

Handbook T-I

Proyectos de Ingeniería Aplicada

GUDIÑO-LAU, Jorge

HERNÁNDEZ-BARÓN, Eduardo

CHARRE-IBARRA, Saida

ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth

DURAN-FONSECA, Miguel

Coordinadores

ECORFAN®

Coordinadores

GUDIÑO-LAU, Jorge. PhD
HERNÁNDEZ-BARÓN, Eduardo. PhD
CHARRE-IBARRA, Saida. PhD
ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth. PhD
DURAN-FONSECA, Miguel. PhD

Editor en Jefe

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MSc

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesus. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

ISBN: 978-607-8695-67-6

Sello Editorial ECORFAN: 607-8695

Número de Control HPIA: 2021-10

Clasificación HPIA (2021): 281121-1010

©ECORFAN-México, S.C.

Ninguna parte de este escrito amparado por la Ley Federal de Derechos de Autor, podrá ser reproducida, transmitida o utilizada en cualquier forma o medio, ya sea gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo, pero sin limitarse a lo siguiente: Citas en artículos y comentarios bibliográficos de compilación de datos periodísticos radiofónicos o electrónicos. Para los efectos de los artículos 13, 162,163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169,209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal de Derechos de Autor. Violaciones: Ser obligado al procesamiento bajo ley de copyright mexicana. El uso de nombres descriptivos generales, de nombres registrados, de marcas registradas, en esta publicación no implican, uniformemente en ausencia de una declaración específica, que tales nombres son exentos del protector relevante en leyes y regulaciones de México y por lo tanto libre para el uso general de la comunidad científica internacional. HPIA es parte de los medios de ECORFAN (www.ecorfan.org)

Handbooks

Definición de Handbooks

Objetivos Científicos

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en las Áreas de investigación CONACYT y PRODEP.

ECORFAN-Mexico S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

Alcances, Cobertura y Audiencia

Handbooks es un Producto editado por ECORFAN-Mexico S.C en su Holding con repositorio en México, es una publicación científica arbitrada e indizada. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de las Área de investigación CONACYT y PRODEP respectivamente con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ciencias. El horizonte editorial de ECORFAN-Mexico® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

Consejo Editorial

ROCHA - RANGEL, Enrique. PhD
Oak Ridge National Laboratory

CARBAJAL - DE LA TORRE, Georgina. PhD
Université des Sciences et Technologies de Lille

GUZMÁN - ARENAS, Adolfo. PhD
Institute of Technology

CASTILLO - TÉLLEZ, Beatriz. PhD
University of La Rochelle

FERNANDEZ - ZAYAS, José Luis. PhD
University of Bristol

DECTOR - ESPINOZA, Andrés. PhD
Centro de Microelectrónica de Barcelona

TELOXA - REYES, Julio. PhD
Advanced Technology Center

HERNÁNDEZ - PRIETO, María de Lourdes. PhD
Universidad Gestalt

CENDEJAS - VALDEZ, José Luis. PhD
Universidad Politécnica de Madrid

HERNANDEZ - ESCOBEDO, Quetzalcoatl Cruz. PhD
Universidad Central del Ecuador

Comité Arbitral

URBINA - NAJERA, Argelia Berenice. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

PEREZ - ORNELAS, Felicitas. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

CASTRO - ENCISO, Salvador Fernando. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

CASTAÑÓN - PUGA, Manuel. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

BAUTISTA - SANTOS, Horacio. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

GONZÁLEZ - REYNA, Sheila Esmeralda. PhD
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

RUELAS - SANTOYO, Edgar Augusto. PhD
Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas

HERNÁNDEZ - GÓMEZ, Víctor Hugo. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

OLVERA - MEJÍA, Yair Félix. PhD
Instituto Politécnico Nacional

CUAYA - SIMBRO, German. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Cesión de Derechos

El envío de una Obra Científica a ECORFAN Handbooks emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones científicas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.

Declaración de Autoría

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación de la Obra Científica y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor de la Obra Científica.

Detección de Plagio

Todas las Obras Científicas serán testeadas por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandará a arbitraje y se rescindirá de la recepción de la Obra Científica notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

Todas las Obras Científicas se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homologo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del ECORFAN Handbooks con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos- Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de la Obra Científica Modificado para Edición-Publicación.

ECORFAN Proyectos de Ingeniería Aplicada

Volumen I

El Handbook ofrecerá los volúmenes de contribuciones seleccionadas de investigadores que contribuyan a la actividad de difusión científica de la Universidad de Colima para su área de investigación en la función de la Universidad ante los retos de la Sociedad del Conocimiento. Además de tener una evaluación total, en las manos de los directores de la Universidad de Colima una evaluación total, en las manos de los directores se colabora con calidad y puntualidad en sus capítulos, cada contribución individual fue arbitrada a estándares internacionales (RESEARCH GATE, MENDELEY, GOOGLE SCHOLAR y REDIB), el Handbook propone así a la comunidad académica, los informes recientes sobre los nuevos progresos en las áreas más interesantes y prometedoras de investigación en función de la Universidad ante los retos de la Sociedad del Conocimiento.

Gudiño-Lau, Jorge
Hernández-Barón, Eduardo
Charre-Ibarra, Saida
Alcalá-Rodríguez, Janeth
Duran-Fonseca, Miguel

Coordinadores

Proyectos de Ingeniería Aplicada T-I

Handbooks

Colima, Colima.

Diciembre, 2021

DOI: 10.35429/H.2021.10.1.108

Prefacio

A nivel mundial la aplicación de la ingeniería se ha masificado, en nuestra vida diaria tenemos contacto con dispositivos en los cuales se aplica la ingeniería y que facilitan nuestra vida, así mismo, en el comercio y en la industria no los podríamos concebir sin el uso y aplicación de la ingeniería. Por su puesto, en la docencia e investigación se deben abordar estas temáticas para preparar profesionistas capaces de hacer frente a los retos que afronten en el ejercicio de su profesión.

En este libro “*Proyectos de Ingeniería Aplicada*” se presentan algunos proyectos de investigación desarrollados en la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima en los cuales se hace uso de la ingeniería para elaborar prototipos de uso experimental en los laboratorios del plantel. El desarrollo de estos prototipos implica varias etapas como son análisis, diseño, construcción y pruebas experimentales donde los estudiantes ponen en práctica sus conocimientos de ingeniería.

Los prototipos resultantes son de gran utilidad para la facultad, ya que nos permiten contar con módulos de arquitectura abierta donde posteriormente estudiantes de otras generaciones podrán experimentar y realizar pruebas de diversas estrategias de control. Con esto se cubre la necesidad de equipamiento que en ocasiones no es posible adquirir por instituciones públicas de educación superior debido a su alto costo.

Uno de los proyectos de ingeniería aplicada que se presentan es el *Robot Móvil Omnidireccional con manipulador de 4 grados de libertad* en donde se aplican conocimientos de control, robótica, instrumentación, automatización y teleoperación.

Para el proyecto de ingeniería aplicada *Control de fuerza aplicado al dispositivo háptico omni phantom® en lazo abierto* se desarrolla el modelo cinemático directo e inverso, así como su modelo dinámico. El dispositivo háptico es utilizado en conjunto con un sensor de fuerza.

El proyecto Helicóptero didáctico en arquitectura abierta controlado con lógica difusa presenta el diseño y construcción de un prototipo de arquitectura abierta en el cual se utilizó un controlador difuso para el ángulo de inclinación (cabeceo) y el ángulo de giro (guiñada).

En el proyecto *Desarrollo de un prototipo para detección de metano y su concentración en procesos de generación de energía a partir de biomasa* se presenta el diseño y construcción de un biodigestor para detectar la presencia de metano (CH₄) y cuantificar la concentración de biogás producida por la biomasa propuesta.

Los proyectos de ingeniería pueden ser muy diversos y estar enfocados a diferentes áreas de aplicación, los trabajos presentados en este libro dan muestra de ello y sientan las bases de análisis y diseño para la realización de futuros trabajos en un área de constante cambio como es la ingeniería.

GUDIÑO-LAU, Jorge
HERNÁNDEZ-BARÓN, Eduardo
CHARRE-IBARRA, Saida
ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth
DURAN-FONSECA, Miguel

Contenido

	Página
1 Robot Móvil Omnidireccional con manipulador de 4 grados de libertad VÁZQUEZ-GARCÍA, Ernesto, GUDIÑO-LAU, Jorge, MARTÍNEZ-VALENCIA, Héctor y HERNÁNDEZ-BARÓN, Eduardo	1-22
2 Control de fuerza aplicado al dispositivo háptico OMNI PHANTOM® en lazo abierto AGUILAR-SANCHEZ, Iván, HERNÁNDEZ-BARÓN, Eduardo, DURAN-FONSECA, Miguel y GUDIÑO-LAU, Jorge	23-44
3 Helicóptero didáctico en arquitectura abierta controlado con lógica difusa CHARRE-IBARRA, Saida, PÉREZ-CÁRDENAS, Diego, CASTAÑEDA-VILLAFAÑA, Joanna y ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth	45-65
4 Desarrollo de un prototipo para detección de metano y su concentración en procesos de generación de energía a partir de biomasa PINEDA-CARDENAL, Orlando, ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth, OLIVOS-ORTIZ, Aramis y CHARRE-IBARRA, Saida	66-88

Capítulo 1 Robot Móvil Omnidireccional con manipulador de 4 grados de libertad

Chapter 1 Omnidirectional Mobile Robot with 4 degrees of freedom manipulator

VÁZQUEZ-GARCÍA, Ernesto, GUDIÑO-LAU, Jorge†*, MARTÍNEZ-VALENCIA, Héctor y HERNÁNDEZ-BARÓN, Eduardo

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica, Km. 20.5 Carretera Manzanillo-Barra de Navidad, El Naranjo, Manzanillo, Colima. C.P. 28860

ID 1^{er} Autor: *Ernesto, Vázquez-García* / **ORC ID:** 0000-0002-1405-2675

ID 1^{er} Coautor: *Jorge, Gudiño-Lau* / **ORC ID:** 0000-0002-0585-908X

ID 2^{do} Coautor: *Héctor, Martínez-Valencia* / **ORC ID:** 0000-0001-8790-3955

ID 3^{er} Coautor: *Eduardo, Hernández-Barón* / **ORC ID:** 0000-0001-5600-0075

DOI: 10.35429/H.2021.10.1.22

E. Vázquez, J. Gudiño, H. Martínez y E. Hernández

*jglau@ucol.mx

J. Gudiño, E. Hernández, S. Charre, J. Alcalá y M. Duran (AA. VV.). Proyectos de Ingeniería Aplicada, Ciencia y Tecnología ©ECORFAN- México, 2021.

Abstract

The present thesis presents the analysis, design, manufacture, and control of an omnidirectional robot with a 4 degrees of freedom robotic arm, which is used as an open architecture control module in the Electromechanical Engineering Faculty of the University of Colima, so that the students apply their knowledge about control, robotics, instrumentation, automation, and teleoperation. The robot has the optimal qualities for students to send and receive signals easily through a connection board. In addition, a lineal control applied to the omnidirectional robot is described in detail, using a mobile application, through which students can control the movements of both the omnidirectional robot and the 4 degrees of freedom robotic arm, and observe their response through graphs.

Robot, Omnidirectional, Mobile, Control and manufacture

Resumen

En el presente documento se expone el análisis, diseño, manufactura y control de un robot omnidireccional con brazo robótico articulado de 4 grados de libertad, mismo que se utiliza como un módulo de control de arquitectura abierta en la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima, con el fin de que los estudiantes apliquen sus conocimientos en control, robótica, instrumentación, automatización y teleoperación. El robot posee las cualidades adecuadas para que los estudiantes envíen y reciban señales de manera sencilla a través de una tablilla de conexiones. Además, se describe de forma detallada un control lineal aplicado al robot omnidireccional, utilizando una aplicación móvil, mediante la cual los alumnos pueden controlar los movimientos del carro omnidireccional, así como del brazo robótico de 4 grados de libertad y observar su respuesta en gráficas.

Robot, Omnidireccional, Móvil, Control y manufactura

1. Introducción

El aumento de estudiantes por estudiar el área de Ingeniería Mecatrónica o Ingeniería en Robótica ha ocasionado una gran demanda del uso de equipos especializados y de vanguardia; así como módulos didácticos para el aprendizaje práctico de los estudiantes en diferentes ramas de la ingeniería como mecatrónica, teoría de control, control moderno, control digital, control inteligente, robótica, programación, instrumentación virtual, automatización, entre otras.

Así mismo, la adquisición de equipos robóticos móviles didácticos es difícil debido a sus precios elevados. Uno de los robots móviles para educación e investigación más reconocido es desarrollado por la empresa KUKA® en el 2010, con el robot manipulador industrial de 5 grados de libertad más una pinza mecánica, el robot está montado sobre una plataforma móvil omnidireccional; el sistema completo es conocido como youBot®, como se muestra en la Figura 1. La plataforma móvil omnidireccional tiene la capacidad de montar y desmontar el robot manipulador, además tiene la capacidad de soportar dos manipuladores. El youBot® posee interfaces completamente abiertas y permite a los desarrolladores entrar al sistema en todos los niveles de control de hardware (Alers, *et al*, 2014, Rivero, 2021, Sharma *et al*, 2012, Aitken *et al*, 2016).

Aunado a lo anterior, son pocas las dependencias de Educación Superior en México que no tiene módulos robóticos móviles y además no tienen robots manipuladores en arquitectura abierta, lo que dificulta a los alumnos el aprendizaje de las áreas que comprenden la mecatrónica, otro inconveniente que se tiene que no se puede aplicar cualquier algoritmo de control en robots manipuladores o móviles. Por todo lo anterior, el robot móvil tipo omnidireccional con brazo robótico de 4 grados de libertad presentado en este trabajo, es una opción de bajo costo para resolver los inconvenientes presentados anteriormente (Wenqiang, *et al*, 2019, Zdešar, *et al*, 2017, Mirelez, *et al*, 2015, Ribas-Xirgo, *et al*, 2014).

Figura 1 KUKA youBot – robot móvil omnidireccional



Fuente de Consulta: (Sharma et al, 2012)

El robot móvil tipo omnidireccional con brazo robótico de 4 grados de libertad presentado en este trabajo funciona como módulo práctico para los estudiantes de las áreas de ingeniería, quienes pueden utilizarlo como una plataforma móvil manipuladora de objetos, capaz de desplazarse en todos los sentidos (omnidireccional) y que, gracias a su arquitectura abierta, se le puede aplicar cualquier algoritmo de control. Las entradas y salidas del robot son utilizadas de manera sencilla gracias a una tablilla de conexiones que se conectan al robot de manera alámbrica.

Este trabajo está distribuido de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se describe una introducción a los robots móviles omnidireccionales, así como el objetivo y la justificación del proyecto, en el Capítulo 2 muestra los fundamentos de los robots móviles, características y sus aplicaciones; en el Capítulo 3 se describe el diseño mecánico del robot, el análisis cinemático directo e inverso del brazo robot, así como su validación en SolidWorks® y Matlab®; la construcción de la plataforma móvil, las características del prototipo y las configuraciones de las llantas del robot móvil omnidireccional; son mostrados en el Capítulo 4, los resultados experimentales y una descripción del funcionamiento del prototipo son descritos en el Capítulo 5; en el Capítulo 6 y 7 se presentan los agradecimientos y las conclusiones y el trabajo futuro, respectivamente.

2. Fundamentos de los robots móviles

Los robots móviles más representativa de acuerdo con su sistema de locomoción son: con ruedas/cintas de desplazamiento (diferencial, síncrona, triciclo, ackerman, omnidireccionales y orugas) y con patas (bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc.) (Barrientos, 2007, Barrientos, *et al* 2007a, Barrientos, *et al* 2007b, Ollero, 2001)

La decisión de qué tipo de locomoción utilizar depende de varios factores como lo son: la maniobrabilidad (facilidad en el manejo del robot), controlabilidad (relacionada con las posibles trayectorias que el robot pueda seguir), tracción (tipo de suelo), capacidad de subir pendientes, estabilidad (estabilidad estática y dinámica), eficiencia (tracción vs consumo), mantenimiento y alimentación (batería, gasolina, etc.) e impacto ambiental (motores eléctricos, motores de gasolina, etc.).

En la locomoción de tipo ruedas/cintas de desplazamiento, se pueden encontrar los siguientes tipos:

Ackerman: es un sistema simple de 4 ruedas: las dos traseras se montan de forma paralela en el chasis principal del vehículo, mientras que las ruedas delanteras son del tipo direccionamiento, y se utilizan para seguir la trayectoria del robot, como se observa en la Figura 2a. Es muy sencillo de implementar, sin embargo, el mayor problema de este tipo de locomoción es su limitación en la maniobrabilidad.

Triciclo tiene buena estabilidad y es mecánicamente más simple que otros tipos de locomoción. La rueda direccional no es motriz (puede ser una rueda loca), y no es necesario controlar la velocidad de las ruedas para que el robot se mantenga recto, ver la Figura 2b.

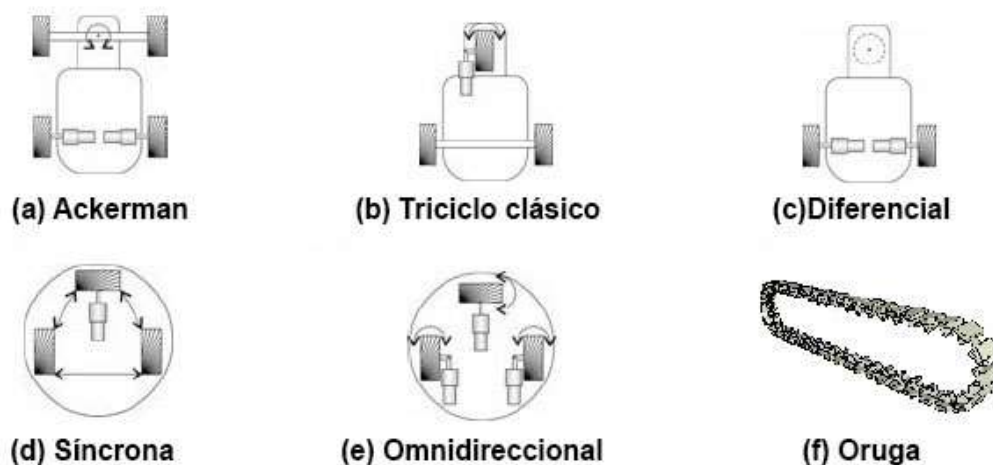
Diferencial, es uno de los menos complicados (dentro de la perspectiva de la programación y de la construcción). El robot puede ir recto, girar sobre sí mismo y trazar curvas, como se muestra en la Figura 2c. Sin embargo, posee varias desventajas: el equilibrio del robot se debe dar mediante un apoyo adicional mediante una o dos ruedas de apoyo, además requiere un control de precisión para trayectorias rectas.

Síncrona es una locomoción compuesta normalmente de 3 ruedas, cuyo diseño es complejo y de difícil implementación, sin embargo, supera muchas de las dificultades que presentan otros tipos de locomoción, como se observa en la Figura 2d. La separación de los motores para traslación y rotación simplifica el control. Además, el control en línea recta está garantizado mecánicamente.

Omnidireccional este tipo de locomoción requiere de llantas especiales que permiten movimientos complicados (reduciendo restricciones cinemáticas). Sin embargo, el movimiento en línea recta no está garantizada (es necesario aplicar un controlador), como se muestra en la Figura 2e.

Oruga es un sistema sencillo de controlar, utilizando cintas de desplazamiento para realizar sus movimientos, ver la Figura 2f. Sin embargo, no dispone de un modelo matemático preciso de giro, además de que consume demasiada energía para realizar esta acción (Márquez, *et al* 2014, Barrientos, *et al* 2007a, Barrientos, *et al* 2007b, Ortigoza, *et al* 2007)

Figura 2 Tipos de locomoción en robots móviles



Fuente de Consulta: (Barrientos et al, 2007b)

Por otro lado, la locomoción de tipo patas tiene la ventaja de poder moverse por cualquier terreno que un ser humano pueda. Sin embargo, tienen varios inconvenientes, ya que poseen muchos grados de libertad y por lo tanto son difíciles de controlar. Además, mantener su estabilidad es complicado y su consumo de energía es alto. Los más comunes son los bípedos, un ejemplo de ellos es el ASIMO® (acrónimo del inglés Advanced Step in Innovative Mobility, paso avanzado en movilidad innovadora), como se observa en la Figura 3 (Shimegi, 2019).

Figura 3 Robot móvil con patas



Fuente de Consulta: (Shigemi, 2019)

Existe varias aplicaciones robot móvil, en este apartado se realiza de acuerdo con el medio en el que los robots móviles se desplacen:

Terrestres, se utilizan en rastreo y traslado de objetos, evasión de obstáculos, traslado de instrumental quirúrgico en hospitales, limpieza del área del hogar, ambientes cooperativos y en la industria donde se emplean para análisis e inspección de fisuras en gaseoductos y contenedores de petróleo, como se observa en la Figura 4.

Marinos como los submarinos equipados con sensores especiales para navegación dentro del agua como sonar, radar, visión telescópica, giroscopio, ver Figura 5.

Aéreos pueden proporcionar imágenes aéreas para reconocimiento de terreno y superficie, y son muy útiles en problemas de análisis de tráfico e inspección de edificios, como se muestra en la Figura 6 (Bolton, 2010, Reyes, 2013).

Figura 4 Robot móvil terrestre



Fuente de Consulta: (García et al, 2019)

Figura 5 Robot móvil marino.



Fuente de Consulta: (Peña, 2018)

Figura 6 Ejemplo de robot móvil aéreo.



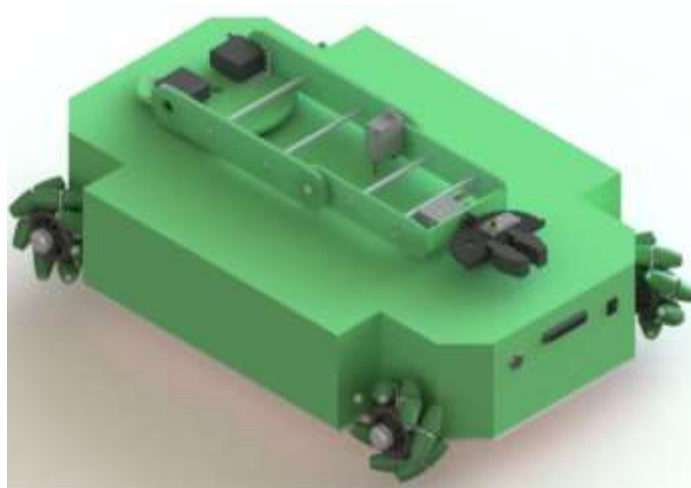
Fuente de Consulta: (Ruíez, 2016)

3. Diseño en CAD y el análisis cinemático

3.1. Diseño en CAD

El prototipo es diseñado en el software CAD Solidworks® como se observa en la Figura 7. Se pueden apreciar las 2 partes principales del robot: el chasis móvil, que tiene con 4 ruedas omnidireccionales, y el brazo robótico de 4 grados de libertad, que utiliza una pinza como efector final.

