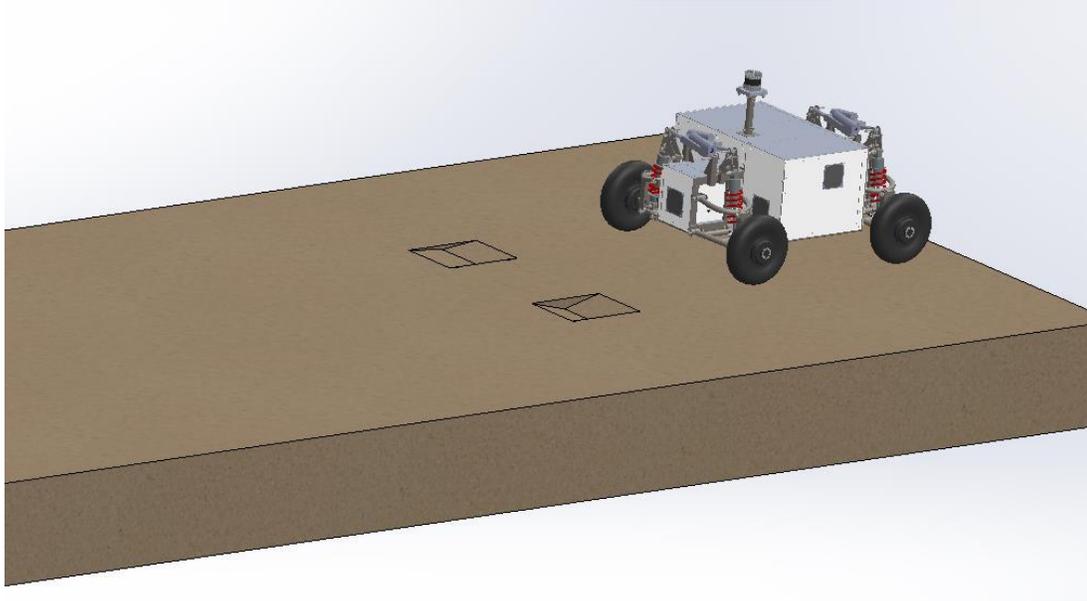
Figura 18: *Desplazamiento de Zc para Suspensión Pasiva y Activa, Simulación 1.*



Fuente: Elaboración Propia

Simulación Escenario 2. Aquí se emulan desniveles hacia el interior del terreno (baches o huecos) tal como se muestra en la Figura 19.

Figura 19: Entorno de simulación 2, con desniveles tipo huecos o baches.



Fuente: Elaboración Propia

Aquí los baches o huecos son emulados virtualmente mediante la siguiente parametrización de las Ecuaciones (55) y (56): $\lambda=1\text{m}$; $v = 1\text{m/s}$ y la altura del bache y los tiempos de interacción con cada rueda están dadas en la Tabla 5 (Figura 20).

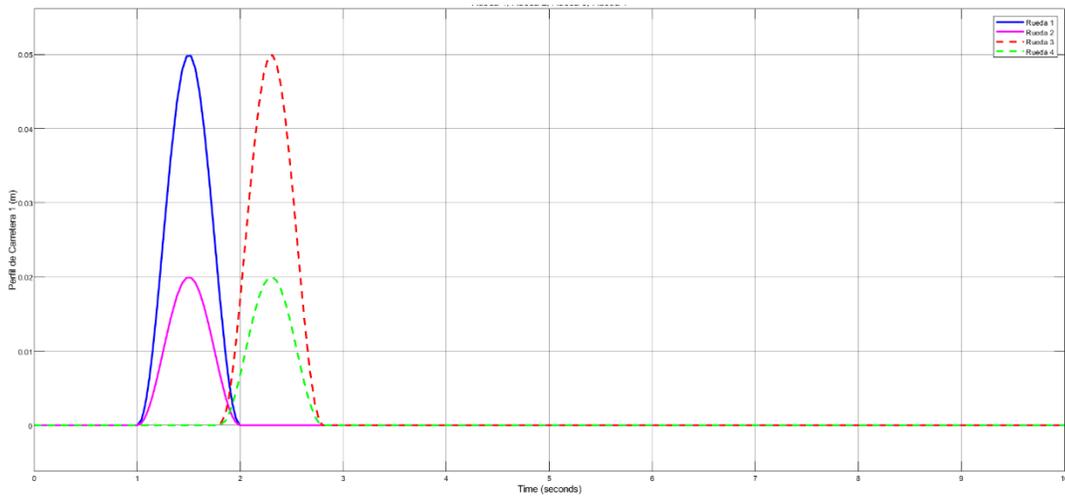
Tabla 5

Parámetros de inicio para el perfil de carretera 2.