Figura 7 Vista isométrica del robot



Las dimensiones del chasis omnidireccional se observan en la Figura 8 una vista de planta y en la Figura 9 una vista lateral; todo está dado en cm. En general, el robot móvil mide 56 cm de largo y 32 cm de ancho y 14 cm de alto.

Figura 8 Acote real de la plataforma móvil en cm

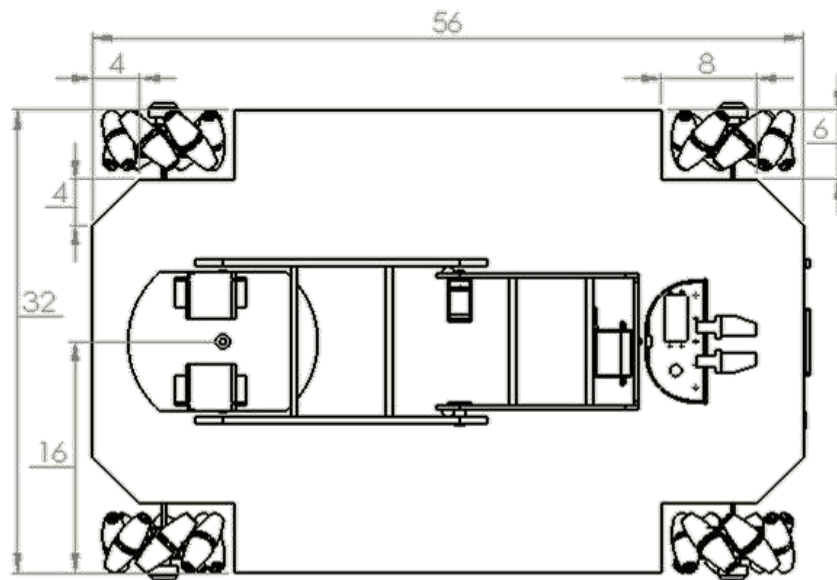
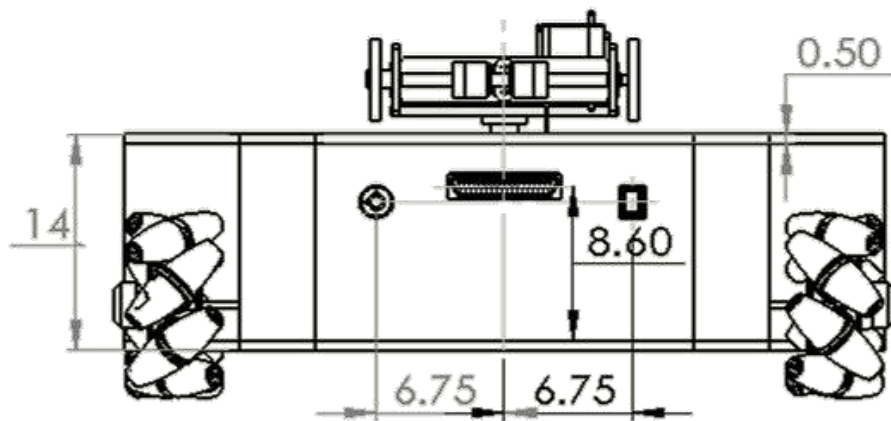


Figura 9 Acote real de la plataforma móvil en cm



Las dimensiones del brazo robótico se observan en la Figura 10 (largo de cada eslabón) y en la Figura 11 (ancho de los eslabones). Posee una longitud en extensión de aproximadamente 50 cm.

Figura 10 Acote real de los eslabones del brazo robótico en cm

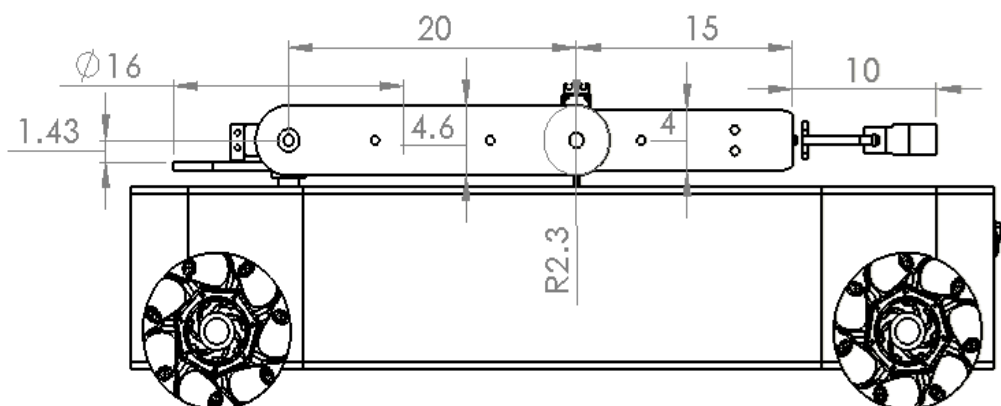
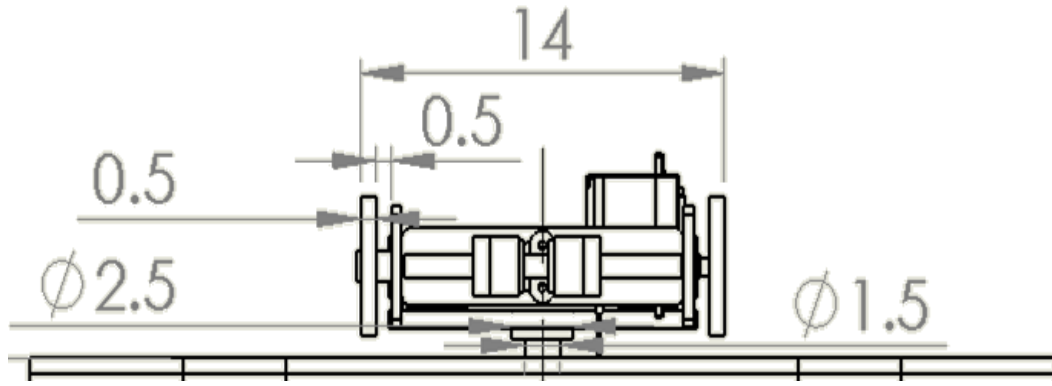


Figura 11 Acote real del ancho del brazo robótico en cm



3.2. Análisis cinemático directo del robot

Para el análisis cinemático directo se apoya del algoritmo de Denavit-Hartenberg que determinan los sistemas de referencia enlazados a cada articulación en base a los ejes de giro para cada eslabón como se observa en la Figura 12 y los parámetros D-H son mostrados en la Tabla 1 y en la Tabla 2 describe las medidas del robot en centímetros (Barrientos, 2007, Fu *et al*, 1987, Reyes, 2020, Sheng *et al*, 2017, Spong *et al*, 1989).

Figura 12 Ejes de coordenadas del brazo robótico

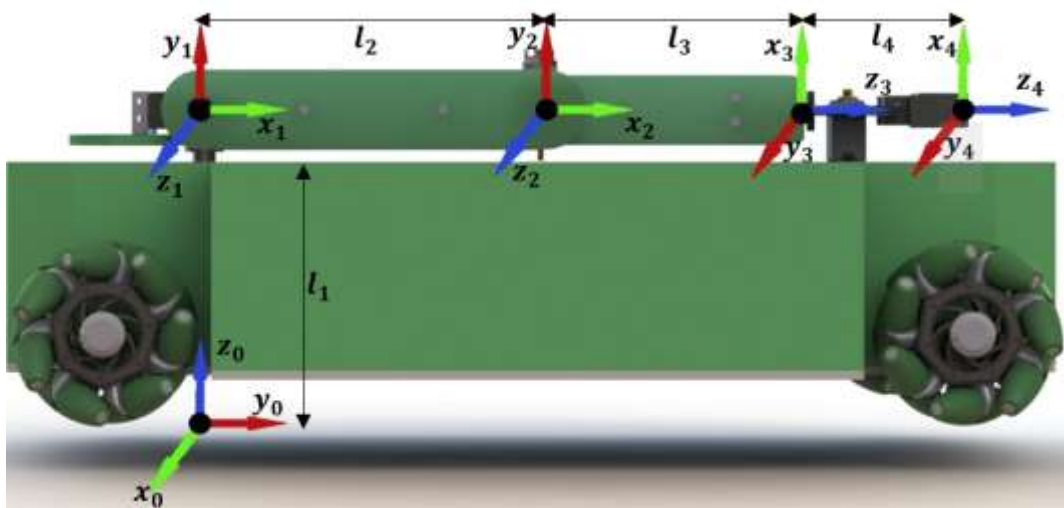


Tabla 1 Parámetros de Denavit-Hartenberg

Articulación i	θ_i	α_i	d_i	a_i
1	θ_1+90°	90°	L_1	0
2	θ_2	0	0	L_2
3	θ_3+90°	90°	0	0
4	θ_4	0	0	L_3+L_4

Se obtiene la matriz de transformación homogénea para robots manipuladores está dada por la ecuación (1).

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Tabla 2 Medidas de los eslabones del brazo robótico

Elemento	Longitud (cm)
L ₁	17.65
L ₂	20
L ₃	15
L ₄	10

Las matrices de transformación para cada eslabón se obtienen de sustituir los valores de las Tablas 1 y 2 en la matriz de transformación, ecuación (1).

Para la primera articulación, que corresponde a la cintura, se tiene:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + 90^\circ) & 0 & \sin(\theta_1 + 90^\circ) & 0 \\ \sin(\theta_1 + 90^\circ) & 0 & -\cos(\theta_1 + 90^\circ) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \ell_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

El hombro es representado por la segunda articulación:

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & \ell_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & \ell_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para la tercera articulación que corresponde al codo, es:

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3 + 90^\circ) & 0 & \sin(\theta_3 + 90^\circ) & 0 \\ \sin(\theta_3 + 90^\circ) & 0 & -\cos(\theta_3 + 90^\circ) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Y por último la cuarta articulación, corresponde al movimiento de la muñeca:

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ell_3 + \ell_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

La transformación homogénea final del brazo robótico articulado se obtiene efectuando el producto de las matrices de cada articulación, mediante la ecuación (6)

$${}^0A_4 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 \quad (6)$$

El resultado de efectuar la multiplicación se presenta la posición del efector final expresada en el sistema global que se encuentra en la base del robot, ver ecuación (7)

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} s\theta_1 c\theta_4 s\theta_{23} + c\theta_1 s\theta_4 & c\theta_1 c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_4 s\theta_{23} & -s\theta_1 c\theta_{23} & -(\ell_3 + \ell_4) s\theta_1 c\theta_{23} - \ell_2 s\theta_1 c\theta_2 \\ s\theta_1 s\theta_4 - c\theta_1 c\theta_4 s\theta_{23} & s\theta_1 c\theta_4 + c\theta_1 s\theta_4 s\theta_{23} & c\theta_1 c\theta_{23} & (\ell_3 + \ell_4) c\theta_1 c\theta_{23} + \ell_2 c\theta_1 c\theta_2 \\ c\theta_4 c\theta_{23} & -s\theta_4 c\theta_{23} & s\theta_{23} & \ell_1 + (\ell_3 + \ell_4) s\theta_{23} + \ell_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde $s\theta_1 = \sin \theta_1$, $s\theta_2 = \sin \theta_2$, $s\theta_3 = \sin \theta_3$, $s\theta_4 = \sin \theta_4$, $c\theta_1 = \cos \theta_1$, $c\theta_2 = \cos \theta_2$, $c\theta_3 = \cos \theta_3$, $c\theta_4 = \cos \theta_4$, $s\theta_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ y $c\theta_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$

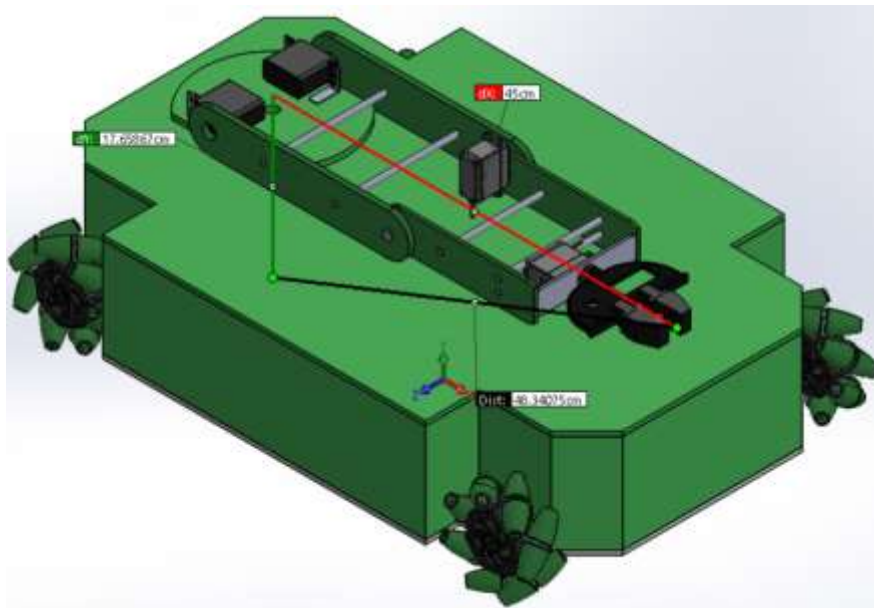
Con el propósito de validar la cinemática directa del robot se establecen 2 posiciones mediante coordenadas articulares, la primera se observa en la tabla 4.4 en la cual se tiene el robot en su posición inicial.

La validación experimental de la ecuación (7) que representa la posición cartesiana del efector final proyectada en el sistema de coordenadas base se muestra en la Figura 9, donde: $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$ y $\theta_4 = 0^\circ$. Al sustituir los valores en la matriz de transformación homogénea se tiene:

$${}^0A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 45 \\ 1 & 0 & 0 & 17.62 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Como se puede observar en la Figura 13, el resultado concuerda con los datos que se tienen en SolidWorks®, teniendo en cuenta el sistema de referencia base.

Figura 13 Vista isométrica del robot en posición inicial

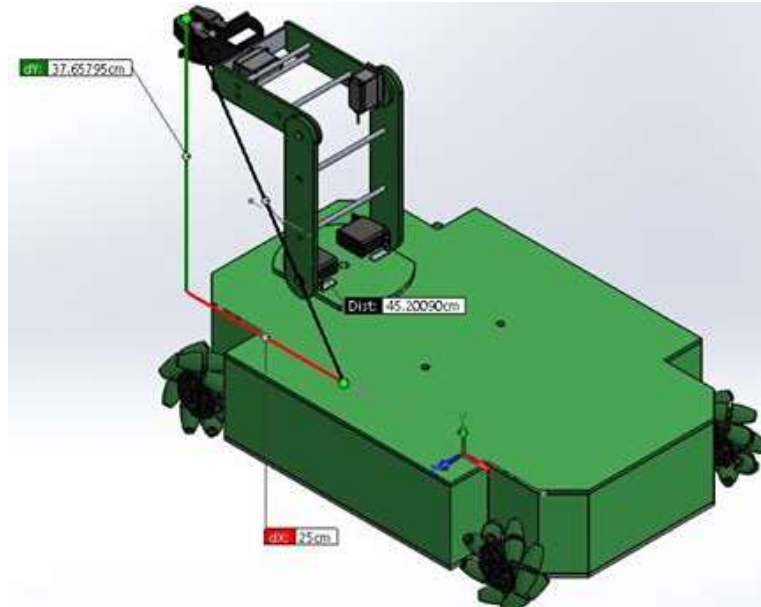


Para la segunda validación de la cinemática directa, se asignan los siguientes ángulos $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$ y $\theta_4 = 0^\circ$. Sustituyendo los valores en la matriz de transformación homogénea se tiene la siguiente matriz.

$${}^0A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 25 \\ -1 & 0 & 0 & 37.65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

En la Figura 14 se observa los valores obtenidos a partir de la matriz de transformación homogénea, en el eje Y (con respecto al sistema de referencia) se tiene un desplazamiento a de 25 cm hacia el eje negativo y en el eje Z se tiene una distancia de 37.65 cm.

Figura 14 Vista isométrica del robot para la segunda validación



3.3. Análisis cinemático inverso del robot

Las primeras 3 coordenadas articulares se obtienen mediante el método geométrico, la Figura 15 muestra la configuración del robot. El dato de partida son las coordenadas (P_x, P_y, P_z) en las que se quiere posicionar el efector final (Barrientos, *et al* 2007, Craig, 2007, Fu, *et al*, 1987, Kelly y Santibañez, 2003, Reyes 2019, Reyes, 2020, Spong, 1989). Para este análisis se tiene que $q_1 = \theta_1$, $q_2 = \theta_2$ y $q_3 = \theta_3$. El valor de q_1 se obtiene inmediatamente mediante la Ecuación 10.

$$q_1 = \arctan\left(\frac{-P_x}{P_y}\right) \quad (10)$$

Para el caso de la articulación 2 y 3 se tienen dos posibles configuraciones denominadas codo arriba y codo abajo; como se muestra en la Figura 15 y 16 respectivamente.

Figura 15. Configuración codo arriba

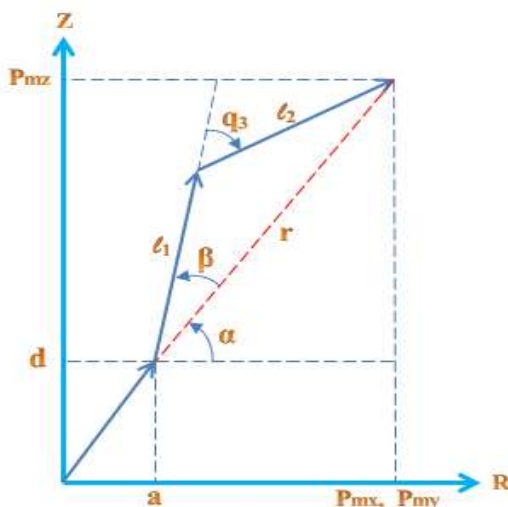
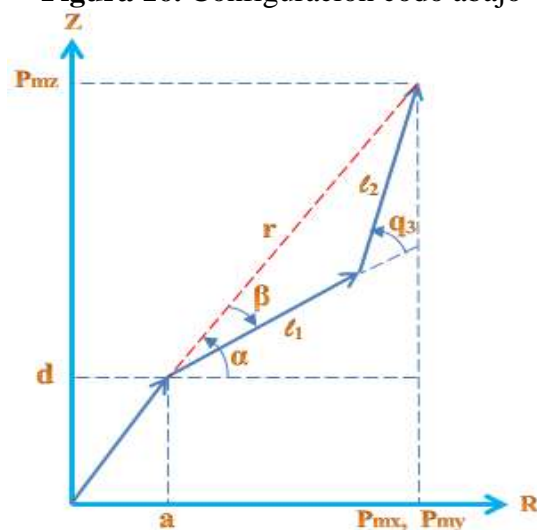


Figura 16. Configuración codo abajo



El robot únicamente presenta un desfase en el eje Z el cual está dado por la longitud de L_1 establecido en la Tabla 2. El vector que va desde el giro de la segunda articulación hasta el punto central de la muñeca el cual se puede observar en la Figura 13 está dado por la Ecuación 11.

$$r = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - d)^2} \quad (11)$$

Considerando ahora la articulación 2 y 3, que están situadas en el mismo plano y utilizando el teorema del coseno, se tiene la Ecuación 12.

$$r^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos(q_3) \quad (12)$$

Despejando el $\cos(q_3)$ de la expresión anterior, se obtiene la Ecuación 13.

$$\cos(q_3) = \frac{r^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (13)$$

Por último, se despeja la articulación q_3 al aplicar arcoseno a ambos lados de la ecuación, obteniendo el valor de q_3 tal y como se observa en la Ecuación 14.

$$q_3 = \arccos\left(\frac{r^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}\right) \quad (14)$$

Para el cálculo de q_2 se obtiene que el ángulo α está dada por la Ecuación 15

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right) \quad (15)$$

y para el cálculo de β se tiene la Ecuación 16

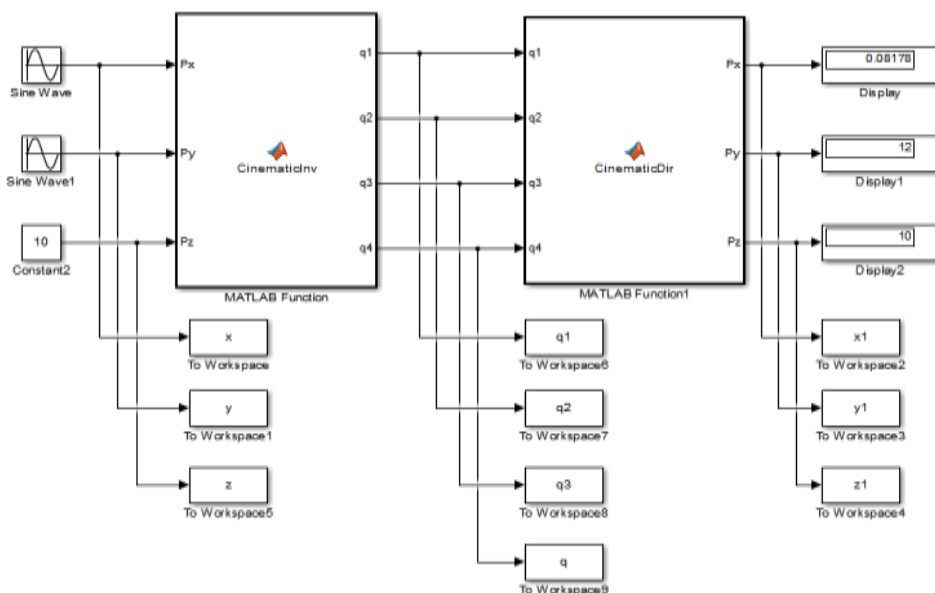
$$\beta = \arctan\left(\frac{Pmz - d}{\sqrt{Pmx^2 + Pmy^2}}\right) \quad (16)$$

por lo tanto

$$q_2 = \alpha - \beta \quad (16)$$

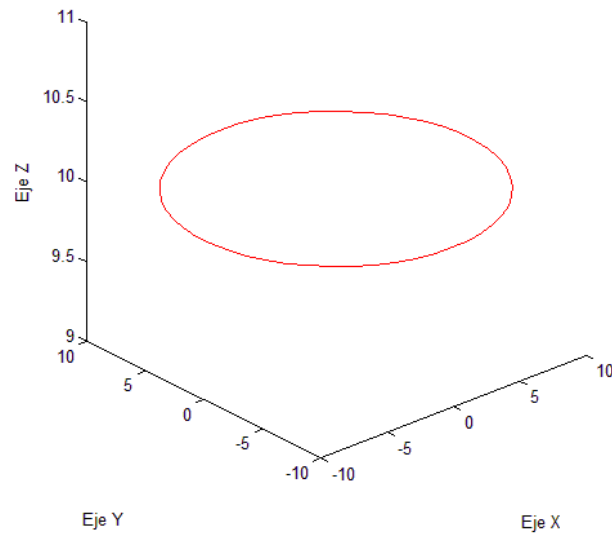
Con la finalidad de comprobar la cinemática inversa se realiza un modelo en Simulink® como se observa en la Figura 17, en el cual se gráfica un círculo. Los datos del círculo entran a la función de la cinemática inversa cuya salida entra a la función de la cinemática directa el cual retornará los datos de la posición cartesiana.