	Altura del bache	Tiempo de inicio bache
Rueda 1	-0.05m	1s
Rueda 2	-0.02m	1s
Rueda 3	-0.05m	1.8s
Rueda 4	-0.02m	1.8s

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 20: Perfil de Carretera para las 4 ruedas en Simulación 2.

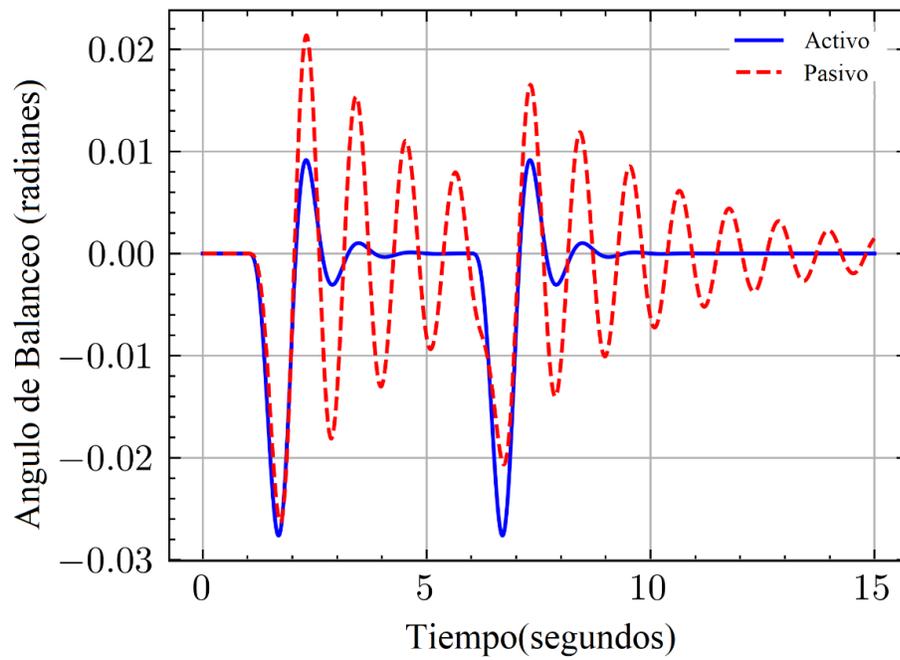


Fuente: Elaboración Propia

Al igual que en el escenario de Simulación 1, aquí también se observa que en todas las variables de interés la respuesta de la suspensión activa alcanza la estabilidad en un menor tiempo y con menor amplitud en el periodo de oscilaciones.

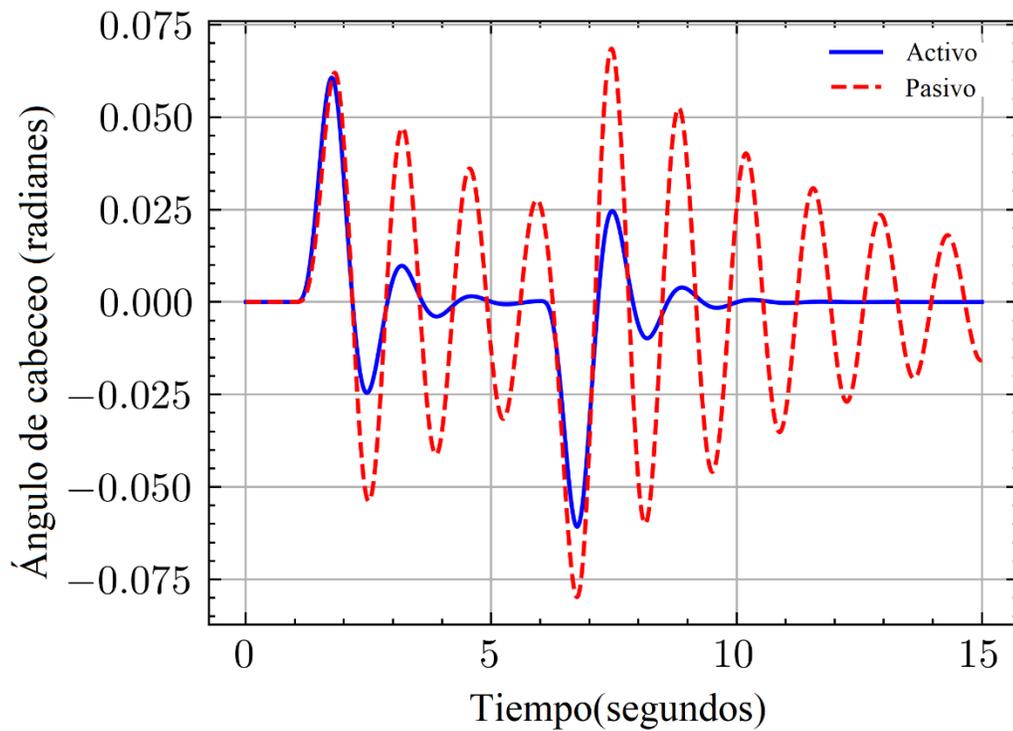
En la Figura 21 se muestra los resultados de la simulación del ángulo de balanceo donde el tiempo de estabilización se alcanza a los 10 segundos, nótese que la amplitud del sistema activo es menor también en amplitud que el pasivo. En la Figura 22 se muestra los resultados del ángulo de cabeceo con igual comportamiento que en la variable anterior. En la Figura 23 se muestra la simulación del desplazamiento vertical Z_c , que se estabiliza en menos de 10 segundos en la suspensión activa.