Figura 17 Modelo en Simulink® para validar la cinemática inversa del robot



En la Figura 18 se puede observar el círculo resultante el cual tiene un diámetro de 10 cm y se encuentra formado entre el eje “X” y “Y”; dejando fijo el eje “Z”.

Figura 18 Círculo mediante la cinemática inversa y directa en Matlab®



Por lo que se garantiza que la cinemática directa e inversa funciona correctamente, al realizar el círculo en el espacio de trabajo del robot manipulador.

4. Construcción del robot omnidireccional

En esta sección se muestra el diseño mecánico y las partes que conforman el robot móvil omnidireccional; así como los movimientos de cada llanta para tener un desplazamiento del mismo.

4.1. Robot omnidireccional

Las medidas del diseño del robot son detalladas en el Capítulo 3, el robot tiene 4 llantas omnidireccionales de 14 cm de diámetro como se observa en la Figura 19, ubicadas en las esquinas del robot, asegurándose que los rodillos de las llantas en diagonal apunten a la misma dirección. Las paredes del chasis miden 12 cm de alto, con el objetivo de que la batería y la transmisión se instalen sin problemas de altura. La superficie del robot omnidireccional es la única que se acopla mediante tornillos, pues es removible por si algún actuador o sensor llega a dañarse.

Figura 19 Vista general del chasis omnidireccional



4.1.1 Tableta de conexiones

La tableta de conexiones es un conector macho DB37 es la responsable de la transmisión de datos a la tablilla de conexiones de los actuadores, sensores y electrónica de potencia, la ubicación de la tablilla se encuentra en la pared trasera del robot omnidireccional, como se observa en la Figura 20, así mismo, existe un interruptor ON/OFF para encender y apagar el robot omnidireccional. Además, tiene un interruptor de llave, que permite al usuario cambiar de arquitectura abierta (adquisición de datos por medio de la tablilla de conexiones) a arquitectura cerrada (uso del robot mediante aplicación móvil diseñada para dispositivos Android).

Figura 20 Tablero de la parte trasera del robot omnidireccional



4.2 Brazo robótico

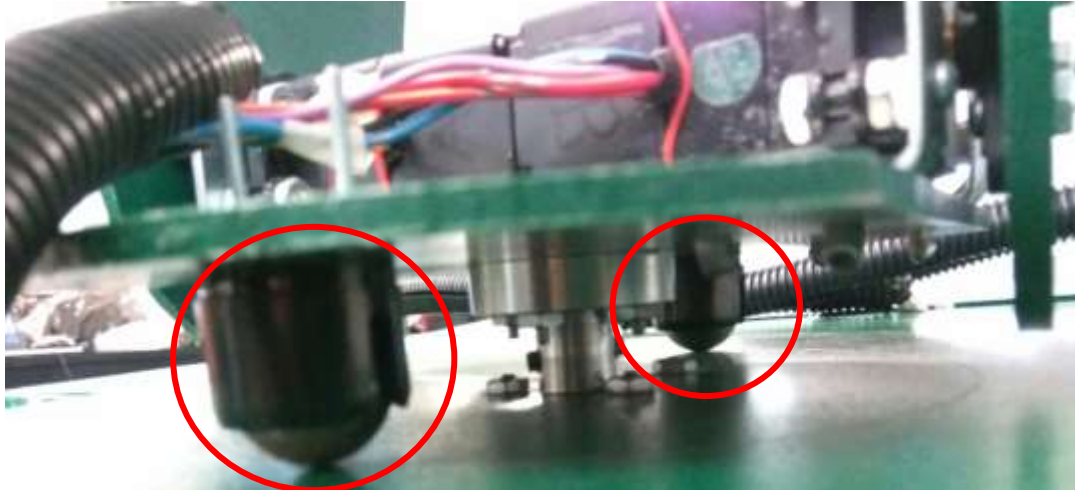
Los eslabones del brazo robótico se maquinan en una fresadora universal y se acoplaron a los motores. La primera articulación que representa la cintura del robot tiene un motor encargado de rotar el brazo robótico y es el único que se encuentra dentro del chasis y se acopla al brazo mediante una transmisión mecánica. La segunda articulación tiene 2 servomotores SCR PRO S8466 colocados en el hombro del robot, los servomotores sostienen a los eslabones. La tercera articulación que representa el codo del robot, se mueve mediante un servomotor igual al del hombro, a diferencia de la segunda articulación, solo un eslabón es accionado mediante un motor, el segundo tiene un movimiento pasivo gracias al acople de aluminio. La cuarta articulación es la muñeca y se mueve mediante un servomotor MG995, que acopla al efector final, se encarga de rotar la pinza que actúa como efector final mide 105 mm de largo, 100 mm de alto y 30 mm de ancho. Es accionado por un servomotor y tiene una apertura máxima de 5 cm, ver Figura 21.

Figura 21 Vista general del brazo robótico



Además, tiene dos ruedas locas, como se observa en la Figura 22, en la base del brazo robótico para disminuir el esfuerzo del motor de la primera articulación para girar el brazo.

Figura 22 Ruedas locas



4.3 Transmisión del robot

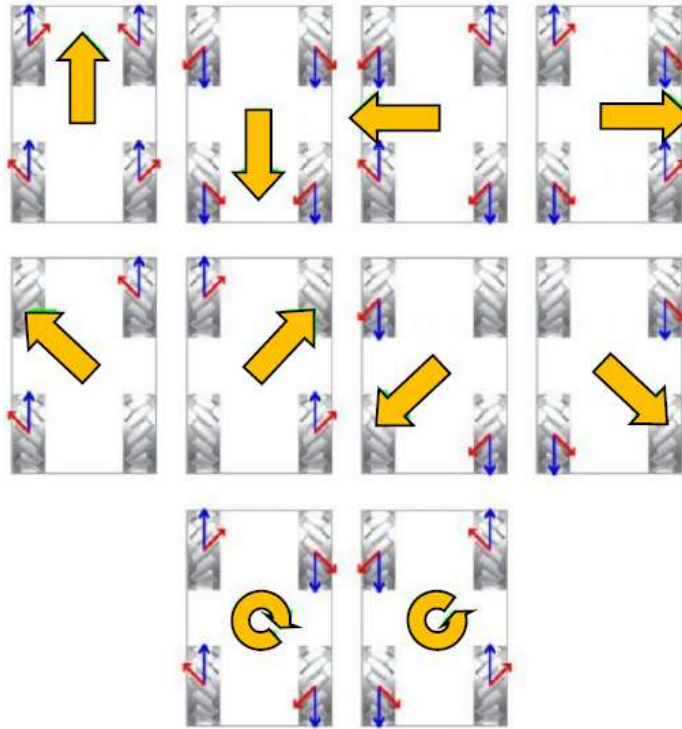
Una vista general de la transmisión del brazo robótico montada en el chasis del robot es mostrada en la Figura 23. Los engranes son de aluminio y utilizan ejes de acero inoxidable de 6 mm de diámetro, están acoplados con opresores de 1/8" de diámetro por 1/4" de largo. Los ejes son sostenidos mediante rodamientos de 6 mm de diámetro interno y 19 mm de diámetro externo, los cuales son acoplados a la base del robot mediante portabalero de aluminio y tornillos NF de 1/8" de diámetro por 1" de largo. El motor gira a 127 rpm en voltaje máximo, pero debido a que se alimenta con 9.7 V (debido a la caída de voltaje del puente H), la velocidad angular del motor es de aproximadamente 102 rpm, por lo tanto, la velocidad angular después de la transmisión es de aproximadamente 25 rpm (Shigley, 2001).

Figura 23 Transmisión montada en el chasis



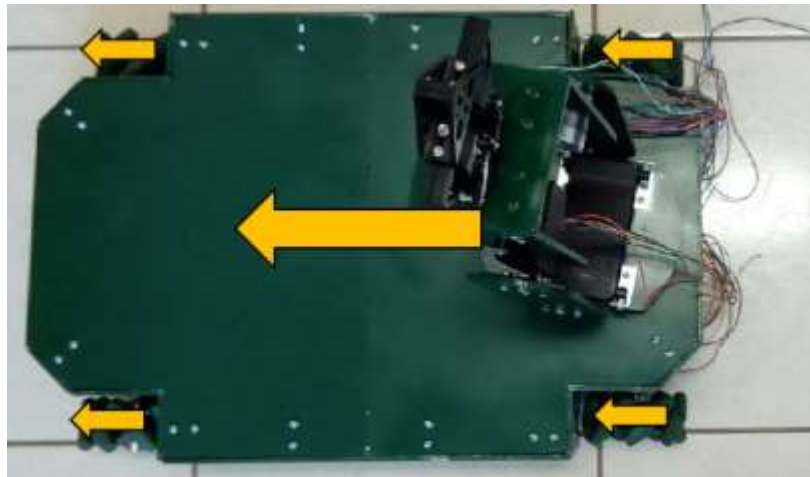
4.4 Movimientos del robot omnidireccional

El robot omnidireccional puede realizar un total de 10 movimientos: adelante, atrás, izquierda, derecha, diagonal superior izquierda, diagonal superior derecha, diagonal inferior izquierda, diagonal inferior derecha, giro horario y giro antihorario. Para realizar cada uno de dichos movimientos se debe tener una configuración específica del movimiento de las llantas omnidireccionales, la cual se puede observar en la Figura 24 (Adamov, 2018, Campos, 2018, Changlong *et al*, 2019, Wang *et al*, 2018, Zhang *et al*, 2013).

Figura 24 Movimientos de llantas omnidireccionales

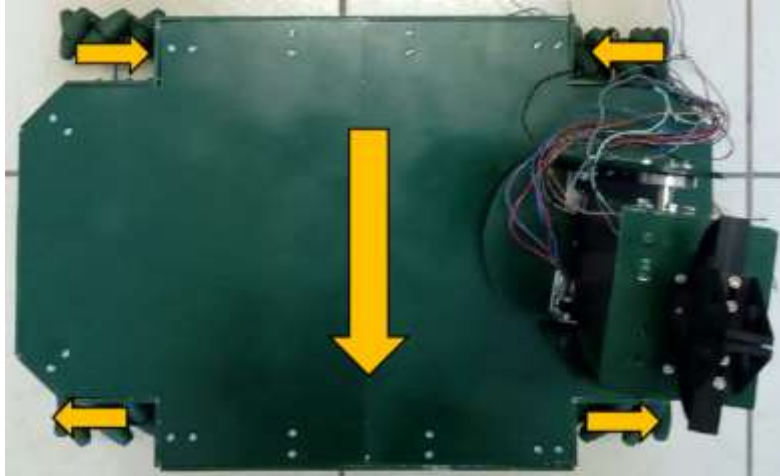
Fuente de Consulta: (Campos, 2018)

Las llantas omnidireccionales vienen en pares iguales (y no 4 idénticas). Para cumplir con los movimientos dados en la Figura 25 las llantas con los rodillos a 45° del eje Y en sentido horario deberán colocarse en el motor superior izquierdo y el motor inferior derecho. Las dos llantas restantes (con los rodillos a 45° del eje Y en sentido antihorario) deben colocarse en el motor superior derecho y el motor inferior izquierdo.

Figura 25 Movimiento hacia atrás del robot

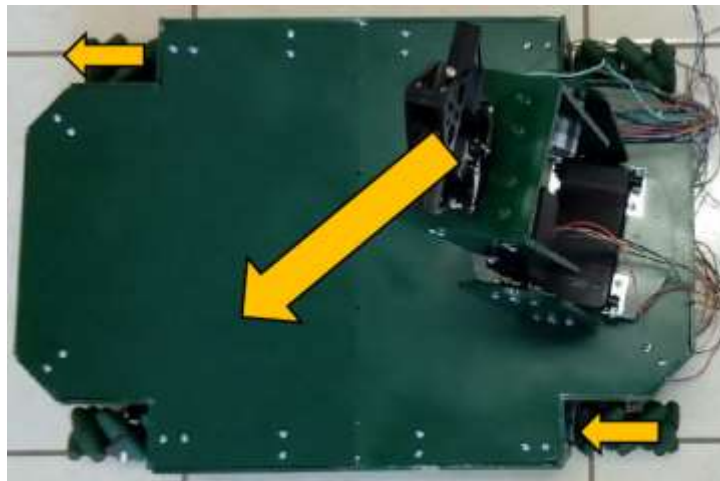
Para mover el robot en movimientos hacia adelante y hacia atrás, las 4 llantas omnidireccionales deben girar en el mismo sentido. En la Figura 24 se observa un ejemplo del robot moviéndose hacia atrás y la dirección que deben tener las llantas. Para mover el robot lateralmente, los pares de llantas omnidireccionales en diagonal deben moverse en la dirección opuesta. Por ejemplo, si desea mover el robot hacia la derecha (como en la Figura 26) las llantas superior izquierda e inferior derecha deberán girar hacia atrás, mientras las llantas superior derecha e inferior izquierda deberán girar hacia adelante.

Figura 26 Movimiento hacia la derecha del robot



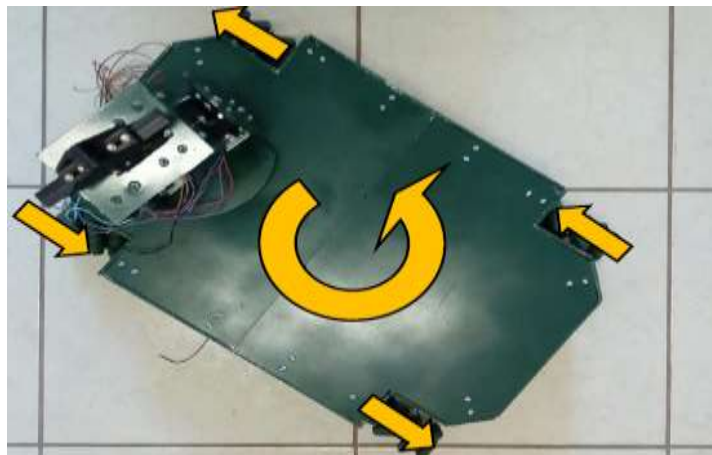
En la Figura 27 se muestra el movimiento del robot omnidireccional en forma diagonalmente, solo un par de llantas en diagonal son activadas (girando al mismo sentido). Es decir, si se desea mover el robot en diagonal inferior derecha como se observa en la Figura 28, las llantas superior derecha e inferior izquierda deben girar hacia atrás.

Figura 27. Movimiento en diagonal inferior derecha del robot



Para que el robot omnidireccional gire sobre su eje, las llantas de la derecha deberán girar al mismo sentido y las llantas de la izquierda al sentido contrario. Es decir, si desea que el robot gire en sentido antihorario como se observa en la Figura 28, las llantas de la izquierda deberán girar hacia atrás y las llantas de la derecha hacia delante.

Figura 28 Rotación antihoraria del robot



5. Resultados experimentales

Los resultados experimentales son importantes para determinar que el diseño mecánico, eléctrico y el control funcionan correctamente, para ello se desarrolla una aplicación en App Inventor para dispositivos Android para controlar el robot omnidireccional, tanto la plataforma móvil como el brazo manipulador (Popov *et al*, 2019). Con la aplicación se envían datos por bluetooth (a través de un módulo de bluetooth HC-04 incorporado al robot) a un Arduino MEGA 2560, que controla el sentido de giro de los motores. El menú principal de la aplicación se observa en la Figura 29, el menú consta de 3 botones:

Carro: Entrar a la ventana para el control de la plataforma móvil omnidireccional.

Brazo: Entrar a la ventana para el control del brazo robótico de 4 grados de libertad.

Conectar/Desconectar: Activar o desactivar la conexión bluetooth con el celular.

Figura 29 Menú de la aplicación



Al dar clic en el botón de “Carro”, se abre una pantalla como se observa en la Figura 30 con botones en forma de flechas, con las cuales el usuario puede manipular los 10 movimientos que puede realizar el chasis omnidireccional, y si ningún botón se encuentra presionado, el robot automáticamente se detiene. El usuario puede además controlar la velocidad de la plataforma móvil mediante una barra de control ubicada en la parte superior de la ventana. Por otra parte, si el usuario desea salirse del control del chasis, deberá pulsar el botón de “regresar”, ubicado en la parte inferior de la ventana.

Al presionar del botón del “Brazo”, se abre un submenú donde muestra que el brazo puede moverse en coordenadas cartesianas o angulares como se puede observar en la Figura 31. La posición cartesiana: el usuario puede controlar el robot en coordenadas cartesianas x,y,z , aquí se aplica la cinemática inversa del robot y la posición angular: el usuario puede controlar cada una de las articulaciones del robot, aquí se emplea cinemática directa del robot.

Además, se puede controlar además la apertura y el cierre de la pinza, de 0% al 100%. Los valores de la posición se pueden escribir y a través de botones con flechas aumentar o disminuir las posiciones sin la necesidad de escribirlos. Un solo pulso a las flechas da un avance de 1 unidad (milímetros para la cartesiana, y grados para la angular), mientras que, si se mantiene pulsado el botón de las flechas, da un avance de 10 unidades.

Figura 30 Menú para el control de la plataforma móvil



Figura 31 Menú para el control del brazo robótico



Una vez seleccionada la articulación que se desea manipular, muestra un submenú como se observa en la Figura 33, en esta ventana aparece la gráfica del robot manipulador que describe el valor real en color verde y mientras el deseado en color amarillo. Para el control de seguimiento de la trayectoria se aplica un algoritmo de control lineal PID con los siguientes parámetros: $K_p = 4.5$, $K_i = 0.5$ y $K_d = 0.02$; y como se observa en la gráfica de la Figura 32 comparando la señal deseada contra la real de la primera articulación tiene un buen seguimiento lo que garantiza que las ganancias del algoritmo de control son correctas (Kuo, 1996, Ogata, 2010), esto mismo se realiza para las demás articulaciones teniendo resultados similares. Uno de los inconvenientes, al estar en tiempo real la función de graficar consume muchos recursos del teléfono, se puede deshabilitar al desmarcar la casilla a lado de la palabra “Graficar”. Por último, si el usuario desea salirse del control del brazo, deberá pulsar el botón de “regresar”, ubicado en la parte inferior de la ventana.

Figura 32 Menú graficar articulaciones del brazo robótico



6. Agradecimiento

Los autores del capítulo del libro agradecen a la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima por otorgar todas las facilidades para realizar este proyecto de investigación y prestar sus laboratorios y talleres.

7. Conclusiones

El robot móvil omnidireccional es diseñado para utilizarse como una plataforma de arquitectura abierta en el que los usuarios puedan aplicar los diferentes algoritmos de control como clásico, difuso, inteligente, adaptable, robusto, entre otros. Además, puede servir para la enseñanza de la mecatrónica, mecánica, dinámica, instrumentación, visión, automatización, robótica, instrumentación, entre muchos más. El robot móvil omnidireccional es diseñado y construido en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima y lo más importante es de bajo costo, que si bien el precio final de los materiales y mano de obra es de aproximadamente 25,000 pesos mexicanos, es considerablemente menor a otros robots omnidireccionales en el mercado, como el youBot® de KUKA® con un precio en el mercado de 25,000 euros.

Por otra parte, se concluye que el análisis, diseño, manufactura y control de un robot omnidireccional con brazo robótico articulado de 4 grados de libertad, es validado mediante un algoritmo de control lineal con buenos resultados. Además, el robot una tablilla de conexiones para que los usuarios envíen y reciban señales de manera sencilla.

Son pocas las Universidades del País que tiene robots móviles omnidireccionales con un brazo robot, y que les permita aplicar diferentes algoritmos de control, por esta razón es importante este prototipo.

Como trabajo futuro es continuar con la mejora del prototipo robot móvil omnidireccional, es decir colocar una cámara de alta definición en el efector final del brazo robótico para que seleccione piezas de diferentes colores y formas para clasificar objetos; que son pocos los robots que tienen esta aplicación y se más atractivo este prototipo. En este mismo sentido, se espera controlar el robot móvil mediante visión para eso es necesario un juego de tres cámaras externas que garanticen las posiciones espaciales del robot móvil omnidireccional ya sea en el centro del robot móvil o en el efector final.