Figura 21: *Angulo de Balanceo para Suspensión Pasiva vs Activa, Simulación 2.*



Fuente: Elaboración Propia

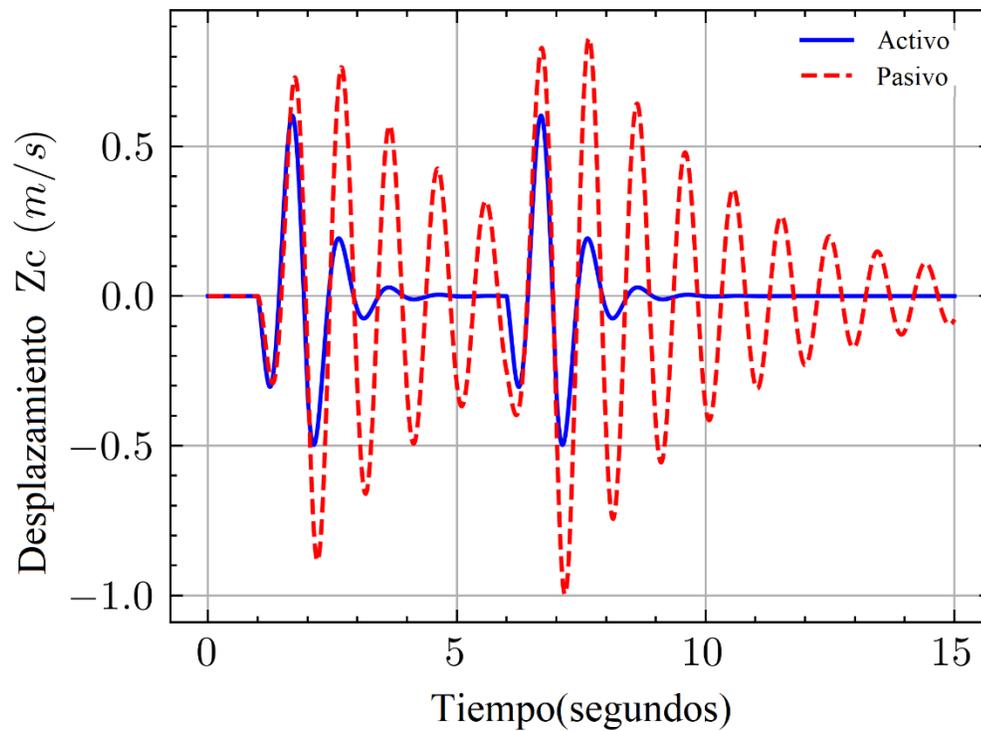
Figura 22: *Angulo de Cabeceo para Suspensión Pasiva vs Activa, Simulación 2.*



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a las diferentes respuestas de las simulaciones del sistema robótico con o sin suspensión activa, se valida la propuesta de usar un control LQR, dado que mejora el comportamiento de las variables pitch, roll y el desplazamiento vertical Z_c del centro de gravedad.

Figura 23: Desplazamiento de Z_c para Suspensión Pasiva vs Activa, Simulación 2.



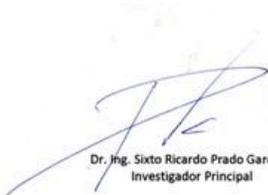
Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

*“El hombre más poderoso es aquel que es
totalmente dueño de sí mismo”*

Aristóteles.


Dr. Jhg. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal



CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

La investigación se propuso alcanzar varios objetivos específicos, entre ellos, determinar el modelo cinemático del robot móvil con suspensión activa y desarrollar un algoritmo de control basado en el método LQR. En este sentido, los resultados han sido altamente satisfactorios. El modelo cinemático propuesto ha demostrado ser efectivo para describir la interacción entre el sistema de suspensión activa y el movimiento del robot.

El algoritmo LQR implementado ha demostrado su eficacia en la regulación de la suspensión activa. La elección de los valores de Q y R se mostró crucial, y la comparación con un sistema pasivo en diferentes escenarios evidenció la mejora significativa en términos de estabilidad y tiempo de respuesta.