8. Referencias

- Aitken, J., McAree, O., Veres, S. (2016). Symbiotic relationship between robots — a ROS ARDrone/YouBot library. UKACC International Conference on Control (CONTROL).
- Adamov, B. I. (2018). Influence of mecanum wheels construction on accuracy of the omnidirectional platform navigation (on example of KUKA youBot robot). International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS).
- Alers, S., Claes, D., Fossel, J., Hennes, D., Tuyls, K, Weiss, G. (2014). How to Win RoboCup@Work? The Swarmlab@Work Approach Revealed. Book Lecture Notes in Computer Science.
- Barrientos, Antonio, Peñin, Luis Felipe, Balaguer, Carlos & Aracil, Rafael. (2007). Fundamentos de Robótica. España: McGraw Hill.
- Barrientos, A., Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., Rossi, C. (2007a). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. Grupo de cibernética, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Barrientos R., García, J., Silva, R. (2007b). Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte. Pulibits. Instituto Politécnico Nacional.
- Bolton, W. (2010). MECATRÓNICA: Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica (Cuarta ed.). México, D.F.: Marcombo.
- Changlong Ye, Jianhui Zhang, Suyang Yu, Guanglin Ding. (2019). Movement Performance Analysis of Mecanum Wheeled Omnidirectional Mobile Robot. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.
- Craig, John J. (2003). Introduction to robotics: mechanical and control. (Third edition). USA: Prentice Hall.
- Fu, K. S., González, R. C. & Lee, C. S. G.. (1987). Robotics: control, sensing, vision and intelligence. USA: McGraw Hill.
- García, Nickson, Molina, Cristian. (2019). Desarrollo de un Robot Móvil Terrestre Semiautónomo con Acceso Remoto. Tesis Licenciatura. Universidad de Ibagué.
- Kelly Martínez, Rafael & Santibañez Davila, Victor. (2003). Control movimiento de robots manipuladores. Pearson Educación.
- Kuo, B. (1996). Sistemas de Control Automático. Cd. de México: Prentice Hall.
- Márquez, C., Silva, R., Marcelino, M., Cruz, M., Sosa, Y., García, J. (2014). Robots móviles de ruedas: generalidades. Boletín UPIITA. El camino de la innovación educativa. ISSN 2007-6150.
- Mirelez, F., Morales, A., Ríos, R. Pérez, H. (2015). Control Servovisual de un Kuka youBotr para la manipulación y traslado de objetos. Congreso Nacional de Control Automático, AMCA.
- Ogata. (2010). Ingeniería de Control Moderna. Cd. de México: Prentice-Hall.
- Ollero, A. (2001). ROBÓTICA. Manipuladores y robots móviles. Barcelona: MARCOMBO, S.A.
- Ortigoza, R., García, J., Barrientos, R, Molina, M. (2007). Una panorámica de los robots móviles. Revista Electrónica de Estudios Telemáticos. Vol. 6. No. 3.
- Peña, Antonio. (2018). Desarrollo de un diseño esquemático y conceptual de un vehículo submarino operado remotamente (ROV). Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana.

- Popov, V., Ahmed, S., Shakev, N., Topalov, A. (2018). Detection and Following of Moving Targets by an Indoor Mobile Robot using Microsoft Kinect and 2D Lidar Data. International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV).
- Reyes Cortés, Fernando. (2020). Robótica: Control de robots manipuladores. Alfaomega.
- Reyes Cortés, Fernando. (2019). MATLAB Aplicado a Robótica y Mecatrónica. Alfaomega
- Reyes Cortés, Fernando. (2013). Mecatrónica - Control y automatización. Cd. de México: Alfaomega.
- Ribas-Xirgo Lluís. (2014). A Virtual Laboratory of a Manufacturing Plant Operated with Mobile Robots. IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA).
- Rivero González, F. J. (2021). Simulación del robot KUKA YouBot en el entorno de CoppeliaSim. Tesis Licenciatura. Universidad de Sevilla. España.
- Ruírez, Pablo. (2016) Diseño y Fabricación de un Dron. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica de Valencia
- Sharma, S., Kraetzschmar, G., Rhein, B., Scheurer, C., Bischoff, R. (2012). Unified Closed Form Inverse Kinematics for the KUKA youBot. Robotik - Proceedings for the Conference of ROBOTICS.
- Sheng, W., Jingjin, S., Fengyu, X., Guoping, J. (2017). Kinematic accuracy analysis of robot based on local POE. IEEE.
- Shigemi, S. (2019) ASIMO and Humanoid Robot Research at Honda. In: Goswami A., Vadakkepat P. (eds) Humanoid Robotics: A Reference. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6046-2_9.
- Shigley, J. (2001). Análisis y Síntesis de Mecanismos. Cd. de México: Mc Graw Hill.
- Spong, Mark W. & Vidyasagar, M.. (1989). Robot dynamics and control. USA: John Wiley & Sons.
- Wang Jianbin, Chen Jianping. (2018). An Adaptive Sliding Mode Controller for Four-wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Input Constraints. Chinese Control And Decision Conference (CCDC).
- Wenqiang Chen, Chenguang Yang, Ying Feng. (2019). Shared Control For Omnidirectional Mobile Robots. Chinese Control And Decision Conference (CCDC).
- Zhang Liandong, Zhou Changjiu. (2013). Kuka youBot® Arm Shortest Path Planning Based on Geodesics. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).
- Zdešar, Andrej, Blažic Sašo, Klančar, Gregor. (2017). Engineering Education in Wheeled Mobile Robotics. IFAC-Papers On Line Volume 50, Issue 1, Pages 12173-12178

Capítulo 2 Control de fuerza aplicado al dispositivo háptico OMNI PHANTOM® en lazo abierto

Chapter 2 Force control applied to the OMNI PHANTOM® haptic device in an open loop

AGUILAR-SANCHEZ, Iván†, HERNÁNDEZ-BARÓN, Eduardo*, DURAN-FONSECA, Miguel y GUDIÑO-LAU, Jorge

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica, Km. 20.5 Carretera Manzanillo-Barra de Navidad, C.P. 28869, Manzanillo, Colima, México

ID 1^{er} Autor: *Ivan, Aguilar-Sanchez* / **ORC ID:** 0000-0003-1364-0333

ID 1^{er} Coautor: *Eduardo, Hernández-Barón* / **ORC ID:** 0000-0001-5600-0075

ID 2^{do} Coautor: *Miguel, Duran-Fonseca* / **ORC ID:** 0000-0002-0780-6192

ID 3^{er} Coautor: *Jorge, Gudiño-Lau* / **ORC ID:** 0000-0002-0585-908X

DOI: 10.35429/H.2021.10.23.44

I. Aguilar, E. Hernández, M. Durán y J. Gudiño

* eduardo_hernandez1@ucol.mx

J. Gudiño, E. Hernández, S. Charre, J. Alcalá y M. Duran (AA. VV.). *Proyectos de Ingeniería Aplicada, Ciencia y Tecnología* ©ECORFAN- México, 2021.

Resumen

En este trabajo de investigación se describe el modelo cinemático de un dispositivo manipulador de tres grados de libertad, para el análisis cinemático directo se emplea el algoritmo Denavit-Hartenberg y para el análisis de cinemática inversa se emplea el método geométrico. Para el análisis de fuerza se analiza la estabilidad de los robots empleando la Función candidata de Lyapunov.

Cinemática, Dispositivo háptico, Fuerza, Trayectoria, Ortogonal

Abstract

This research paper describes the kinematic model of a manipulative device of three degrees of freedom, for the direct kinematic analysis the Denavit-Hartenberg algorithm is used and for the inverse kinematic analysis the geometric method is used. For the force analysis, the stability of the robots is analyzed using the Lyapunov Candidate Function.

Kinematics, Haptic device, Strength, Trajectory, Orthogonal

1. Introducción

Los robots manipuladores se han vuelto más comunes dentro de las distintas industrias debido a su flexibilidad y versatilidad. El eficaz cumplimiento de tareas repetitivas por parte de las máquinas y la automatización de los trabajos agotadores ayuda a alejar a las personas de los daños y los roles que implican juicio y razonamiento, que ningún robot o programa puede replicar.

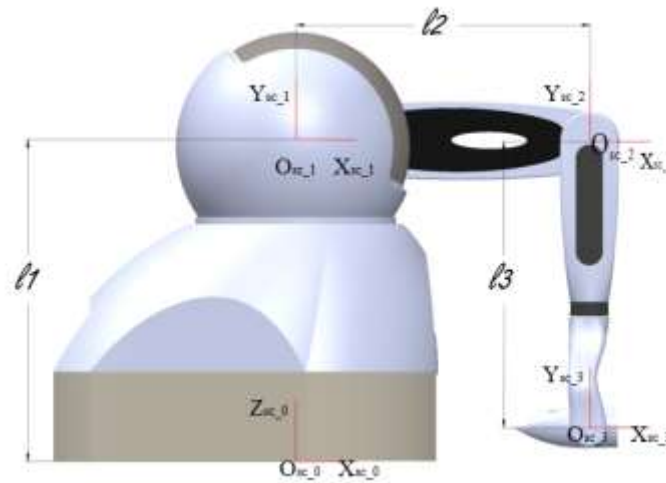
Sin embargo, el principal desafío para este tipo de tecnología está en las operaciones de mecanizado, en su falta de absoluta precisión. El problema de precisión de posicionamiento durante el mecanizado se debe a la falta de rigidez del robot, el cual es el criterio estudiado y optimizado en el presente trabajo, también se tiene el problema de la planificación de trayectoria y el control de la fuerza. Además, otro reto extra del mecanizado robótico es el proceso de programación complejo y que requiere mucho tiempo.

El termino ROBOT aparece en la literatura ingles en 1921, (Karel Capek “Rossum Universal Robots”) a partir de la palabra checa Robbota, que significa servidumbre o trabajo forzado. Si bien, actualmente podemos encontrar variedad de definiciones en cuanto a la palabra “Robot”, las cuales se presentarán en el apartado del marco teórico para un adentramiento más específico y mencionando solo las definiciones más aceptadas en el campo de la investigación.

2. Cinemática y dinámica del manipulador.

El sistema de coordenadas (O_{sci}) mostrada en la Figura 1 es asignado al robot manipulador. (Chavez, Gudiño, Alcalá, & Charre-Ibarra, 2018)

Figura 1 Asignación de sistemas de coordenadas



El dispositivo háptico tiene una particularidad en su eslabón 2, debido a que cuando esta gira, el sistema de coordenadas ($Osc2$) se mantiene en la misma orientación, lo cual únicamente sufre traslación.

Por lo que las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$ para las articulaciones 1 y 3 se obtienen a partir de la ecuación (1), mientras que para la articulación 2 sólo se aplica una matriz de traslación. Para fines de simplificar las ecuaciones se tiene que $\cos(q_i) = Cq_i$ y $\sin(q_i) = Sq_i$, así como utilizando la propiedad trigonométrica $\cos(q_3 - 90^\circ) = \sin(q_3)$ y $\sin(q_3 - 90^\circ) = -\cos(q_3)$.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} Cq_1 & 0 & Sq_1 & 0 \\ Sq_1 & 0 & -Cq_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} Sq_3 & Cq_3 & 0 & l_3Sq_3 \\ -Cq_3 & Sq_3 & 0 & -l_3Cq_3 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El cálculo de matriz de traslación de la articulación 2 sobre el eje x está dado por la ecuación (2)

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2Cq_2 \\ 0 & 1 & 0 & l_2Sq_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La matriz de transformación homogénea que relaciona el extremo final con el sistema de coordenadas de referencia resulta de la multiplicación de las matrices de las ecuaciones (1) y (2), $T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3$ donde $l = l_1 = l_2 = l_3$.

$$T = \begin{bmatrix} Cq_1 & 0 & Sq_1 & 0 & Sq_3 & Cq_3 & 0 & l_3Sq_3 & 1 & 0 & 0 & l_2Cq_2 \\ Sq_1 & 0 & -Cq_1 & 0 & -Cq_3 & Sq_3 & 0 & -l_3Cq_3 & 0 & 1 & 0 & l_2Sq_2 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

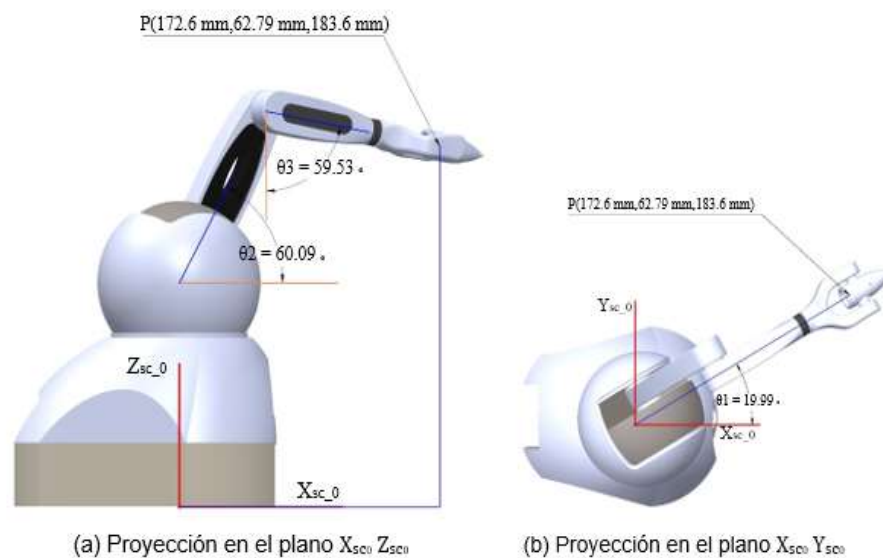
$$T = \begin{pmatrix} Cq_1Sq_3 & Cq_1Cq_3 & Sq_1 & l(Cq_1Sq_3 + Cq_1Cq_2) \\ Sq_1Sq_3 & Sq_1Cq_3 & -Cq_1 & l(Sq_1Sq_3 + Sq_1Cq_2) \\ -Cq_3 & Sq_3 & 0 & l(-Cq_3 + Sq_2 + 1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ \hat{w} \\ \hat{h} \end{matrix} \quad (4)$$

De la ecuación (4) en la última columna podemos determinar la posición del efector final del manipulador quedando de la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} x &= l(Cq_1Sq_3 + Cq_1Cq_2) \\ y &= l(Sq_1Sq_3 + Sq_1Cq_2) \\ z &= l(-Cq_3 + Sq_2 + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

La validación experimental de la ecuación (5) que representa la posición cartesiana del efector final proyectada en el sistema de coordenadas O_{sc0} se muestra en la Figura (2). Los ángulos de las articulaciones están dados por $q_1 = 19.99^\circ$ $q_2 = 60.09^\circ$ $q_3 = 59.53^\circ$

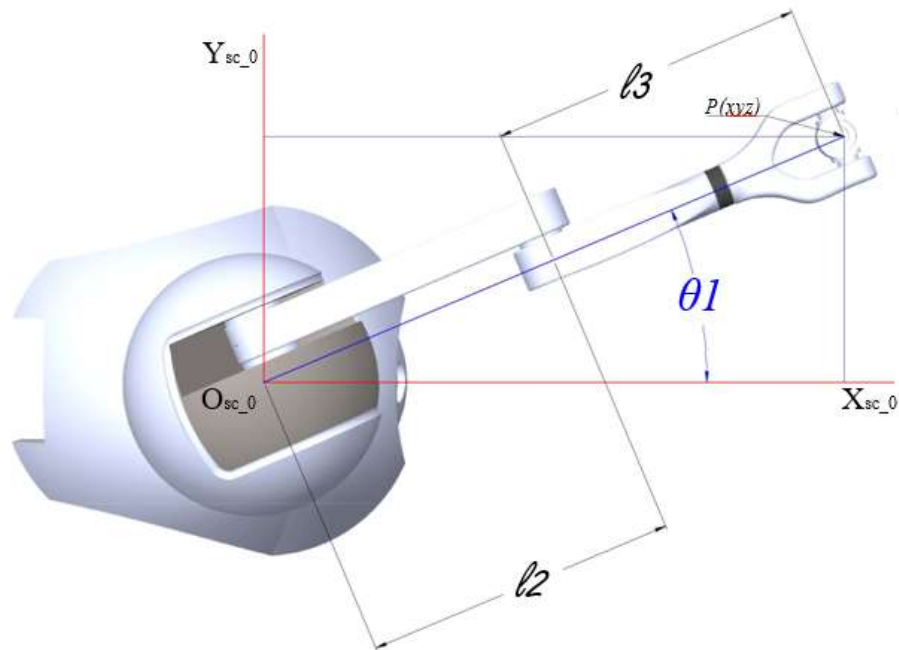
Figura 2 Validación de la cinemática directa del OMNI PHANTOM



3. Cinemática inversa de posición

Uno de los métodos más utilizados para resolver el problema de cinemática inversa en los manipuladores es el método gráfico. Su característica principal se basa en encontrar un número suficiente de relaciones geométricas (principalmente triángulos) en las que las coordenadas cartesianas del extremo del manipulador $P(x_{sc0}, y_{sc0}, z_{sc0})$ sus coordenadas articulares y las dimensiones de sus eslabones se relacionen entre sí (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1999)

La Figura 3 se puede observar una vista superior del manipulador proyectando $P(x_{sc0}, y_{sc0}, z_{sc0})$ sobre el plano (x_{sc0}, y_{sc0}) el cual forma un triángulo rectángulo para encontrar el valor de q_1 .

Figura 3 vista superior del manipulador

Resolviendo por propiedades trigonométricas para encontrar el valor de q_1

$$q_1 = \text{tg}^{-1} \frac{\frac{\partial y_{sc0}}{\partial x_{sc0}}}{\frac{\partial z_{sc0}}{\partial x_{sc0}}} \quad (6)$$

Con apoyo de la vista lateral del dispositivo como se muestra en la figura (4), donde sólo se consideran los eslabones 2 y 3 que se encuentran en el plano (x_{sc0}, z_{sc0}) . Debido a la configuración mecánica del dispositivo háptico se analiza en la configuración de codo arriba misma que se observa en la figura. El valor de q_2 está dado por el valor de los ángulos auxiliares como es el caso de α y β .

Para el cálculo del ángulo a se considera el triángulo rectángulo formado por los vectores $(r, R, z_{sc0} - l_1)$ donde r es el vector formado por $P(x_{sc0}, y_{sc0}, z_{sc0})$ proyectado sobre el plano (x_{sc0}, y_{sc0})

$$r = \sqrt{(x_{sc0})^2 + (y_{sc0})^2} \quad (7)$$

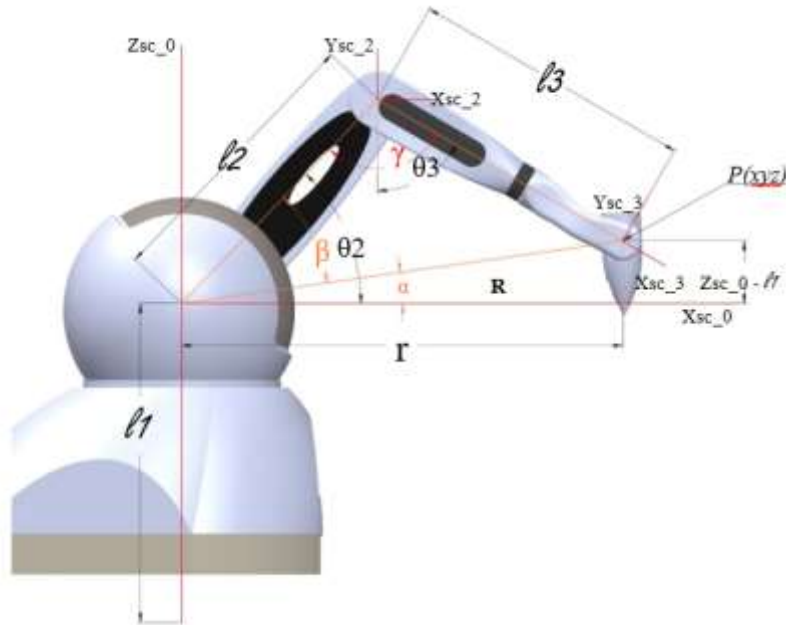
El vector R de la ecuación (7) es la resultante del punto $P(x_{sc0}, y_{sc0}, z_{sc0})$ con el origen $z_{sc0} - l$

$$R = \sqrt{(r)^2 + (z_{sc0} - l)^2} \quad (8)$$

Una vez calculados los valores de los vectores formados en el triángulo rectángulo se calcula el valor del ángulo a

$$a = \text{tg}^{-1} \frac{(z_{sc0} - l)}{r} \quad (9)$$

Figura 4 Vista lateral del manipulador



Para el cálculo del ángulo b se considera el triángulo formado por los vectores de (l_2, l_3, R) y por la ley de los cosenos se tiene la siguiente ecuación:

$$b = \cos^{-1} \frac{\alpha R}{2l} \quad (10)$$

Por lo tanto el ángulo q_2 es la sumatoria de a y b de las ecuaciones (9) y (10)

$$q_2 = a + b \quad (11)$$

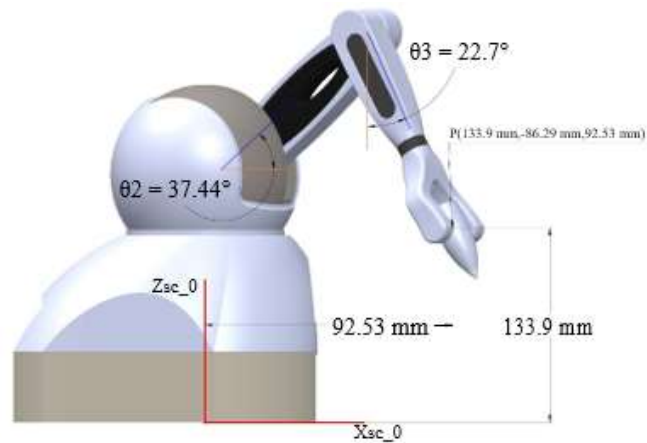
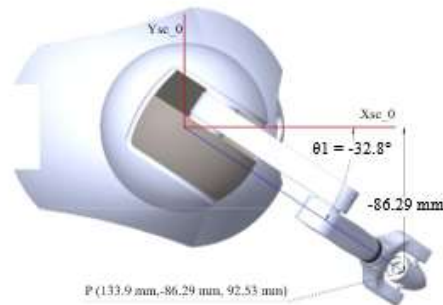
Para encontrar el ángulo q_3 se considera el mismo triángulo anterior y considerando un ángulo de 90° entre el eje y_{sc2} negativo y el eje x_{sc2} positivo se puede deducir la siguiente ecuación.

$$q_3 = g + q_2 - 90 \quad (12)$$

donde

$$g = \cos^{-1} \frac{\alpha 2l^2 - R^2}{2l^2} \quad (13)$$

Para validar el modelo cinemático inverso de posición se ingresan los valores de $x_{sc0} = 133.9 \text{ mm}$, $y_{sc0} = -86.29 \text{ mm}$ y $z_{sc0} = 92.53 \text{ mm}$ del efector final respecto al sistema de coordenadas de origen, con ayuda del modelo hecho en SolidWorks se verifican los valores que deben tomar los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 , tal como se muestra en la Figura

Figura 5 Validación de la cinemática inversa(a) Proyección en el plano $X_{sc0} Z_{sc0}$ (b) Proyección en el plano $X_{sc0} Y_{sc0}$

4. Modelo cinemático de velocidad

Cuando se habla de control de un manipulador se debe conocer además de la relación de posición del extremo final del robot respecto al sistema de referencia en la base de este, la relación que existe en la velocidad que el robot debe enviar a cada actuador, para conseguir llegar de un punto a otro a una velocidad deseada. A la relación que existe entre las velocidades articulares y velocidades cartesianas del manipulador, se le conoce como matriz jacobiana. De aquí surgen dos problemas; problema cinemático directo e inverso de velocidad. (Mark & Vidyasagar, 1989)

Análisis de velocidad angular

El método directo para calcular la matriz Jacobiana (J) (ecuación 14) es obtener las derivadas parciales correspondientes a la cinemática directa (ecuación 4)

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \frac{\partial x}{\partial q_3} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \frac{\partial y}{\partial q_3} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \frac{\partial z}{\partial q_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$J = \begin{bmatrix} -lS_1(S_3+C_2) & -lC_1S_2 & lC_1C_3 \\ lC_1(S_3+C_2) & -lS_1S_2 & lS_1C_3 \\ 0 & lC_2 & lS_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Cinemática directa de velocidad

El problema cinemático directo de velocidad se resuelve usando la siguiente ecuación

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (16)$$

donde \dot{x} representa la velocidad lineal de las articulaciones del manipulador, J es la matriz jacobiana y \dot{q} la velocidad angular.

Sustituyendo los parámetros de la ecuación (16) se obtiene la ecuación (17) que representa el modelo cinemático directo de velocidad

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -lS_1(S_3+C_2) & -lC_1S_2 & lC_1C_3 \\ lC_1(S_3+C_2) & -lS_1S_2 & lS_1C_3 \\ 0 & lC_2 & lS_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Cinemática inversa de velocidad

Por otra parte la cinemática inversa de velocidad se obtiene al despejar el valor de \dot{q} la ecuación (16)

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{x} \quad (18)$$

De este modo se verifica que la matriz J tenga inversa, por lo que se debe cumplir la igualdad: $\det(J) \neq 0$, si esta se cumple se obtiene la matriz Jacobiana inversa como se muestra en la ecuación (19)

$$J^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{S_1}{l(S_3+C_2)} & -\frac{C_1}{l(S_3+C_2)} & 0 \\ \frac{C_1S_3}{l(C_3C_2+S_2S_3)} & -\frac{S_1S_3}{l(C_3C_2+S_2S_3)} & \frac{C_3}{l(C_3C_2+S_2S_3)} \\ \frac{C_2C_1}{l(C_3C_2+S_2S_3)} & \frac{C_2S_1}{l(C_3C_2+S_2S_3)} & \frac{S_2}{l(C_3C_2+S_2S_3)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} \quad (19)$$

Sustituyendo la ecuación (19) en la ecuación (18), se tiene la ecuación (20) que representa el modelo cinemático inverso de velocidad.

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{S_1}{l(S_3+C_2)} & -\frac{C_1}{l(S_3+C_2)} & 0 \\ \frac{C_1S_3}{l(C_3C_2+S_2S_3)} & -\frac{S_1S_3}{l(C_3C_2+S_2S_3)} & \frac{C_3}{l(C_3C_2+S_2S_3)} \\ \frac{C_2C_1}{l(C_3C_2+S_2S_3)} & \frac{C_2S_1}{l(C_3C_2+S_2S_3)} & \frac{S_2}{l(C_3C_2+S_2S_3)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Modelo cinemático de aceleración

La cinemática directa de aceleración representa un importante aspecto en el control de fuerza del manipulador a lo largo de una trayectoria, y permite determinar el estado de aceleración de la herramienta (compuesto por tres aceleraciones lineales y tres aceleraciones angulares).

La cinemática directa de aceleración busca conocer el efecto que tiene, en el movimiento de la herramienta, la aceleración de cada una de las articulaciones para cada punto de una trayectoria. El problema se puede plantear como: conocidos los ángulos de las articulaciones, la posición y velocidad del efector final, las velocidades de las articulaciones, estado de velocidad del efector final, conocer el comportamiento de la aceleración del efector final.

La cinemática directa de aceleración se obtiene al derivar la ecuación (18)

$$\ddot{x} = \dot{J}\dot{q} + J\ddot{q} \quad (21)$$

donde \dot{J} se obtiene de las derivadas parciales de la matriz Jacobiana (ecuación 15)

(22)

Cinemática inversa de aceleración

En la cinemática inversa de aceleración se desea conocer las aceleraciones de las articulaciones actuadas en función del estado de aceleración del efector final. El problema puede plantearse como: conocidos los ángulos de posición del manipulador, la posición y orientación del efector final, las velocidades de articulaciones, la velocidad del efector final y las aceleraciones angulares del efector final, la aceleración lineal del efector final y las aceleraciones angulares. Para poder encontrar la cinemática inversa de aceleración se aplica el método de la transpuesta del Jacobiano.

$$\ddot{q} = J^{-1} \dot{J} \ddot{x} - \dot{J} \dot{q} \dot{q} \quad (23)$$

5. Modelo dinámico

En el control de manipuladores es necesario conocer las ecuaciones que describen su comportamiento dinámico, dichas formulaciones matemáticas relacionan el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo. El estudio dinámico depende en gran parte de los parámetros del robot (masa y geometría de sus eslabones, inercias, etc.) así como las fuerzas aplicadas en cada una de sus articulaciones este se puede obtener a partir de leyes físicas (newtoniana y lagrangiana). El presente trabajo se desarrolló por el método de Euler-Lagrange, el cual se realiza paso por paso en los párrafos siguientes. Las masas de los eslabones se obtuvieron a partir del modelo del manipulador diseñado en SolidWorks, las geometrías de los eslabones se tomaron como figuras regulares.

Formulación de Euler-Lagrange

Este método parte de la información cinemática del elemento como se analizó en el apartado 1, y se emplea la técnica dinámica lagrangiana para obtener las ecuaciones dinámicas del robot. El algoritmo de Euler-Lagrange (E-L) para obtener la dinámica de un manipulador con n grados de libertad (gdl) se basa en los siguientes puntos:

1. La matriz de transformación de coordenadas homogéneas $4 \times 4, {}^{i-1}A_i$ que describe la relación espacial entre los sistemas de coordenadas del elemento i -ésimo y el elemento $(i-1)$ ésimo. Relaciona un punto fijado en el elemento i expresado en coordenadas homogéneas con respecto al sistema de coordenadas i -ésimo en el sistema de coordenadas $(i-1)$ ésimo.
2. La ecuación de Euler-Lagrange

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (24)$$

donde

$L = K(q, \dot{q}) - P(q)$ Función lagrangiana

$K =$ Energía cinética total del brazo

$P =$ Energía potencial del brazo

$q_i =$ Coordenada generalizada del brazo

La energía cinética $K(q, \dot{q})$ de un robot manipulador de n -gdl se expresa en función de la velocidad articular.

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T H(q) \dot{q} \quad (25)$$

Donde $H(q)$ es una matriz simétrica definida positiva de $n \times n$ a la que se le conoce como matriz de inercia. Por otro lado, la energía potencial $P(q)$ tiene una dependencia del vector velocidad q debido a que considera campos conservatorios como la fuerza gravitacional.

La ecuación (24) puede representarse como

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left(\frac{1}{2} \dot{q}^T H(q) \dot{q} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{1}{2} \dot{q}^T H(q) \dot{q} \right) + \frac{\partial}{\partial q} P(q) = t \quad (26)$$

donde

$$\frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left(\frac{1}{2} \dot{q}^T H(q) \dot{q} \right) = H(q) \dot{q}$$

$$\frac{d}{dt} \left(H(q) \dot{q} \right) = H(q) \ddot{q} + \dot{H}(q) \dot{q}$$

Apartir de la ecuacion (26) y las expresiones anteriores la ecuacion que describe la dinámica de los manipuladores:

$$H(q) \ddot{q} + \dot{H}(q) \dot{q} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{1}{2} \dot{q}^T H(q) \dot{q} \right)}_{C(q, \dot{q}) \dot{q}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial q} P(q)}_{g(q)} = t \quad (27)$$

generalizando la ecuación anterior en forma matricial se puede representar como

$$t = H(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) \quad (28)$$

6. Modelo dinámico del OMNI PHANToM

El modelo dinámico de la ecuación (28) que describe el comportamiento del manipulador OMNI PHANToM® se obtiene mediante el método de Euler - Lagrange. Para calcular la matriz de inercias del manipulador es importante determinar las velocidades articulares.

Matriz de tensor inercial

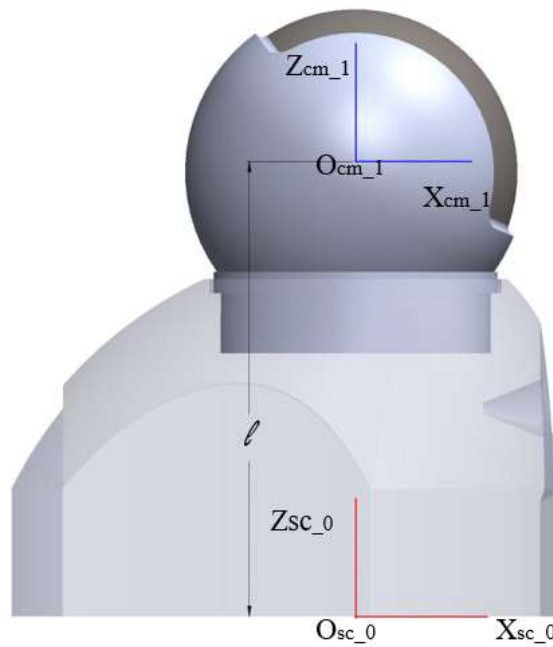
La matriz de tensor inercial se obtiene mediante la ecuacion (29), depende de la geometría y masa de la articulación i , misma que debe ser expresada en el sistema de coordenadas del elemento i -esimo

$$J_i = \begin{pmatrix} \frac{-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{xy} & I_{xz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{xy} & \frac{I_{xx} - I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{yz} & m_i \bar{y}_i \\ I_{xz} & I_{yz} & \frac{I_{xx} + I_{yy} - I_{zz}}{2} & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{pmatrix} \quad (29)$$

Articulación 1

En la Figura 6 se muestra el primer eslabón que forma la cadena cinemática del robot manipulador, para este trabajo y con la finalidad de simplificar los cálculos, la geometría de cada uno de los eslabones se aproxima a una figura regular, para esta primera articulación se modela como una esfera sólida.

Figura 6 Sistemas de coordenadas de eslabón 1



Cuando el eje de coordenadas de referencia está en el centro de masas O_{cm-1} de la esfera sólida, la ecuación (30) representa su momento de inercia, en la Figura (6) se muestra este sistemas de coordenadas.

$$\begin{aligned} \bar{I}_x = \bar{I}_y = \bar{I}_z &= \frac{2}{5} m_i l^2 \\ \bar{I}_{xy} = \bar{I}_{xz} = \bar{I}_{yz} &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

Sin embargo, los momentos de inercia deben expresarse en el sistema de coordenadas O_{sc-1} donde se aplica el movimiento. Es fácil notar que, para este primer eslabon se aplica en el sistemas de coordenadas O_{sc-0} . El vector 1r_1 que representa el sistema de coordendas centro de masas está dado por la ecuacion:

$${}^1r_1 = \begin{pmatrix} \hat{e}_x 0 \\ \hat{e}_y \hat{u} \\ \hat{e}_z 0 \\ \hat{e}_t -l \\ \hat{e}_t 1 \end{pmatrix} \quad (31)$$

Ahora bien, por el teorema de los ejes paralelos se tienene los momentos de inercia del eslabón 1

$$\begin{aligned}
 I_{xx} = I_{yy} &= \frac{7}{5} m_1 l^2 \\
 I_{zz} &= \frac{2}{5} m_1 l^2 \\
 I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

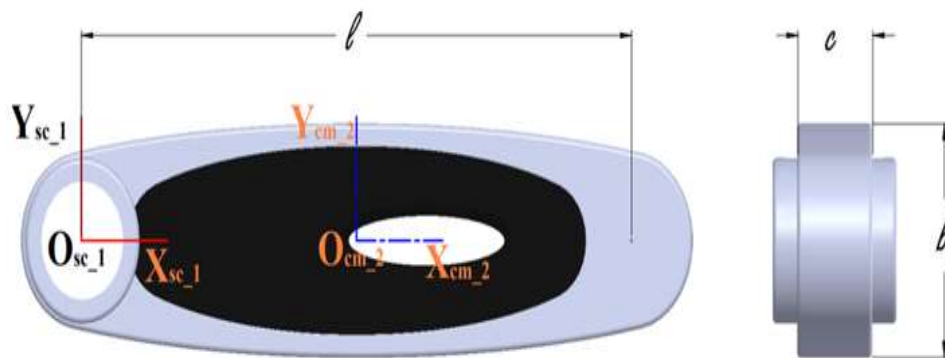
Por lo tanto la matriz de tensor de inercia correspondiente al primer eslabón es:

$$J_i = \begin{pmatrix} \frac{1}{5} m_1 l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{5} m_1 l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6}{5} m_1 l^2 & -m_1 l \\ 0 & 0 & -m_1 l & m_1 \end{pmatrix}
 \tag{33}$$

Articulación 2

La Figura 7 muestra la geometría del segundo eslabón, mismo que se analiza como un prisma rectangular.

Figura 7 Sistema de centro de masas del eslabón 2.



La ecuación 34 muestra el momento de inercia de un prisma rectangular cuando el eje de referencia se encuentra en el centro de masa O_{cm_2} .

$$\begin{aligned}
 I_x &= \frac{1}{12} m_2 (b^2 + c^2) \\
 I_y &= \frac{1}{12} m_2 (c^2 + l^2) \\
 I_z &= \frac{1}{12} m_2 (l^2 + b^2) \\
 I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

7. Dispositivo háptico y sensor de fuerza

El dispositivo háptico Geomagic Touch™ (OMNI PHANTOM) proporciona una auténtica navegación tridimensional y retroalimentación de fuerza e integran el sentido del tacto en los sistemas de modelado 3D, así como en aplicaciones comerciales y de investigación. Este dispositivo háptico de 3D Systems puede medir de forma precisa la posición espacial 3D (a lo largo de los ejes (X,Y,Z)) y la orientación (giro, inclinación y dirección) del lápiz de mano. Utiliza motores para crear las fuerzas de retorno en la mano del usuario para simular el tacto y la interacción con objetos virtuales, es decir, proporcionar una retroalimentación de fuerza de 4 grados de libertad (DOF).

Figura 8 Dispositivo háptico



En la tabla 1 se muestran las especificación del dispositivo háptico OMNI PHANTOM

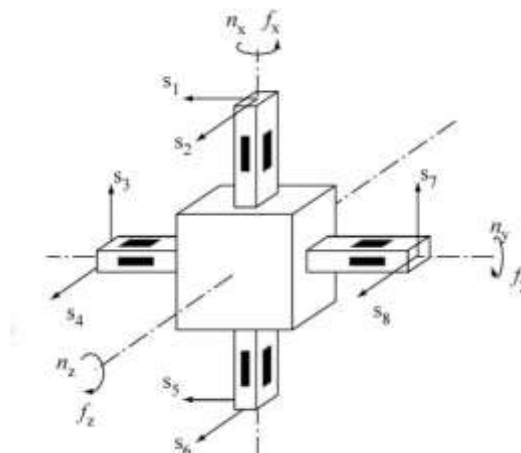
Tabla 1 Parametros del manipulador OMNI PHANTOM

Área de trabajo	160 An x 120 Al x 70 P mm
Rango de movimiento	Movimiento de la mano con giro de la muñeca
Resolución nominal	0.055mm
Fuerza máxima	3.3 N
Retroalimentación de fuerza	X,y,z
Interfaz	Puerto Ethernet conforme a RJ45

8. Sensor Fuerza/Torsion Gamma

Los sensores de fuerza y par utilizan sensores piezorresistivos que presentan una resistencia variable a la deformación sufrida

Figura 9 Sensor de fuerza



La medición de fuerza y torsión es utilizada para el estudio de materiales, medidas de peso, fijación de tornillos, diagnósticos médicos, pruebas automotrices, entre otros. Los sensores basados en galgas extensiométricas permiten medir estas variables físicas, transformando las variables físicas en señales eléctricas.

Una galga extensiométrica es un dispositivo que se basa en el efecto piezorresistivo, el cual es una propiedad de algunos materiales, que cambian la resistencia eléctrica cuando se someten a ciertos esfuerzos o se deforman en dirección de los ejes mecánicos. Las galgas se basan en la propiedad física de conductancia eléctrica y depende de la geometría del conductor. Cuando un conductor eléctrico se estira, cuando un conductor es comprimido, este se vuelve más ancho y corto, disminuyendo así su resistencia eléctrica.

Midiendo la resistencia eléctrica de la galga, se puede entonces calcular el valor de la tensión aplicada. El cambio de resistencia es medido a través de un puente de Wheatstone balanceando los brazos de un circuito puente. El puente consiste en cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida (R_x).

9. Sensor de F/T Modelo GAMMA y componentes

El sistema del sensor de fuerza/torque ATI de multi ejes (Ver figura) mide los seis componentes de fuerza y torque. El sistema consiste en transductor, cable flexible recubierto y sistema de adquisición de dato, interfaz Ethernet/DeviceNet. Este tipo de sensores se utiliza en la industria para la prueba de productos, montaje robótico, trituración y pulido. En el campo de la investigación se utiliza en procesos quirúrgicos robóticos, tecnología háptica, rehabilitación, neurología entre otras aplicaciones. (Automation, 2018)

Figura 10 Sensor de fuerza F/T Modelo GAMMA



El sistema completo asociado al sensor está formado por los siguientes componentes:

- Transductor
- Cable del transductor
- Controlador

Especificaciones técnicas de sensor ATI GAMMA

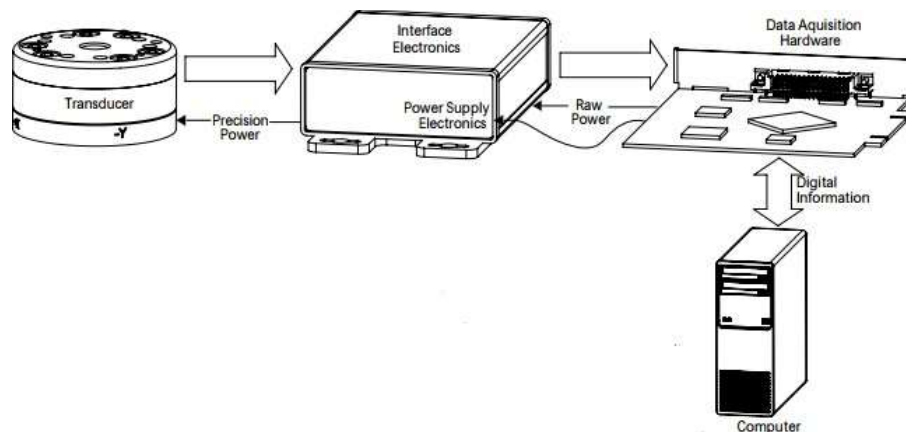
En la Tabla se muestran las especificaciones técnicas del sensor.

Tabla 2 Especificaciones técnicas del sensor ATI GAMMA

Sobrecarga de eje único	
F_{xy}	$\pm 1200N$
F_z	$\pm 4100N$
T_{xy}	$\pm 79N$
T_z	$\pm 82N$
Rigidez calculada	
Fuerza de eje x; Fuerza eje y (Kx,Ky)	$9.1 \cdot 10^6 N / m$
Fuerza del eje z (Kz)	$1.8 \cdot 10^7 N / m$
Torque del eje x; fuerza del eje y (Ktx,Kty)	$1.1 \cdot 10^4 N / rad$
Torque del eje z (Ktz)	$1.6 \cdot 10^4 N / rad$
Frecuencia resonante	
F_x, F_y, T_z	1400Hz
F_z, T_x, T_y	2000Hz
Especificaciones físicas	
Peso	0.25 Kg
Diámetro	75.4mm
Altura	33.3mm

10. Adquisición de Datos

En la figura se muestra el diagrama de conexión del sensor con la computadora y los componentes necesarios.

Figura 11 Diagrama de conexión

11. Técnicas de control

Los robots en algunas ocasiones se clasifican tomando en cuenta los movimientos que efectúan de su espacio de trabajo, al realizar una tarea. Una de estas clasificaciones se presenta cuando el robot realiza una tarea sin llevar a cabo una interacción especializada con su medio, es decir, el robot manipulador únicamente cambia de una a otra coordenada espacial en su espacio de trabajo, tal clasificación en teoría de control es conocida como regulación, debido a que su finalidad es la de llevar las ecuaciones de error del sistema a cero. Matemáticamente $\tilde{x} = 0$, donde \tilde{x} es el error, $\tilde{x} = x - x_d$, x son los estados del sistema y x_d es una posición deseada del sistema. La regulación sucesiva de coordenadas espaciales constituye una tarea de movimiento coordinado, usualmente empleada en procesos de manufactura flexible (Ordaz Oliver, J. Patricio y Alejandro, 2009). Otra clasificación otorgada a robots es el seguimiento de trayectorias, generalmente basada en ecuaciones paramétricas, lo cual implica una interacción más especializada con su medio. Para esta clasificación, al igual que en regulación se pretende llevar las ecuaciones de error a cero, es decir. (Reyes Cortez, 2011)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} q(t) - q_d(t) \approx 0 \quad (35)$$

Otra de las clasificaciones del control es la de seguimiento en la que el manipulador interactúa con su medio, es decir, cuando el manipulador aplica fuerza sobre una superficie para ejecutar tareas como barrenado, soldadura, pintura, etc. Distintas técnicas de control de posición y fuerza corresponden a un control híbrido en que la fuerza y posición pueden construir una tarea de regulación o seguimiento.

12. Control de seguimiento

El algoritmo de control de posición en movimiento libre (sin restricciones). La finalidad es mover el manipulador de la posición inicial hasta tocar la superficie donde existan restricciones, posteriormente regresar a la posición inicial una vez terminada la tarea en el entorno.

Considerando un manipulador en movimiento libre, el cual su dinámica viene dada por la siguiente expresión

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = t \quad (36)$$

Para asegurar el control se tiene que definir los errores

$$\tilde{q} = q - q_d \quad (37)$$

Otro error es el error residual deslizante el cual asegura la convergencia y la acotación de q y \dot{q} dado por

$$s = \dot{q} - \dot{q}_r \quad (38)$$

$$\dot{q}_r = \dot{q} - L\tilde{q} \quad (39)$$

La velocidad de referencia \dot{q}_r dada por la velocidad deseada en consecuencia al error de posición, garantiza la convergencia del error a cero.

El controlador propuesto para el control de posición sin restricciones está dado por

$$t = H(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q}_r)\dot{q}_r + g(q) + K_R\dot{q}_r \quad (40)$$

Donde $K_R \hat{=} R^{n \times n}$ es una matriz diagonal positiva.