El uso del modelo de espacio de estados implementado en el software de Simulink, permitió validar la estrategia de control utilizada, e interactuar rápidamente con los escenarios 2 propuestos. Además, el uso de Matlab/Simulink facilitó la visualización y manipulación de las respuestas obtenidas para los parámetros de estudio (ángulo de balanceo, cabeceo y desplazamiento de Z_c).

Al realizar el análisis comparativo entre el comportamiento de la suspensión pasiva la suspensión activa con control LQR. Para ello, se opera los datos obtenidos previamente, la primera comparativa se obtuvo al realizar la sumatoria de las diferencias entre el valor actual y el valor deseado (estabilización) y calcular la diferencia porcentual entre los valores de la suspensión pasiva y la respuesta de la suspensión activa utilizando el control LQR. Los porcentajes de mejora, según la data obtenida en la simulación se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Porcentaje de Mejora de la suspensión con control activo frente a la suspensión pasiva para los dos casos simulados.

PARÁMETRO	PORCENTAJE DE MEJORA	
	ENTORNO 1	ENTORNO 2
Ángulo Roll	40.68%	52.02%
Ángulo Pitch	39.47%	56.97%
Desplazamiento Vertical Z_c	37.73%	61.03%

Nota. Fuente: Elaboración Propia

La segunda comparativa se realizó usando la prueba de T Student, donde se consideró el nivel de significancia de 5%. También, se definió la hipótesis nula que indica que las medias son iguales, y la hipótesis alterna define que la media de la respuesta de la suspensión activa es menor a la respuesta de la suspensión pasiva. Con ello, se obtuvieron los valores del estadístico de prueba y el P valor, cómo se muestran en la Tabla 7.

De la prueba realizada podemos concluir, que primero se rechaza la hipótesis nula adoptando la hipótesis alterna, y que el control desarrollado presenta una mejora significativa, ya que el P valor para todos los parámetros de estudio son menores que el nivel de significancia de 0.05 (5%).

Tabla 7

Parámetros estadísticos de la prueba T Student para evaluar la mejora de la suspensión con control activo frente a la suspensión pasiva.

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	PARÁMETRO DE ESTUDIO		
	ANGULO DE BALANCEO	ANGULO DE CABECEO	DESPLAZAMIENTO DE Z_c
Estadístico de Prueba t	2.1178	2.2952	3.3222
P valor	0.0172	0.0109	0.00046

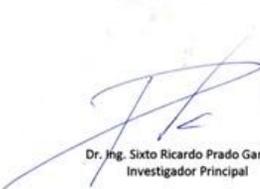
Nota. Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

“Haz sólo lo que amas y serás feliz, y el que hace lo que ama está benditamente condenado al éxito, que llegará cuando deba llegar, porque lo que debe ser, será; y llegará naturalmente”

Facundo Cabral.



Dr. Ing. Sixto Ricardo Prado Gardini
Investigador Principal

CONCLUSIONES

La presente investigación tiene como objetivo principal desarrollar un algoritmo de control LQR en un entorno MATLAB/Simulink para mejorar la respuesta de la suspensión de un robot móvil aplicable en fundo agrícola de la Región La Libertad-Perú. Se ha logrado cumplir con los siguientes objetivos específicos de la investigación.

- Se obtuvo el modelo cinemático del robot móvil con suspensión activa para identificar los estados del robot en el algoritmo de control, con el uso de distintos métodos numéricos para linealizar el modelo.
- Con el uso del modelo del espacio de estados se realizó la implementación del algoritmo LQR en MATLAB, para determinar las ganancias y parámetros necesarios para el control de la suspensión activa del robot.
- En el entorno de Simulink, se introdujo el modelo del robot considerando el modelo de suspensión pasiva (sin intervención del actuador) y el modelo de suspensión activa (con intervención del actuador), obteniendo datos y gráficas de la respuesta de los parámetros de estudio (ángulos de balanceo, cabeceo y desplazamiento de Z_c) para cada uno de los casos.
- Por medio del análisis comparativo entre el comportamiento de la suspensión pasiva la suspensión activa con control LQR, se pudo determinar que el control LQR presenta una mejora significativa de la respuesta de los parámetros de estudio, obteniendo mejoras desde el 37% hasta el 61%.