Substituyendo la en la ecuación, se puede calcular la dinámica del manipulador en lazo cerrado como:

$$H(q)(\ddot{q} - \ddot{q}_r) + C(q, \dot{q})\dot{q} - C(q, \dot{q}_r)\dot{q}_r = K_R\dot{q}_r \quad (41)$$

Substituyendo el error de la velocidad de referencia, la dinámica en lazo cerrado del manipulador queda como:

$$H(q)\dot{s} = C(q, \dot{q}_r)\dot{q}_r - C(q, \dot{q})\dot{q} + K_R\dot{q}_r \quad (42)$$

donde el término $C(q, \dot{q})\dot{q} - C(q, \dot{q}_r)\dot{q}_r$ se ha manipulado

$$\begin{aligned}
C(q, \dot{q}_r) \dot{q}_r - C(q, \dot{q}) \dot{q} &= C(q, \dot{q}_r) \dot{q}_r - C(q, \dot{q}) \dot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q}_r - C(q, \dot{q}) \dot{q}_r \\
&= -C(q, \dot{q}) (\dot{q} - \dot{q}_r) - C(q, \dot{q} - \dot{q}_r) \dot{q}_r \\
&= -C(q, \dot{q}) s - C(q, \dot{q}_r) s
\end{aligned} \tag{43}$$

Por lo que la dinámica del manipulador en lazo cerrado queda como

$$H(q) \dot{s} = -C(q - \dot{q}) s - C(q, \dot{q}_r) s + K_R \dot{q}_r \tag{44}$$

Para demostrar la estabilidad del modelo se emplea la estabilidad en sentido de Lyapunov, donde se propone una función candidata de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} s^T H(q) s \tag{45}$$

que se interpreta como el total de la energía asociada con el sistema de lazo cerrado.

Derivando la función candidata de Lyapunov se tiene que

$$\dot{V} = s^T H(q) \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{H}(q) s \tag{46}$$

Substituyendo las ecuaciones se tiene

$$\dot{V} = s^T \{-C(q - \dot{q}) s - C(q, \dot{q}_r) s + K_R \dot{q}_r\} + \frac{1}{2} s^T \dot{H}(q) s \tag{47}$$

Utilizando la propiedad $\frac{1}{2} s^T \dot{H}(q) s - s^T C(q, \dot{q}_r) s = 0$, la ecuación anterior queda como

$$\dot{V} = -s^T C(q - \dot{q}) s + s^T K_R \dot{q}_r \tag{48}$$

Como se puede observar la ecuación anterior se tiene un término positivo por lo cual tiene que acotar por normas para que pueda cumplir con la estabilidad de Lyapunov, si s está acotado por s_{\max} y tiende a cero, entonces el error de la posición \tilde{q} y la velocidad del error $\dot{\tilde{q}}$ debe permanecer acotados, por lo tanto, tienden a cero.

$$m_1 = \max \|C(q, \dot{q})\| \tag{49}$$

$$\|x\| \leq x_{\max} \tag{50}$$

$$X_D = x_{\max}(D) \tag{51}$$

$$X_d = x_{\min}(D) \tag{52}$$

Entonces la derivada de la función candidata de Lyapunov se tienen como

$$\begin{aligned}
\dot{V} &\leq -m_1 \|s\|^2 \|x^2 - x_d\| \|s^2\| + x_{\max}(K_R) \|s\|^2 \\
\dot{V} &\leq -(m_1 + x_d - x_{\max}(K_R)) \|s\|^2
\end{aligned} \tag{53}$$

Donde:

$$x_{\max}(K_R) \leq m_1 + x_d \quad (54)$$

De acuerdo con la definición de Lyapunov se establece que la función candidata de Lyapunov cumple con la condición adad. $K_R \hat{I} R$ es una matriz propuesta como ganancia del controlador.

Por lo tanto, se obtiene que el control dado por la ecuación () es un controlador sin restricciones, y el error de la posición tiende a cero cuando el tiempo tiende a infinito.

13. Control de posición y fuerza

En este apartado se analizará el problema de control de fuerza. Para el análisis del controlador se posición y fuerza, además de los errores de seguimiento de posición se definen los siguientes errores.

$$D\dot{p} = \dot{p} - \dot{p}_d \quad (55)$$

$$Dl = l - l_d \quad (56)$$

$$Dp = p - p_d \quad (57)$$

donde p_d es la posición deseada restringida la cual satisface $j(q) = 0, l_d$ es la fuerza deseada aplicada sobre la superficie. Para explotar el echo de que el principio de ortogonalización se establece en el espacio articular a nivel de velocidad, se propone una señal de referencia \dot{q}_r a nivel de velocidad, llamada referencia nominal. Ya que las variables de posición y fuerza son físicamente ortogonales y deben ser controladas, entonces \dot{q}_r debe ser calculada en función de referencias nominales ortogonales en posición y fuerza.

Otra definición es la señal de referencia q_r se puede obtener como

$$\dot{q}_r = Q(q)(\dot{q}_d + L(q_d)) + J_j^+ (\dot{p} - bD_p + xDF) \quad (58)$$

Donde $L = kI \hat{I} R$ con $k > 0$, es una matriz diagonal definida positiva, b y x son constantes positivas. DF se obtiene de

$$DF = \int_0^t D dt \quad (59)$$

dado en (JGLau,2004)

$$\begin{aligned} s &= \dot{q} - \dot{q}_r \\ &= Q(q)(\dot{\tilde{q}} + D\tilde{q}_d) \\ &= J_j^+(q)(D\dot{p} + bD_p - xDF) \end{aligned} \quad (60)$$

Como la ecuacion () esta dividida en dos espacios ortogonales se puede definir como:

$$s = s_p + s_f \quad (61)$$

Donde s_p y s_f son vectores que representan la posición y fuerza respectivamente del sistemas

Derivando la señal de referencia dada por la ecuación () se tiene

$$\begin{aligned} \ddot{q}_r @ Q(q)(\ddot{q} + L\dot{q}_d) + J_j^+(q)(\ddot{p}_d - b(\dot{p} - \dot{p}_d) + xDF) \\ + \dot{Q}(q)(\dot{q} + Lq_d) + J_j^+(q)(\dot{p}_d - b(D\dot{p}) + xDF) \end{aligned} \quad (62)$$

14. Controlador para movimiento restringido

El modelo dinámico de un manipulador con restricciones está dado por

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = t + J_j^+(q)l \quad (63)$$

Por lo que la ley de control que se propone es

$$t = H(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q}_r)\dot{q}_r + K_R\dot{q}_r + J_j^+(-l_d + k_F DF) + g(q) \quad (64)$$

Substituyendo la ecuación (64) en (63) se obtiene la dinámica del manipulador en lazo cerrado

$$\begin{aligned} H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = & H(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q}_r)\dot{q}_r \\ & + K_R\dot{q}_r + J_j^+(-l_d + k_F DF) \\ & + g(q) + J_j^+(q)l \end{aligned} \quad (65)$$

Agrupando términos y substituyendo los errores ya definidos, se obtiene el modelo dinámico del manipulador en lazo cerrado con control de posición t fuerza:

$$H(q)s + C(q, \dot{q})\dot{q} - C(q, \dot{q}_r)\dot{q}_r = K_R\dot{q}_r + J_j^+(q)l(DI + k_F DF) \quad (66)$$

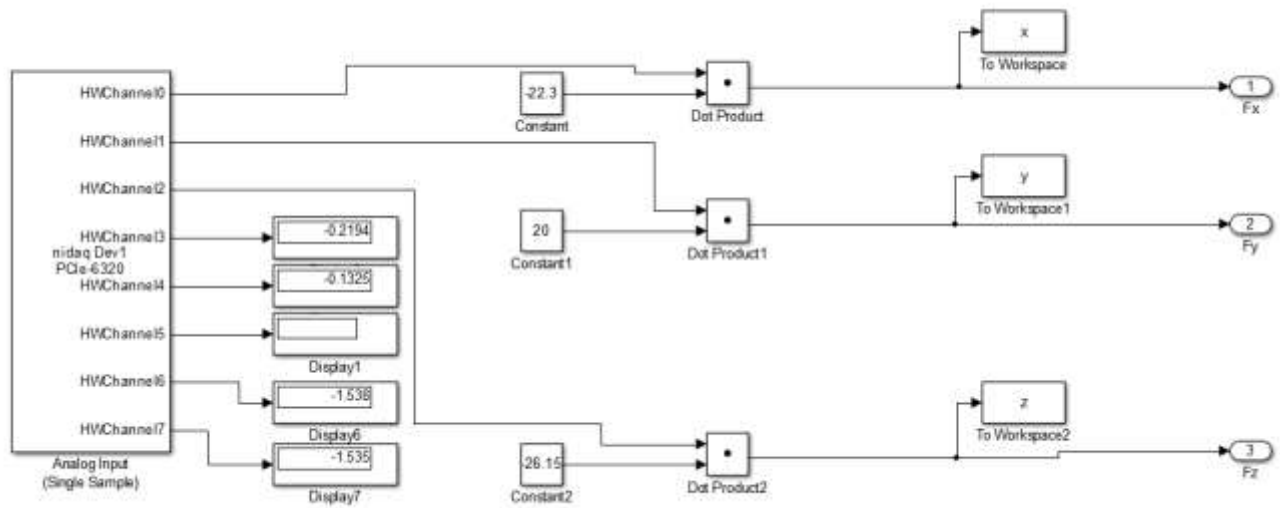
15. Resultados

Para realizar la lectura del sensor ATI se utilizó el programa Simulink de Matlab, teniendo como resultado la fuerza o torque del sensor. En la tabla se muestra los resultados utilizando solo los primeros tres canales que son los de fuerza en x,y,z y tomando en cuenta que el peso de la base también tiene un peso y está siendo medido por el sensor, se obtiene una expresión para convertir el voltaje que proporciona la tarjeta de adquisición de datos a fuerza (Newton). En la figura se muestra diagrama a bloques de la lectura de la Fuerza.

Tabla 3 Canales de salida Fuerza/Torque

	G0	G1	G2	G3	G4	G5
F_x	1	0	0	0	0	0
F_y	0	1	0	0	0	0
F_z	0	0	1	0	0	0
T_x	0	0	0	1	0	0
T_y	0	0	0	0	1	0
T_z	0	0	0	0	0	1

Figura 12 Diagrama a bloques de conexiones



Para comprobar el estudio de la fuerza se hicieron tres experimentos:

El primer experimento se llevó a cabo midiendo la fuerza mientras el efector final no hace contacto con la superficie a una distancia de 65 mm de la posición final. En la Figura 13 se muestra el código de programación que en un tiempo de

Figura 13 Programación de la trayectoria a una distancia de 65 mm de la superficie

```

zp = 3*ax331*(tt^2) + 4*ax341*(tt^3) + 5*ax351*(tt^4);
zpp = 6*ax331*tt + 12*ax341*(tt^2) + 20*ax351*(tt^3);

%% Circunferencia
elseif reloj > 5 && reloj <= 15

    ttt = 10;
    tt = reloj - 5;

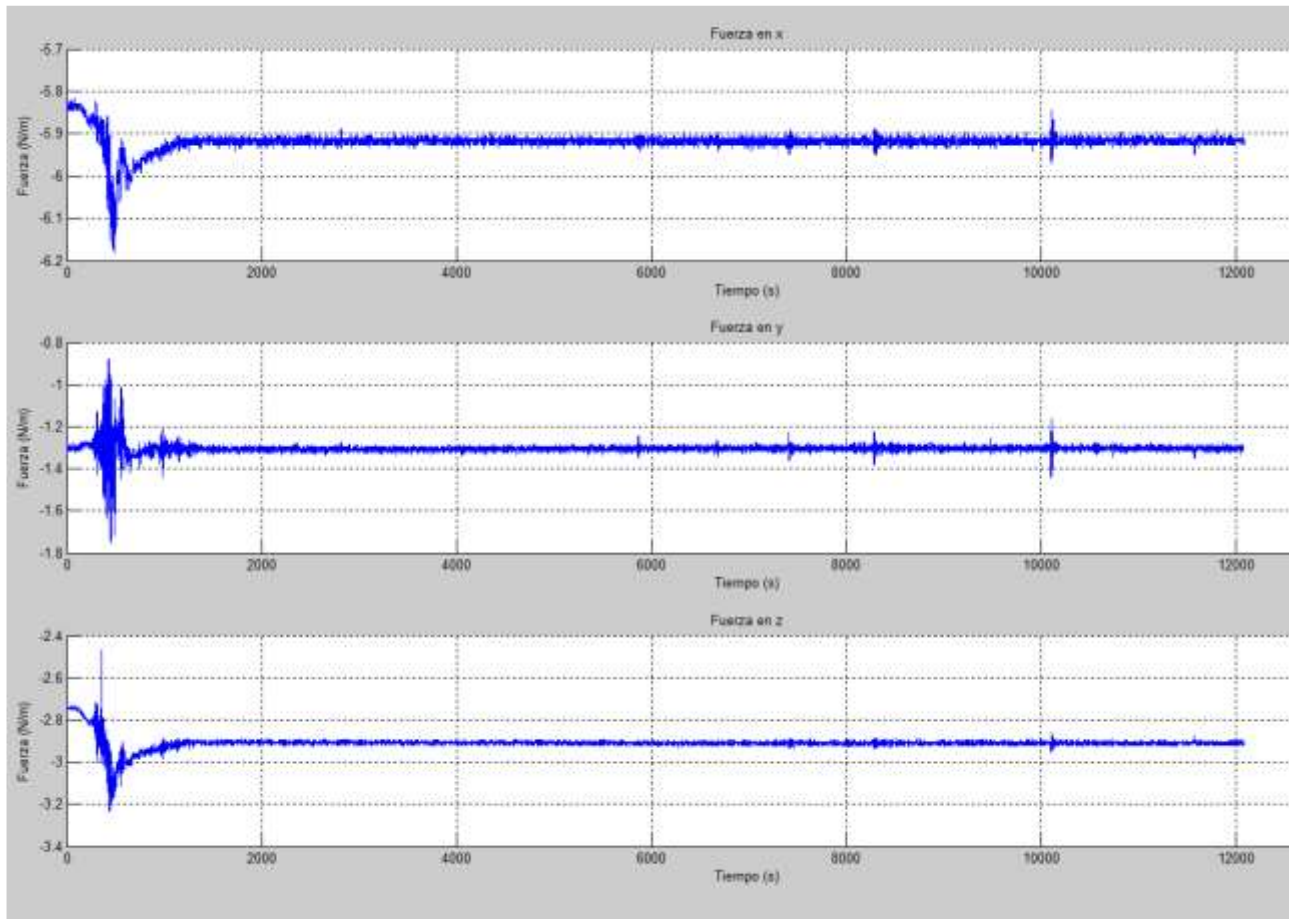
w0 = 0;           %Posicion Angular Inicial
w1 = 2*pi;       %Posicion Angular Final

radio = 25;
xa = 160;
yb = 0;
zc = 65; %ggg

```

En la Figura 14, se puede observar que la fuerza medida en el sensor es constante, esto se debe a que la trayectoria que realizó el Omni Phantom no estuvo en contacto con la superficies.

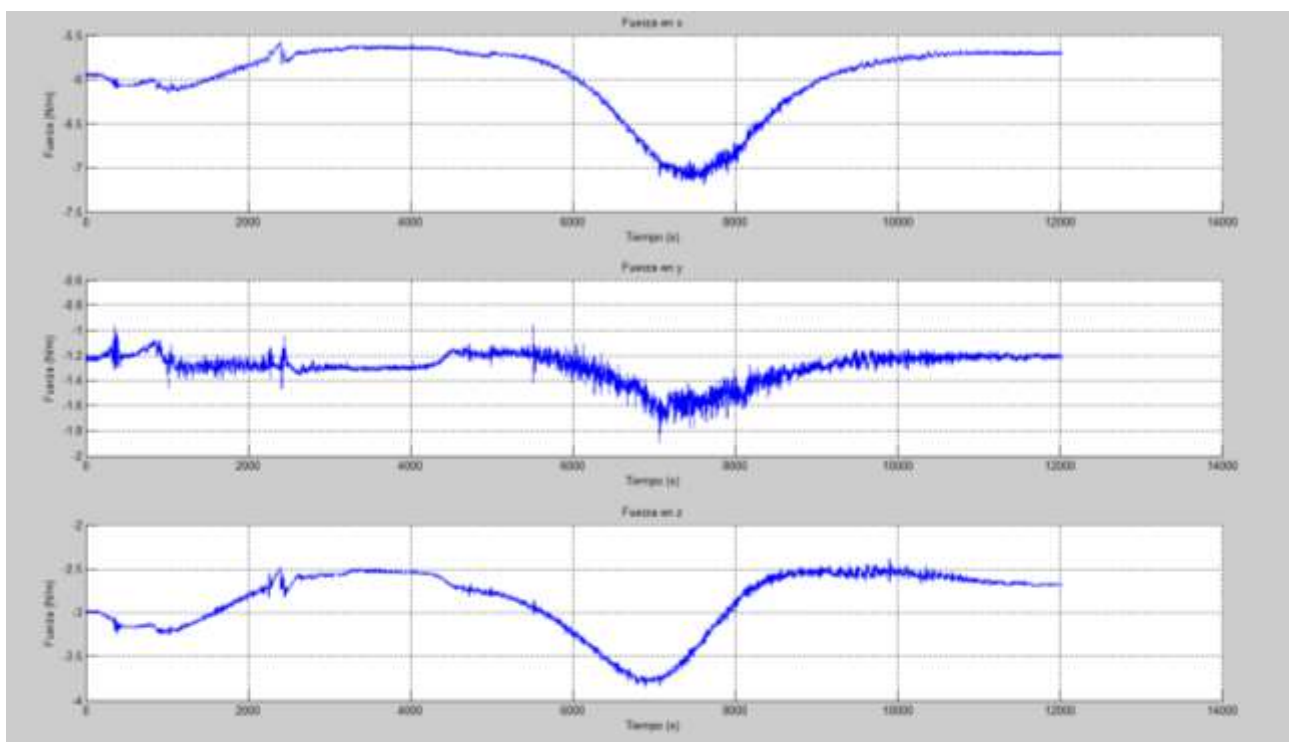
Figura 14 Fuerza graficada durante la trayectoria sin contacto con el sensor



Se realizó un segundo experimento desarrollando la trayectoria de una circunferencia sobre el plano (x, y) de radio de 25 mm, solo que en esta ocasión el efector final de manipulador estuvo en contacto con sensor ATI. La posición del efector final fue de 55 mm.

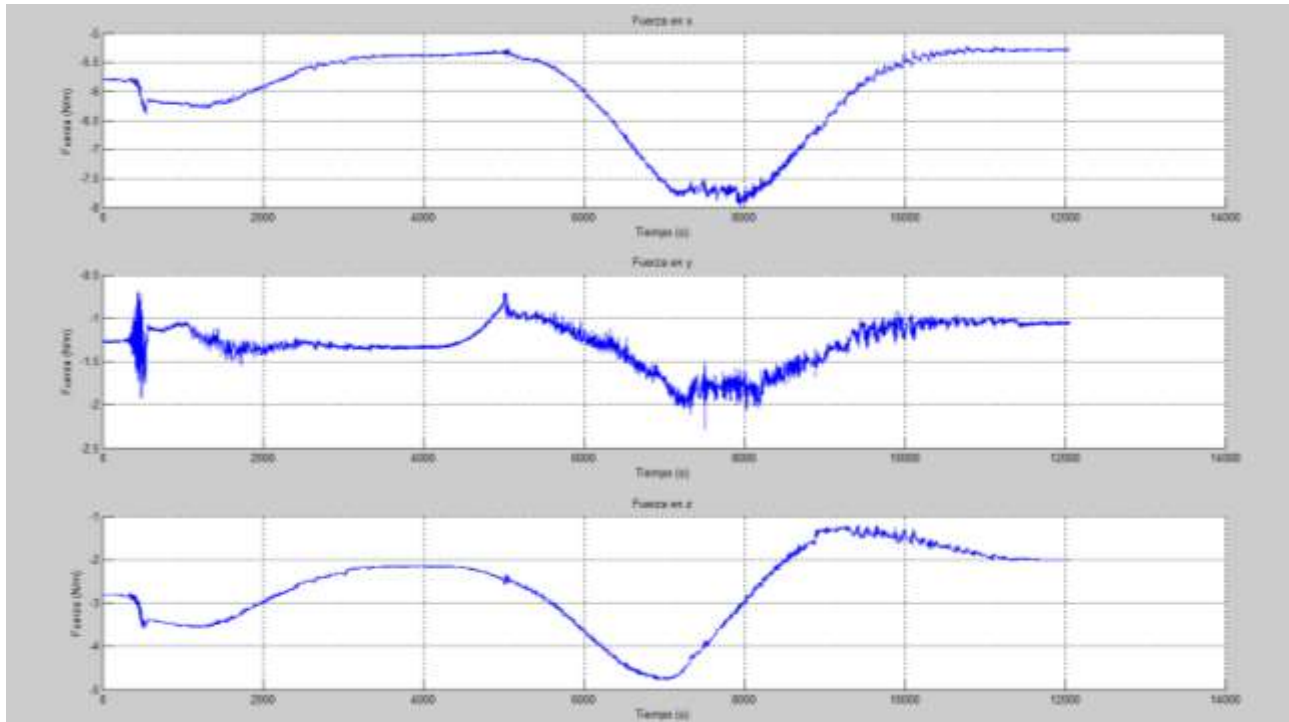
En la Figura 15 se muestran la grafica de las fuerzas generadas en cada uno de los ejes $F_x = -6Nm, F_y = -1.3Nm, F_z = -2.5Nm$.

Figura 15 Fuerza aplicada en la superficie a una distancia de 55 mm del efector final.



Un tercer experimento se desarrollo una trayectoria de circunferencia de radio de 25 mm sobre el plano (x, y) pero ahora la posición del efector final en el eje $z = 45\text{mm}$. Esto quiere decir que fajo 10 mm sobre la superficie. En la Figura 16 se muestra las fuerzas generadas por el manipulador en la superficie de trabajo.

Figura 16 Fuerza graficada durante la trayectoria un centímetro debajo del contacto con



Conclusiones

El presente trabajo describe el modelo cinemático de un manipulador de 6 gdl con validación experimental, lo que demuestra que tanto la cinemática directa e inversa fueron calculadas correctamente. Además, en esta tesis se demostró el modelo dinámico del robot manipulador empleando la formulación de Euler-Lagrange, se demostró con la propiedad de los robots y en simulación que el modelo dinámico tuvo una buena aproximación.

A parte de esto, se implementó un control de fuerza aplicado al robot de tipo descentralizado; es decir, se tomó en cuenta las restricciones de movimiento y se asumió que la dinámica del robot es conocida y dispone de la medición de fuerza estimada. Para corroborar el controlador se realizaron 3 diferentes experimentos con diferente fuerza y siendo comprobados.

Por lo que se puede decir que con el trabajo realizado es posible controlar robots manipuladores que tengan que realizar tareas sobre una superficie aplicando una fuerza deseada.

Referencias

- Automation, A. (12 de Abril de 2018). *ATI Industrial Automation*. Obtenido de ATI Industrial Automation: <http://www.atia.com/es-MX/index.aspx>
- Barrientos, A., Peñín, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (1999). *Fundamentos de Robótica*. España: McGraw Hill.
- Chavez, F., Gudiño, J., Alcalá, J., & Charre-Ibarra, S. (2018). Modelo cinemático directo e inverso del OMNI PHANToM. *ECORFAN*, 25-32.
- Mark, S., & Vidyasagar, M. (1989). *Robot dynamics and control*. USA: John Wiley & sons.
- Reyes Cortez, F. (2011). *Robótica control de robots manipuladores*. México: Alfaomega.

Capítulo 3 Helicóptero didáctico en arquitectura abierta controlado con lógica difusa

Chapter 3 Didactic helicopter in open architecture controlled with fuzzy logic

CHARRE-IBARRA, Saida†*, PÉREZ-CÁRDENAS, Diego, CASTAÑEDA-VILLAFANA, Joanna y ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica, Carretera Manzanillo-Barra de Navidad Km. 20.5, El Naranjo, 28860, Manzanillo, Colima, México

ID 1^{er} Autor: *Saida, Charre-Ibarra* / **ORC ID:** 0000-0002-3823-5388, **Researcher ID Thomson:** Q-6851-2018

ID 1^{er} Coautor: *Diego, Pérez-Cardenas* / **ORC ID:** 0000-0003-3683-4069

ID 2^{do} Coautor: *Joanna, Castañeda-Villafaña* / **ORC ID:** 0000-0001-7832-8450

ID 3^{er} Coautor: *Janeth A, Alcalá Rodríguez* / **ORC ID:** 0000-0002-0238-3952

DOI: 10.35429/H.2021.10.45.65

S. Charre, D. Pérez, J. Castañeda y J. Alcalá

*scharre@uclm.mx

J. Gudiño, E. Hernández, S. Charre, J. Alcalá y M. Duran (AA. VV.). *Proyectos de Ingeniería Aplicada, Ciencia y Tecnología*
©ECORFAN- México, 2021.

Resumen

En el presente trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema didáctico en arquitectura abierta, el cual permite la aplicación de diferentes técnicas para controlar parámetros en un helicóptero. Se demuestra el funcionamiento mediante la aplicación de un controlador difuso, cuya función es la de regular la velocidad de los motores ubicados en el prototipo y por medio de la lectura de los sensores del tipo acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, posicionarlo en un ángulo de inclinación (cabeceo) o en un ángulo de giro (guiñada) deseado. El algoritmo de control se realizó con la herramienta Fuzzy System Designer incluida en el software LabVIEW.

Helicóptero, Sistema didáctico, Control difuso, Arquitectura abierta

Abstract

This paper presents the design and construction of a didactic system in open architecture, which allows the application of different techniques to control parameters in a helicopter. Operation is demonstrated by the application of a fuzzy controller, whose function is to regulate the speed of the engines located in the prototype and by reading the accelerometer, gyroscope and magnetometer type sensors, position it at an angle of inclination (pitch) or rotation (yaw). The control algorithm was performed with the Fuzzy System Designer tool included in the LabVIEW software.

Helicopter, Didactic system, Fuzzy Control, Open architecture

1. Introducción

Los módulos didácticos forman parte del diseño instruccional de los cursos académicos, utilizándose como un recurso para aprender. Debe proveer y contener herramientas que apoyen a los estudiantes a entender y aprender paso a paso cualquier material contenido en un curso educativo (Guerrero-Hernández et al., 2016). En la actualidad el desarrollo que presentan el software y hardware ha revolucionado también la didáctica, y en este contexto ha tenido lugar la renovación y la introducción de nuevos conceptos enfocados a hacer más flexible, dinámico y creativo el proceso enseñanza aprendizaje en las instituciones educativas (Herrera, Merchán & Villamizar, 2010). Sin embargo, en la mayoría de los casos, en el proceso educativo se utilizan equipos no aptos para cumplir el objetivo.

En el mercado hay empresas dedicadas al diseño y fabricación de equipos didácticos con calidad y garantía, pero sus costos son elevados para ser adquiridos por instituciones educativas; por lo que es importante promover el desarrollo y uso de equipos que cumplan con la filosofía del modelo educativo y sean elaborados en las mismas instituciones educativas (Guevara, et al., 2009).

Por lo que el desarrollo de este proyecto surgió a partir de la observación de las necesidades de la institución educativa a la que pertenecen los autores, relacionadas con equipo didáctico relativo a vehículos no tripulados. Dentro de los no tripulados se incluyen los relacionados con drones y helicópteros de dos y tres grados de libertad. Los Vehículos aéreos no tripulados o UAV (Unmanned Aerial Vehicle) son aeronaves que vuelan sin tripulación humana a bordo; el primero fue desarrollado después de la primera guerra mundial y se empleó durante la segunda guerra mundial (Tovar & Figueroa, 2021).

Con el avance de la tecnología de los microprocesadores y el mejoramiento relacionado con las capacidades de las baterías se ha incrementado el desarrollo de este tipo de vehículos y actualmente se pueden observar en aplicaciones civiles de seguridad, vigilancia, recreativas y educativas (Parra, 2015).

Actualmente se encuentra en el mercado equipo educativo de la marca Quanser (Products & Lab Solutions, s.f.), diseñado para la investigación de control avanzado y aplicaciones aeroespaciales, que se utilizan para enseñar conceptos de control, figura 1.

Figura 1 Plataformas didácticas comerciales



a) Quanser AERO



a) b) 3 DOF Helicopter



c) 3 DOF Hover

Fuente: (Products & Lab Solutions, s.f.)

En 2014, Solaque, Cristancho y Gil hacen una comparación entre un controlador PID y un controlador difuso, aplicados en una plataforma experimental de un grado de libertad que cuenta con diseño y construcción de su autoría, observada en la figura 2, que arroja como resultado en el controlador difuso un tiempo de posicionamiento inferior con respecto al controlador PID.

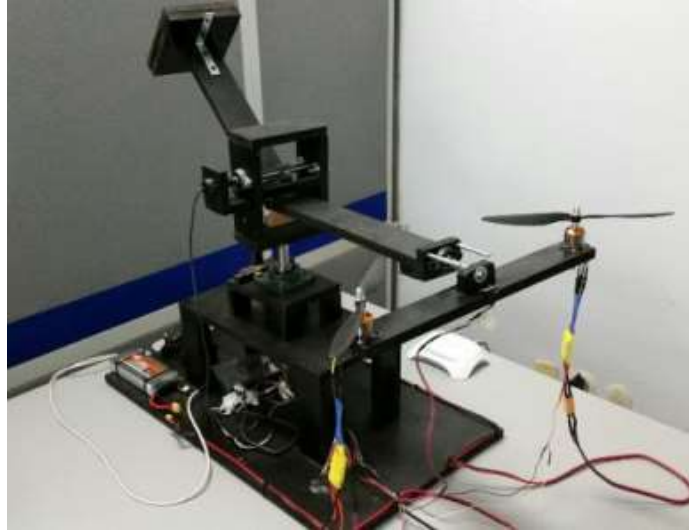
Figura 2 Plataforma experimental tipo helicóptero de un grado de libertad



Fuente: (Solaque, Cristancho, & Gil, 2014)

En la Universidad de Guadalajara diseñaron, construyeron y controlaron aplicando un PID a un helicóptero de tres grados de libertad, figura 3, el cual representa una opción viable y económica para el estudio de algoritmos complejos de control en un sistema dinámico (Brizuela-Mendoza et al., 2019).

Figura 3 Helicóptero de tres grados de libertad



Fuente: (Brizuela-Mendoza, et al., 2019)

Con fundamento en los trabajos anteriormente mencionados se realizó el diseño y construcción del prototipo de un sistema de dos grados de libertad tipo helicóptero, en el que se pueden simular dos de los tres movimientos realizados por un helicóptero real (en este caso cabeceo y guiñada), experimentando con un controlador difuso diseñado en el software LabVIEW™ para el análisis de los resultados.

Sin más, el presente capítulo tiene la siguiente estructura: la sección 2 muestra el diseño y construcción del prototipo, la sección 3 describe el sistema de adquisición de datos, la sección 4 presenta el diseño y programación del controlador difuso para la manipulación del prototipo y, finalmente, la sección 5 muestra los resultados experimentales que corroboran el correcto funcionamiento de la instrumentación del prototipo. La conclusión se presenta en la sección 6.

2. Diseño y construcción del prototipo helicóptero

Un helicóptero es una aeronave que es sustentada y propulsada por uno o más rotores horizontales, cada uno conformado por dos o más hélices.

Los helicópteros se clasifican como aeronaves de alas rotatorias, para distinguirlos de las aeronaves de ala fija (aviones), puesto que los helicópteros obtienen su fuente de sustentación de las hélices que giran alrededor de un eje (Federal Aviation Administration, 2019).

Los helicópteros se clasifican por tipo de configuración, los cuales son:

- Un rotor (Con y sin cola).
- Dos rotores (Tandem, giro lado a lado, giro entrelazado, giro coaxial, etc.).

Cualquier aeronave es capaz de realizar tres posibles giros alrededor de sus ejes que son perpendiculares entre sí y, cuyo punto de intersección está situado sobre el centro de gravedad del avión. Estos tres ejes son el eje lateral (o transversal), el longitudinal y el vertical. Las maniobras principales en dichos ejes se conocen como cabeceo (pitch), alabeo (roll) y guiñada (yaw). Dichas maniobras se describen a continuación y se pueden apreciar en la figura 4.

Figura 4 Movimientos realizados por el helicóptero

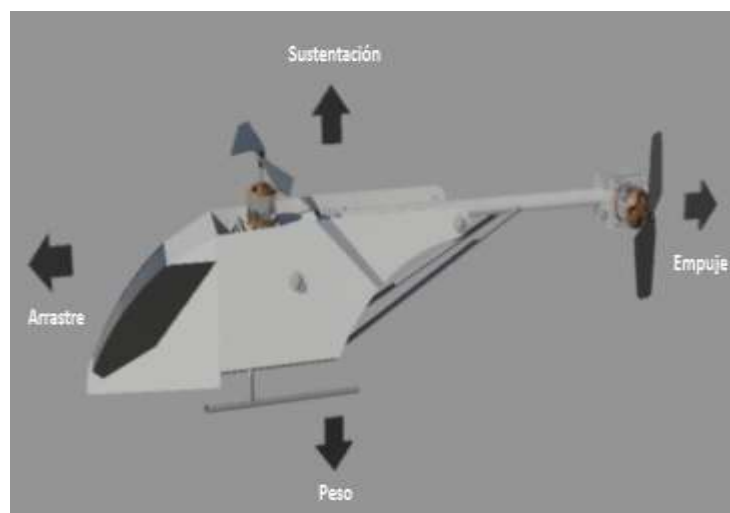
Fuente: Elaboración Propia

Se le conoce como cabeceo al movimiento que realiza la aeronave alrededor de su eje lateral o transversal (eje imaginario que se extiende a lo ancho de la aeronave).

El movimiento que realiza la aeronave alrededor del eje longitudinal (eje imaginario que se extiende desde la cabina hasta la cola de la aeronave) se le denomina alabeo.

Guiñada es el movimiento que realiza la aeronave alrededor del eje vertical, que es el eje imaginario que pasa por el centro de gravedad de la aeronave y es perpendicular a los ejes transversal y longitudinal (Padfield, 2014).

Una vez que un helicóptero despegue, cuatro fuerzas aerodinámicas actúan sobre él, estas son: empuje, arrastre, sustentación y peso. La descripción de dichas fuerzas se menciona a continuación y se pueden apreciar en la figura 5.

Figura 5 Fuerzas aerodinámicas

Fuente: Elaboración Propia

Empuje es la fuerza de avance producida por el poder de las hélices o la oposición del rotor, cuando se supera la fuerza de arrastre. Como regla general, actúa en paralelo al eje longitudinal.

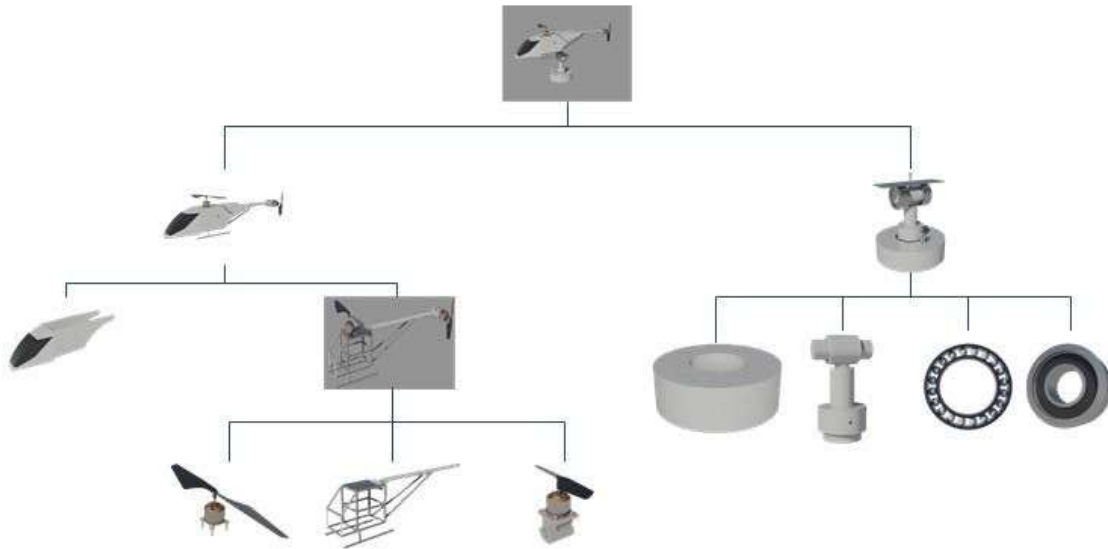
Se le conoce como Arrastre a la fuerza de retardo causada por la interrupción del flujo de aire por el ala, rotor, fuselaje y otros objetos que sobresalgan. Opone empuje y movimientos hacia atrás, paralelo al viento relativo.

El peso es la carga combinada de la propia aeronave, la tripulación, el combustible y la carga o equipaje. El peso jala a la aeronave hacia abajo debido a la fuerza de la gravedad. Se opone a la elevación y actúa verticalmente hacia abajo a través del centro de gravedad de la aeronave.

La sustentación se produce por el efecto dinámico del aire que actúa sobre la superficie de elevación. Actúa perpendicularmente a la trayectoria del vuelo y se opone a la fuerza causada por el peso (Federal Aviation Administration, 2019).

En la figura 6 se desglosan las partes que conforman al prototipo didáctico en arquitectura abierta, el cual se divide en dos partes: el helicóptero y la base giratoria.

Figura 6 Diagrama del prototipo



Fuente: Elaboración Propia

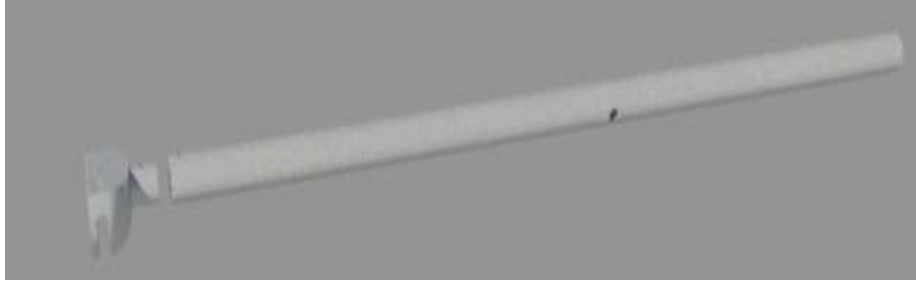
El diseño se basa en el helicóptero Super Puma, de tipo rotor principal y rotor de cola, ver figura 7.

Figura 7 Diseño del helicóptero



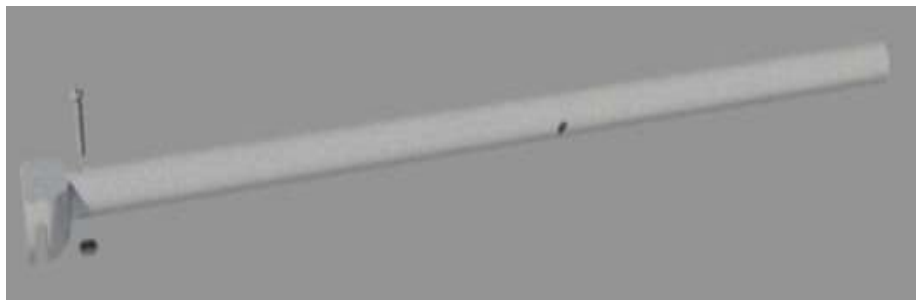
Fuente: Elaboración Propia

La estructura del helicóptero se compone por una pieza tubular, figura 8, que forma una parte de éste, se conoce coloquialmente como cola.

Figura 8 Cola del helicóptero

Fuente: Elaboración Propia

Dicho tubo tiene en uno de sus extremos un acople. El acople se introduce dentro del tubo y se sujeta con la ayuda de un tornillo, como se observa en la Figura 9.

Figura 9 Ensamble de tubo y acople

Fuente: Elaboración Propia

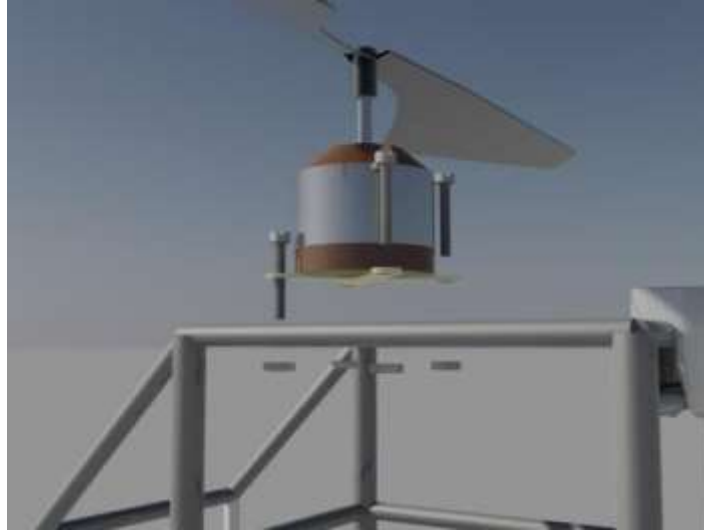
La cabina del helicóptero se diseñó a base de varillas delgadas. El acople anteriormente mencionado cuenta con una ranura en la que se incorpora una de las varillas superiores que conforma la cabina, esto con la finalidad de que la estructura sea desarmable; es así como se une la cola con la cabina y se forma la estructura del helicóptero, véase figura 10.

Figura 10 Ensamble de cola y cabina

Fuente: Elaboración Propia

La cabina del helicóptero cuenta con una placa en la parte superior. En mencionada placa se sujeta el motor principal por medio de cuatro tornillos, esto se puede apreciar en la figura 11.

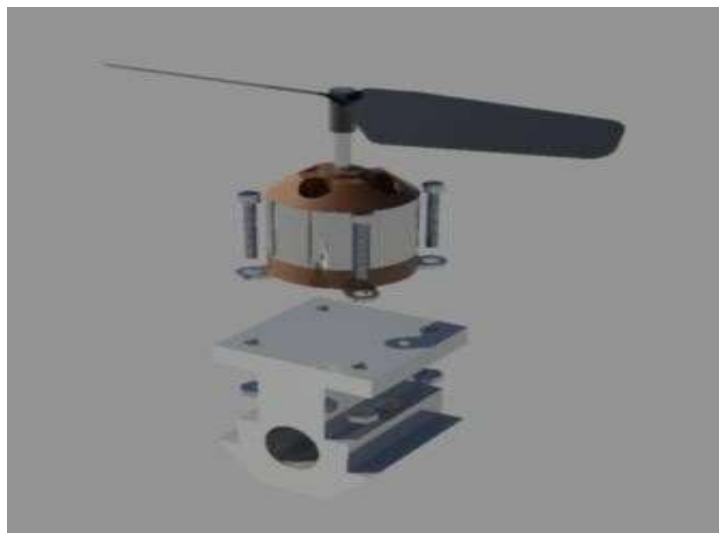
Figura 11 Ensamble de motor principal



Fuente: Elaboración Propia

Para fijar el motor de la cola, éste se monta a una pieza de forma irregular, también con la ayuda de cuatro tornillos como en el caso del motor principal, figura 12.

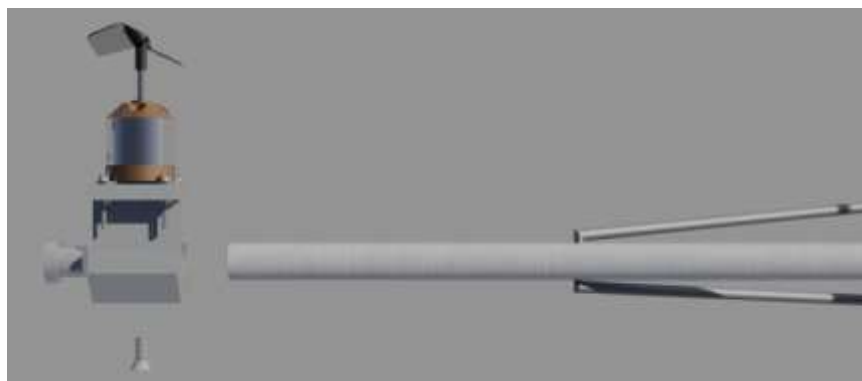
Figura 12 Ensamble de motor principal



Fuente: Elaboración Propia

La pieza que sujeta el motor se inserta al tubo que forma la cola del helicóptero y se asegura con un tornillo, como se muestra en la figura 13.