RECOMENDACIONES

El trabajo realizado, puede ser considerado como un punto de partida para la aplicación, diseño, control y análisis de los sistemas de suspensión para robots móviles y sobre todo su aplicación para terrenos agrícolas que presentan distintas irregularidades. Por lo cual, considerando la importancia y los resultados obtenidos en la investigación, se proponen las siguientes recomendaciones

- Para futuros proyectos, se recomienda implementar el controlador desarrollado y validado por simulación, en el robot del laboratorio Labinm-Upao.
- Comparar por medio de simulación otra alternativa al control LQR para el sistema de suspensión activa, como, por ejemplo, control difuso, control por modos deslizantes, control neuronal, etc.
- Mejorar la sintonización de las ganancias de Q y R, mediante el uso de algoritmos genéticos como pueden ser el algoritmo de enjambre de partículas (PSO) o el algoritmo de colonia de abeja artificial (ABC).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ángel A. Rodríguez A., John A. Figueredo L., & Juan A. Chica G. (2019). *DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA: Vol. I* (Edgar Serna M. (ed.); IV). Instituto Antioqueño de Investigación.
- Attia, T. (2018). *Design and Development of a Novel Reconfigurable Wheeled Robot for Off-Road Applications Design and Development of a Novel Reconfigurable Wheeled Robot for Off-Road Applications*. 1–120.
- Benalcazar, L. (2022). *Diseño y Simulación de tres Técnicas de Control basadas en SMC para el seguimiento de Trayectorias en el robot Pioneer 3DX utilizando COPPELIASIM-SIMULINK*.
- Cornejo, J., Palomares, R., Hernandez, M., Magallanes, D., & Gutierrez, S. (2022). *Mechatronics Design and Kinematic Simulation of a Tripteron Cartesian-Parallel Agricultural Robot Mounted on 4-Wheeled Mobile Platform to Perform Seed Sowing Activity. 2022 1st International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies, ICEEICT 2022*.
<https://doi.org/10.1109/ICEEICT53079.2022.9768422>
- Council for Agricultural Science and Technology. (2020). *Ground and Aerial Robots for Agricultural Production : Opportunities and Challenges. Biological Systems Engineering: Papers and Publication, I(70)*.
<https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/727/>
- Crisologo Salazar, V. D., Llontop Gonzales, A. E., & Tello Preciado, D. J. (2021). *Plan de Negocio para la producción y exportación de arándano cultivado en el distrito de Cascas, La Libertad, hacia la Unión Europea* (Issue 1996).
- De Miguel Lázaro, O. (2017). *Diseño e implementación de algoritmos de control en robots humanoides*. <http://addi.ehu.es/handle/10810/23168>
- Goncalves Da Silva, G. R., Bazanella, A. S., Lorenzini, C., & Campestrini, L. (2019). *Data-Driven LQR Control Design. IEEE Control Systems Letters, 3(1)*, 180–185.
<https://doi.org/10.1109/LCSYS.2018.2868183>
- González Jiménez, J., & Ollero Baturone, A. (2015). *Estimación de la Posición de un Robot Móvil. In Contributions to tabular Reinforcement Learning for multiple*

- Robotics Tasks View project GRIFFIN ERC Advanced Grant View project.*
<https://www.researchgate.net/publication/267222718>
- Hamed, M., Tesfa, B., Gu, F., & Ball, A. D. (2015). Vehicle Suspension Performance Analysis Based on Full Vehicle Model for Condition Monitoring Development. *Mechanisms and Machine Science*, 23, 495–505. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09918-7>
- Horri, N., & Pietraszko, M. (2022). A Tutorial and Review on Flight Control Co-Simulation Using Matlab/Simulink and Flight Simulators. *Automation*, 3(3), 486–510. <https://doi.org/10.3390/automation3030025>
- Hurel Ezeta, J., Mandow, A., & Garcia Cerezo, A. (2013). Los sistemas de suspension activa y semiactiva: Una revision. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 10(2), 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.03.002>
- Hurel, J. (2015). *Modelado analítico y control inteligente de un sistema de suspensión activa para un cuarto de vehículo* (Issue October 2013) [Universidad de Malaga]. <https://doi.org/10.13140/RG.2>
- Jiang, H., Xu, G., Zeng, W., Gao, F., & Chong, K. (2019). Lateral stability of a mobile robot utilizing an active adjustable suspension. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(20), 1–19. <https://doi.org/10.3390/app9204410>
- Marcoantonio Alamo-Viera. (2016). *Modelación y control de un sistema de suspensión semiactiva con amortiguador magnetorreológico*. Universidad de Piura.
- Mathworks. (2023a). *Crear un modelo simple*.
<https://la.mathworks.com/help/simulink/gs/create-a-simple-model.html>
- Mathworks. (2023b). *MATLAB*. The MathWorks, Inc.
<https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Mathworks. (2023c). *Simulink*. Simulink Para El Diseño Basado En Modelos.
<https://la.mathworks.com/products/simulink.html>
- Mohammadikia, R., & Aliasghary, M. (2019). Design of an interval type-2 fractional order fuzzy controller for a tractor active suspension system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105049. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.105049>
- MOUSSADEK, E., & MOUFFOK, R. F. (2022). *An Overview of Control Technics for Inverted Pendulum*.

- Nguyen, M. L., Tran, T. T. H., Nguyen, T. A., Nguyen, D. N., & Dang, N. D. (2022). Application of MIMO Control Algorithm for Active Suspension System: A New Model with 5 State Variables. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 19(2). <https://doi.org/10.1590/1679-78256992>
- Ni, L., Ma, F., & Wu, L. (2020). Posture Control of a Four-Wheel-Legged Robot with a Suspension System. *IEEE Access*, 8, 152790–152804. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3017662>
- Ponce, L. (2021). *Integración De Un Sistema De Control Y Monitoreo De Un Grupo De Robots Móviles Terrestres Basado En Visión Artificial Y Enfocado Al Mapeo Y Navegación Dentro De Un Área De Trabajo Provista De Obstaculos.*
- Raj, R., & Kos, A. (2022). A Comprehensive Study of Mobile Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/app12146951>
- Reque, A. M., Garay, E. F., Cornejo, J., & Palomares, R. (2021). Mechatronics Design and Kinematic Analysis of Mecanum Wheeled Mobile Robot for Covid-19 Disinfection with UV Rays applied on Indoor Environments. *Proceedings of the 2021 IEEE Sciences and Humanities International Research Conference, SHIRCON 2021.* <https://doi.org/10.1109/SHIRCON53068.2021.9652305>
- SENASA. (2021). *Primera región productora de arándanos del Perú inició campaña de exportación 2021 – 2022.* <https://www.senasa.gob.pe/senasacontigo/la-libertad-primera-region-productora-de-arandanos-inicio-con-exito-campana-de-exportacion-2021-2022/>
- Shakeer, S., Ramesh, K., Dastagiri, G. V., & Mouneswar, S. (2022). *RESEARCH IN ENGINEERING MANAGEMENT DESPITE NON - UNIFORM MOTION BLUR , ILLUMINATION , AND NOISE , FACE RECOGNITION.* 25–29.
- Sir Elkhatem, A., & Naci Engin, S. (2022). Robust LQR and LQR-PI control strategies based on adaptive weighting matrix selection for a UAV position and attitude tracking control. *Alexandria Engineering Journal*, 61(8), 6275–6292. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.057>
- Tomás Jover, R., Bañón Blázquez, L., & Ferreiro Prieto, J. (2004). La Estabilidad Del Vehículo En Las Curvas : Aspectos Geométricos Y Su Influencia en el Coeficiente de

Seguridad. *XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, 1–10.

Twum-darko, C. M., & Town, C. (2013). *CPUT Copyright Information The dissertation may not be published either in part (in scholarly, scientific or technical journals) or as a whole (as a monograph), unless permission has been obtained from the university.* November, 2015.

William Honorio, T. P. (2022). *ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN CONTROL LQR Y UN CONTROL CLÁSICO EN UN CONVERTIDOR BOOST MEDIANTE UNA SIMULACIÓN EN SIMULINK DE MATLAB.*

[http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/11207/2/04 MAUT 142 TRABAJO GRADO.pdf](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/11207/2/04%20MAUT%20142%20TRABAJO%20GRADO.pdf)

Xinhuai, G., Mingchun, L., & Meihua, X. (2020). *概1* (1. 20–27).

ANEXOS

ANEXO 1

Función Newton-Raphson de Matlab para realizar la síntesis de mecanismos de la suspensión del robot.

```
function y=newtonR(v, X)
t2=v;
r1a=28;
r1b=18;
r2=10;
r3=34;
r4a=13;
r4b=21;
r5=8;
r6=22;
i=1;
while i<10
t3=X(1);
t4=X(2);
t5=X(3);
t6=X(4);
Fx=[r2*cosd(t2)+r3*cosd(t3)-
r4a*cosd(t4);r2*sind(t2)+r3*sind(t3)+r1a-
r4a*sind(t4);r6*cosd(t6)+r5*cosd(t5)-
r4b*cosd(t4);r6*sind(t6)+r5*sind(t5)+r1b-r4b*sind(t4)];
JF=[-r3*sind(t3) r4a*sind(t4) 0 0;r3*cosd(t3) -
r4a*cosd(t4) 0 0;0 r4b*sind(t4) -r5*sind(t5) -
r6*sind(t6);0 -r4b*cosd(t4) r5*cosd(t5) r6*cosd(t6)];
Xant=[X(1)*pi/180;X(2)*pi/180;X(3)*pi/180;X(4)];
X=Xant-inv(JF)*Fx;
X=[X(1)*180/pi;X(2)*180/pi;X(3)*180/pi;X(4)*180/pi];
i=i+1;
end
y=X(2);
```

ANEXO 2

Script Odom (Odometría) que permite hallar el modelo cinemático de la suspensión del robot.

```
clc
close all
clear;

r=13;
x0=-26;
y0=9;
a=53:100;
b=53;
for i=1:length(a)
l(i)=sqrt((r*cosd(a(i))-x0)^2+(r*sind(a(i))-y0)^2);
end
t2=a-b;
for i=1:length(a)
X=[280;340;270;350];
m(i)=newtonR(t2(i), X);
%n(:,i)=m;
end
%t4=n(2,:);
t4=m;
x4=21*cosd(t4);
y4r=21*sind(t4);
y4=-28+y4r;
wt=x4-(x0/2);
h=abs(y4-y0);
h1=h';
wt1=wt';
a1=a';
l1=l';
B1=polyfit(l1,h1,3);
B2=polyfit(l1,wt1,3);
A1=polyval(B1,l1);
A2=polyval(B2,l1);
figure(1)
plot(l1,A1)
figure(2)
A1=polyval(B1,l1);
plot(l1,A2)
```

ANEXO 3

Valores de las Matrices A, B y E.

Ecuación de espacios de estados del sistema.

$$\dot{X}(t) = A * X(t) + B * F(t) + E * Zr(t)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 & A_7 & A_8 \\ A_9 & A_{10} & A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \end{bmatrix}^T$$

$$B = [B_1 \ B_2 \ B_3]^T$$

$$E = [E_1 \ E_2]^T$$

Y los valores de las matrices A, B y E son:

$$A_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A_5 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A_6 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

$$A_7 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$A_8 = \left[\frac{2 * w^2(-k_f - k_r)}{I_r} \ 0 \ 0 \ \frac{-1}{I_r} \ \frac{-1}{I_r} \ \frac{-1}{I_r} \ \frac{-1}{I_r} \ \frac{2 * w^2(-C_f - C_r)}{I_r} \ 0 \ 0 \ \frac{-1}{I_r} \ \frac{-1}{I_r} \ \frac{-1}{I_r} \ \frac{-1}{I_r} \right]$$

$$A_9 = \left[0 \ \frac{2(-k_f * a^2 - k_r * b^2)}{I_p} \ \frac{2(-k_f * a + k_r * b)}{I_p} \ \frac{-1}{I_p} \ \frac{-1}{I_p} \ \frac{-1}{I_p} \ \frac{-1}{I_p} \right]$$

$$0 \ \frac{2(-C_f * a^2 - C_r * b^2)}{I_p} \ \frac{2(-C_f * a + C_r * b)}{I_p} \ \frac{-1}{I_p} \ \frac{-1}{I_p} \ \frac{-1}{I_p} \ \frac{-1}{I_p} \right]$$

$$A_{10} = \left[0 \ \frac{2(-k_f * a + k_r * b)}{m_s} \ \frac{2(-k_f - k_r)}{m_s} \ \frac{-1}{m_s} \ \frac{-1}{m_s} \ \frac{-1}{m_s} \ \frac{-1}{m_s} \right]$$

$$0 \ \frac{2(-C_f * a + C_r * b)}{m_s} \ \frac{2(-C_f - C_r)}{m_s} \ \frac{-1}{m_s} \ \frac{-1}{m_s} \ \frac{-1}{m_s} \ \frac{-1}{m_s} \right]$$

$$A_{11} = \left[\frac{k_f * w}{m_f} \ \frac{k_f * a}{m_f} \ \frac{k_f}{m_f} \ \frac{-1 - k_t}{m_f} \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{C_f * w}{m_f} \ \frac{C_f * a}{m_f} \ \frac{C_f}{m_f} \ \frac{-1}{m_f} \ 0 \ 0 \ 0 \right]$$

$$A_{12} = \left[\frac{-k_f * w}{m_f} \quad \frac{k_f * a}{m_f} \quad \frac{k_f}{m_f} \quad 0 \quad \frac{-1 - k_t}{m_f} \quad 0 \quad 0 \quad \frac{-C_f * w}{m_f} \quad \frac{C_f * a}{m_f} \quad \frac{C_f}{m_f} \quad 0 \quad \frac{-1}{m_f} \quad 0 \quad 0 \right]$$

$$A_{13} = \left[\frac{k_r * w}{m_r} \quad \frac{-k_r * b}{m_r} \quad \frac{k_r}{m_r} \quad 0 \quad 0 \quad \frac{-1 - k_t}{m_r} \quad 0 \quad \frac{C_r * w}{m_r} \quad \frac{-C_r * b}{m_r} \quad \frac{C_r}{m_r} \quad 0 \quad 0 \quad \frac{-1}{m_r} \quad 0 \right]$$

$$A_{14} = \left[\frac{-k_r * w}{m_r} \quad \frac{-k_r * b}{m_r} \quad \frac{k_r}{m_r} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{-1 - k_t}{m_r} \quad \frac{-C_r * w}{m_r} \quad \frac{-C_r * b}{m_r} \quad \frac{C_r}{m_r} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{-1}{m_r} \right]$$

$$B_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} w & -w & w & -w \\ I_r & I_r & I_r & I_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & a & -b & -b \\ I_p & I_p & I_p & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ m_s & m_s & m_s & m_s \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} -1 \\ m_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & m_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & m_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & m_r \end{bmatrix}$$

$$E_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0] [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} k_t \\ m_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & k_t \\ 0 & m_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & k_t \\ 0 & m_r \end{bmatrix}$$

ANEXO 4

Script de Control LQR en Matlab para suspensión activa del robot móvil.

```
%hold on
clc
close all
clear

m=1200; %Masa suspendida del vehiculo
mwf=60; %Masa sin suspender de la rueda
mwr=60; %Masa sin suspender de la rueda
Ip=950; %Momento de Inercia Pitch
Ir=4000; %Momento de Inercia Roll
Ksf=25000; %K de suspensión delantera
Ksr=25000; %K de suspensión trasera
Csf=1000; %C de suspensión delantera
Csr=1000; %C de suspensión trasera
Kw=30000; %K de rueda
wf=1; %ancho entre ruedas delanteras
wr=1; %ancho entre ruedas delanteras
a=1.5; %distancia a ruedas delanteras
b=1.5; %distancia a ruedas delanteras

A1=zeros(7);
A2=eye(7);
A3=[-2*Ksf*wf^2/Ir-2*Ksr*wr^2/Ir 0 0 wf*Ksf/Ir -
wf*Ksf/Ir wr*Ksr/Ir -wr*Ksr/Ir -2*Csf*wf^2/Ir-
2*Csr*wr^2/Ir 0 0 Csf*wf/Ir -Csf*wf/Ir Csr*wr/Ir -
Csr*wr/Ir];
A4=[0 -2*Ksf*a^2/Ip-2*Ksr*b^2/Ip 2*Ksf*a/Ip-2*Ksr*b/Ip
-Ksf*a/Ip -Ksf*a/Ip Ksr*b/Ip Ksr*b/Ip 0 -2*Csf*a^2/Ip-
2*Csr*b^2/Ip 2*Csf*a/Ip-2*Csr*b/Ip -Csf*a/Ip -Csf*a/Ip
Csr*b/Ip Csr*b/Ip];
A5=[0 2*Ksf*a/m-2*Ksr*b/m -2*Ksf/m-2*Ksr/m Ksf/m Ksf/m
Ksr/m Ksr/m 0 2*Csf*a/m-2*Csr*b/m -2*Csf/m-2*Csr/m
Csf/m Csf/m Csr/m Csr/m];
A6=[Ksf*wf/mwf -Ksf*a/mwf Ksf/mwf -Ksf/mwf-Kw/mwf 0 0
0 Csf*wf/mwf -Csf*a/mwf Csf/mwf -Csf/mwf 0 0 0];
A7=[-Ksf*wf/mwf -Ksf*a/mwf Ksf/mwf 0 -Ksf/mwf-Kw/mwf 0
0 -Csf*wf/mwf -Csf*a/mwf Csf/mwf 0 -Csf/mwf 0 0];
A8=[Ksr*wr/mwr Ksr*b/mwr Ksr/mwr 0 0 -Ksr/mwr-Kw/mwr 0
Csr*wr/mwr Csr*b/mwr Csr/mwr 0 0 -Csr/mwr 0];
A9=[-Ksr*wr/mwr Ksr*b/mwr Ksr/mwr 0 0 0 -Ksr/mwr-
Kw/mwr -Csr*wr/mwr Csr*b/mwr Csr/mwr 0 0 0 -Csr/mwr];
B1=zeros([7 4]);
B2=1/Ir*[wf -wf wr -wr];
```

```

B3=1/Ip*[-a -a b b];
B4=1/m*[1 1 1 1];
B5=[-1/mwf 0 0 0;0 -1/mwf 0 0;0 0 -1/mwr 0;0 0 0 -
1/mwr];
F1=zeros([10 4]);
F2=[Kw/mwf 0 0 0;0 Kw/mwf 0 0;0 0 Kw/mwr 0;0 0 0
Kw/mwr];
A= [A1 A2;A3;A4;A5;A6;A7;A8;A9];
B= [B1;B2;B3;B4;B5];
F= [F1;F2];
C= [A3;A4;A5];
D= [B2;B3;B4];

planta= ss(A,B,C,D);
controlable=ctrb(A,B);
%t= 0:0.01:2;
step(planta)
Q=10^6*eye(14);
R=0.1*eye(4);
%Ecuación de Ricatti
P=care(A,B,Q, R);
%k realimentación
k=inv(R)*B'*P;
kp=lqr(A,B,Q,R);
figure(2)

step(ss(A-B*k,B,C,D))
eig(A-B*k)
%-----

```