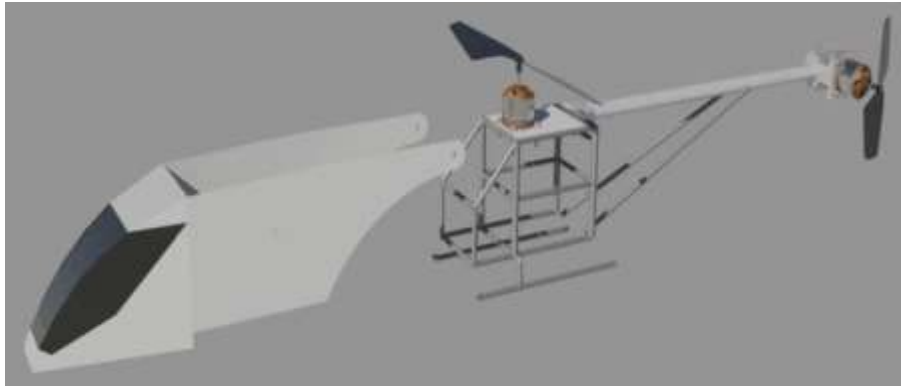
Figura 13 Ensamble de motor a cola de helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se coloca una carcasa a la estructura del helicóptero, como se observa en la figura 14.

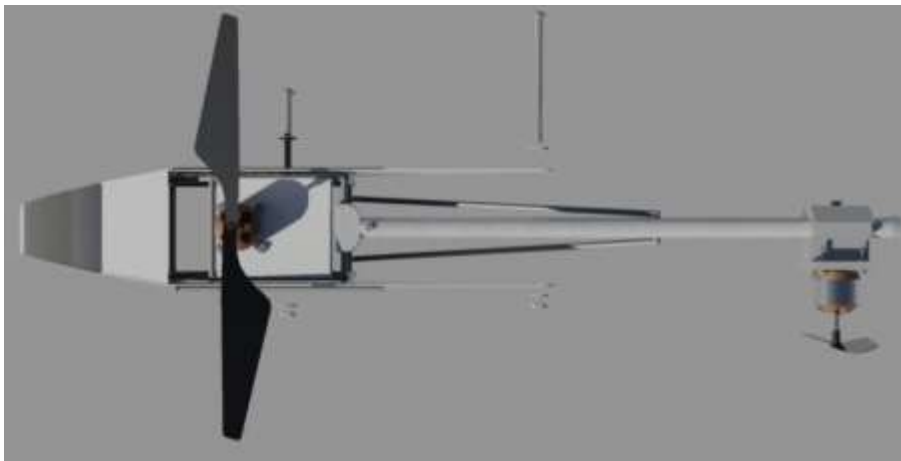
Figura 14 Ensamble de carcasa a helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

Para la sujeción de la carcasa a la estructura se utilizan dos tornillos que la atraviesan de lado a lado, figura 15.

Figura 15 Sujeción de la carcasa



Fuente: Elaboración Propia

El diseño de la base giratoria, figura 16, permite al helicóptero moverse en los planos x y y , generando así dos movimientos de un helicóptero real.

Figura 16 Diseño de base giratoria



Fuente: Elaboración Propia

La base está realizada a partir de cilindros de diferentes diámetros y longitudes. Un cilindro de forma horizontal, que cuenta con una perforación, se empotra a otro, que se encuentra de manera vertical, formando así una “T”. A su vez, la parte inferior de dicha “T” se introduce a un balero (esto para que permita un movimiento de giro de 360 grados, conocido como guiñada). El balero se fija a una pieza circular que funciona como pedestal, dando soporte a todo el sistema. Todo esto se puede observar en la figura 17.

Figura 17 Ensamble de la base giratoria



Fuente: Elaboración Propia

Para permitir otro movimiento de giro en 90 grados llamado cabeceo, a la “T” se le fija un balero en cada extremo de su parte superior como se muestra en la figura 18.

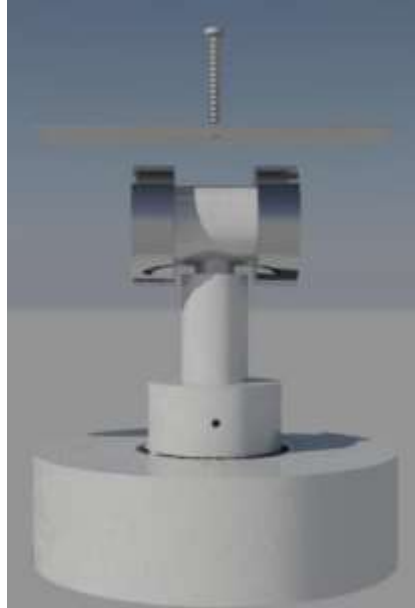
Figura 18 Ensamble de la base giratoria para el cabeceo



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 19 se observa la colocación de una placa, la cual funciona para montar en helicóptero. Dicha placa se une a los baleros.

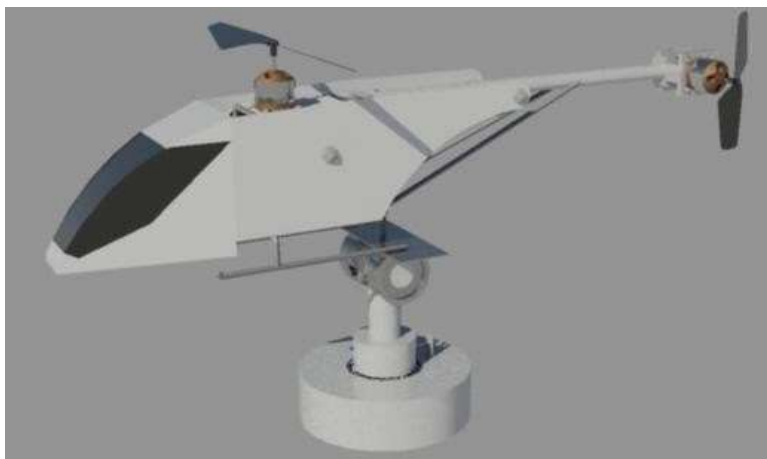
Figura 19 Ensamble de la base para el helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

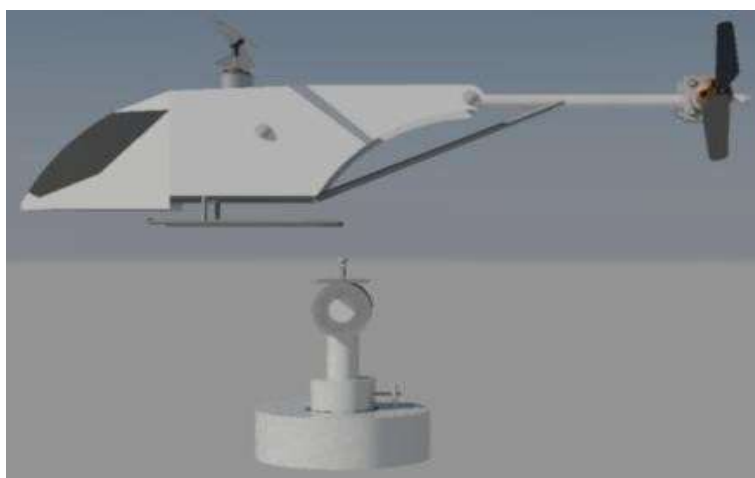
En las figuras 20 y 21 se presenta el prototipo del helicóptero diseñado.

Figura 20 Prototipo del helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

Figura 21 Helicóptero y base giratoria



Fuente: Elaboración Propia

3. Sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de datos se utiliza el dispositivo myRIO™ y el procesamiento de las señales se realiza en el software LabVIEW™, figura 22.

Figura 22 myRio – Dispositivo embebido para estudiantes

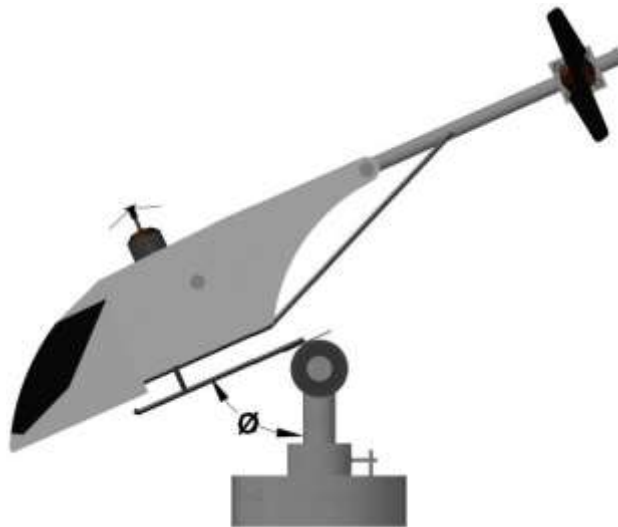


Fuente: (myRIO, s.f.)

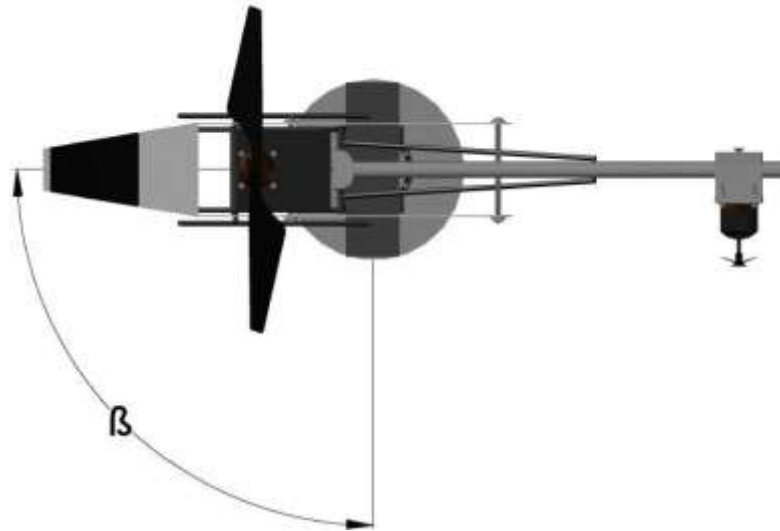
También se usan dos sensores para realizar las lecturas de los ángulos, los cuales son: IMU 6050, el cual tiene integrado un giroscopio y un acelerómetro, es el encargado de la medición del ángulo cabeceo (θ), como se muestra en la figura 23; y un sensor HCM5883l, el cual consiste en un magnetómetro, y es el encargado de medir el ángulo guiñada (β), véase figura 24.

Cada sensor se lee a través de uno de los puertos I^2C con los que cuenta el dispositivo myRIO™.

Figura 23 Ángulo de cabeceo

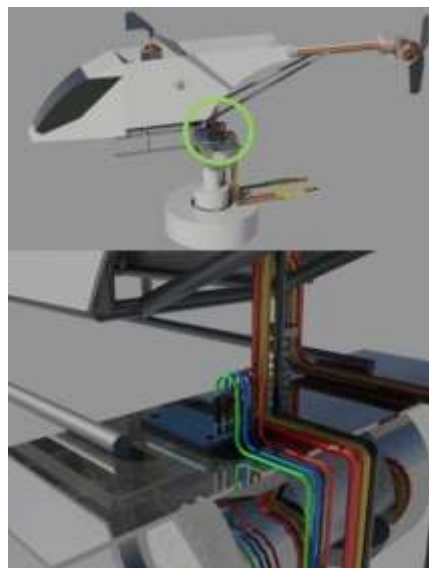


Fuente: Elaboración Propia

Figura 24 Ángulo de guiñada

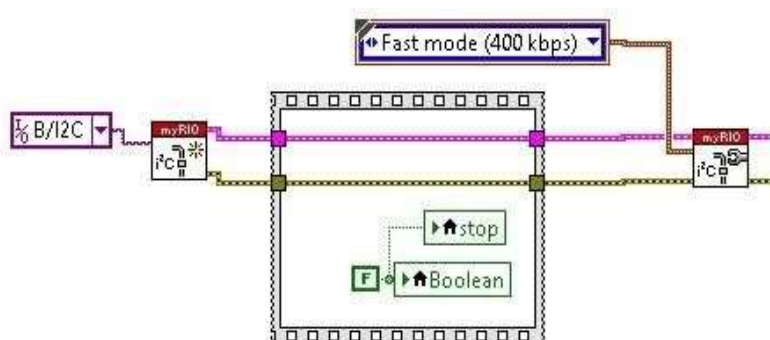
Fuente: Elaboración Propia

El magnetómetro se ubica en la placa de acero inoxidable debido a que en ella es donde se fija el helicóptero, tal como se aprecia en la Figura 25.

Figura 25 Ubicación de magnetómetro

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de dicho sensor, el proceso de adquisición de datos inicia por medio de un bloque de inicio de I^2C . A este bloque se le debe indicar el puerto que se va a utilizar para el sensor, como se observa en la figura 26.

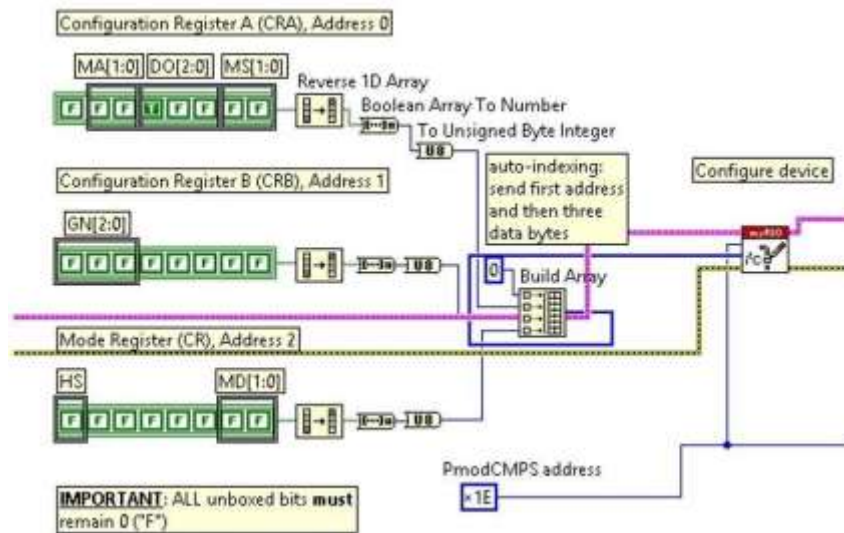
Figura 26 Ubicación del magnetómetro

Fuente: Elaboración Propia

Lo siguiente es configurar la velocidad de comunicación, en este caso se realiza mediante del bloque *I²C Configure*.

Una vez abierta la comunicación con el sensor, se debe configurar cada uno de los registros y las demás características de los dispositivos a utilizar, el magnetómetro HCM58831 tiene como dirección *I²C* 0x1E, se opera en modo Continuous-Measurement (continuo), en donde está constantemente realizando mediciones y actualizando los registros x,y,z correspondientes a las lecturas, figura 27.

Figura 27 Configuración de dispositivos



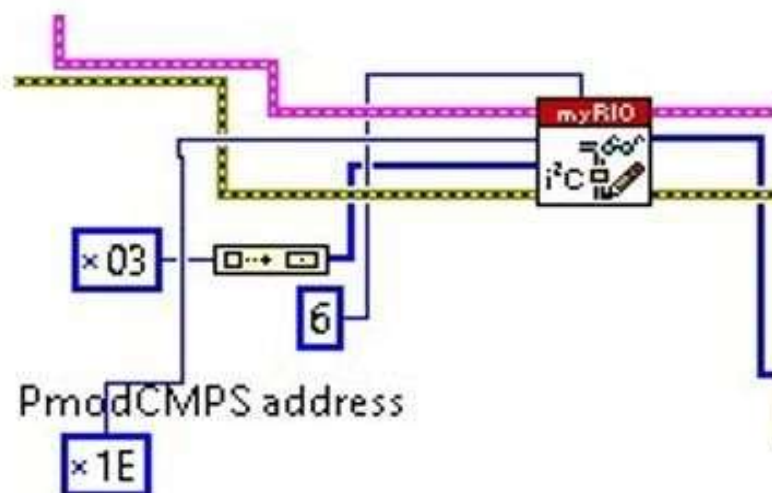
Fuente: Elaboración Propia

En el caso de dicho sensor se necesita la configuración de los registros A y B, así como el modo del registro. Por medio de Arrays se configuran los valores del registro y se ingresan a un bloque *I²C Write*. Una vez realizado lo anterior, la computadora ya tiene completa comunicación con el sensor, lo siguiente es adquirir la señal. En el caso del mismo sensor es obtener de los ejes del mismo, los valores de la interacción del campo magnético con cada uno de ellos.

La lectura del sensor se realiza por medio de un bloque *I²C Read*, al cual es necesario indicar la dirección de este en el dispositivo, así como de ingresar la cantidad de registros a obtener.

Una vez adquiridos los valores se procede a realizar el procesamiento de la señal; debido a que se tienen dos registros para cada valor es necesario unirlos, figura 28, de esta manera se obtienen la lectura de los tres ejes del sensor.

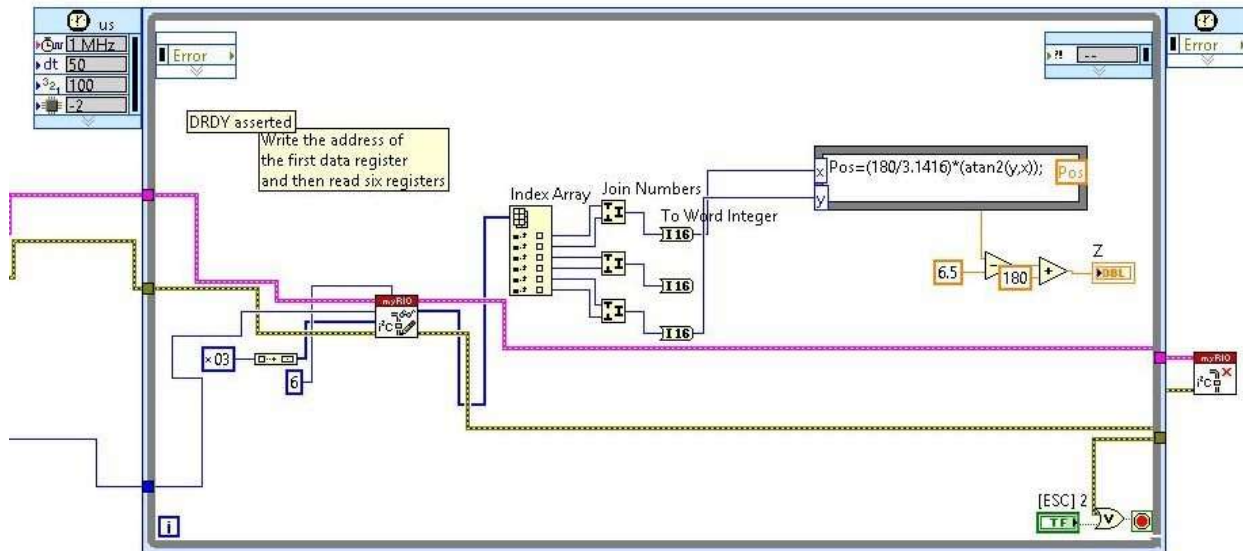
Figura 28 Unión de registros



Fuente: Elaboración Propia

Por último, se utiliza un bloque I^2C Close para terminar la comunicación con el sensor. En la figura 29 se observa el diagrama correspondiente a las etapas de adquisición y procesamiento de la señal.

Figura 29 Diagrama de adquisición y procesamiento de la señal



Fuente: Elaboración Propia

4. Controlador difuso para el helicóptero

El control Inteligente comprende una serie de técnicas, tomadas fundamentalmente de la Inteligencia Artificial, con las que se pretenden resolver problemas de control inabordables por los métodos clásicos (Jiménez, et al., 2000).

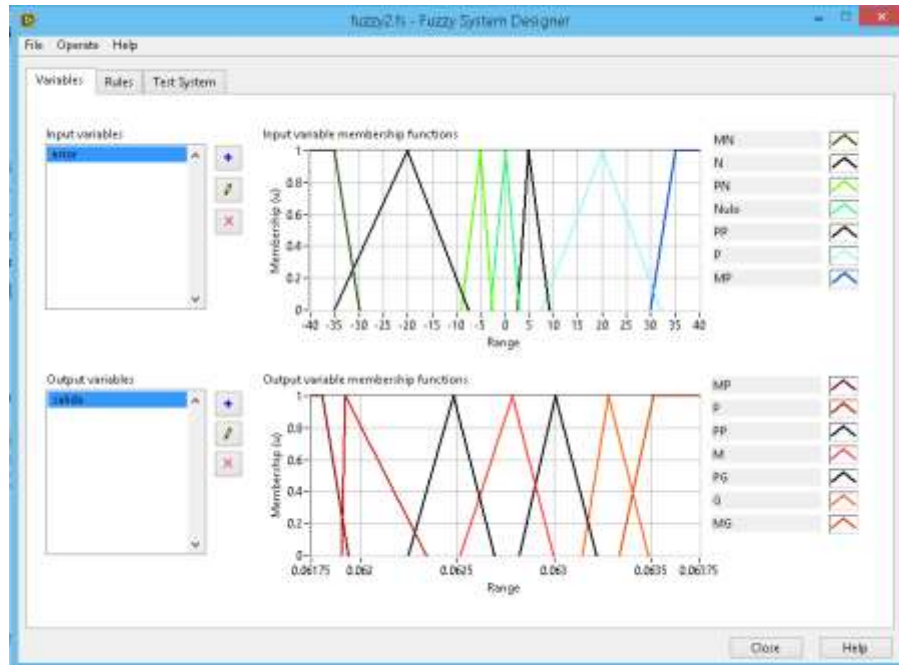
Ponce (2010) afirma que la Lógica Difusa es una rama de la Inteligencia Artificial que le permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y verdadero. Los matemáticos dedicados a la lógica en el año de 1920 definieron un concepto clave: Todo es cuestión de grado, puesto que manipula conceptos vagos como “caliente” o “húmedo” y permite a los ingenieros construir televisores, aires acondicionados, lavadoras y otros dispositivos que juzgan información difícil de definir.

La incorporación de la Lógica Difusa a los sistemas de control da lugar a lo que se conoce como Sistemas Difusos. Estos tipos de sistemas utilizan el conocimiento y experiencia de un operador humano para construir un controlador que emule el comportamiento de tal.

Comparado con el Control Clásico o Tradicional, el Control Difuso cuenta con dos ventajas prácticas, una es que el modelo matemático del proceso a controlar no es requerido y otra es que se obtiene un controlador no lineal desarrollado empíricamente sin complicaciones matemáticas (Bonifacio & Sanz, 2006).

En el presente trabajo se programa el controlador en el software LabVIEW™ con el uso del toolkit Fuzzy System Designer, se ingresan las funciones de pertenencia de la variable de entrada y de la variable de salida. En la figura 30 se observa que para poder ser ingresadas es necesario especificar la forma de la función de membresía, así como los valores que representa. Al ingresar una función se pueden declarar sus valores de dos maneras diferentes, la primera es ingresarlos en los cuadros de texto y la segunda opción es arrastrar los puntos que se tienen en los extremos de las formas de las funciones. Para facilitar su análisis se pueden asignar de forma indistinta distintos colores a cada variable.

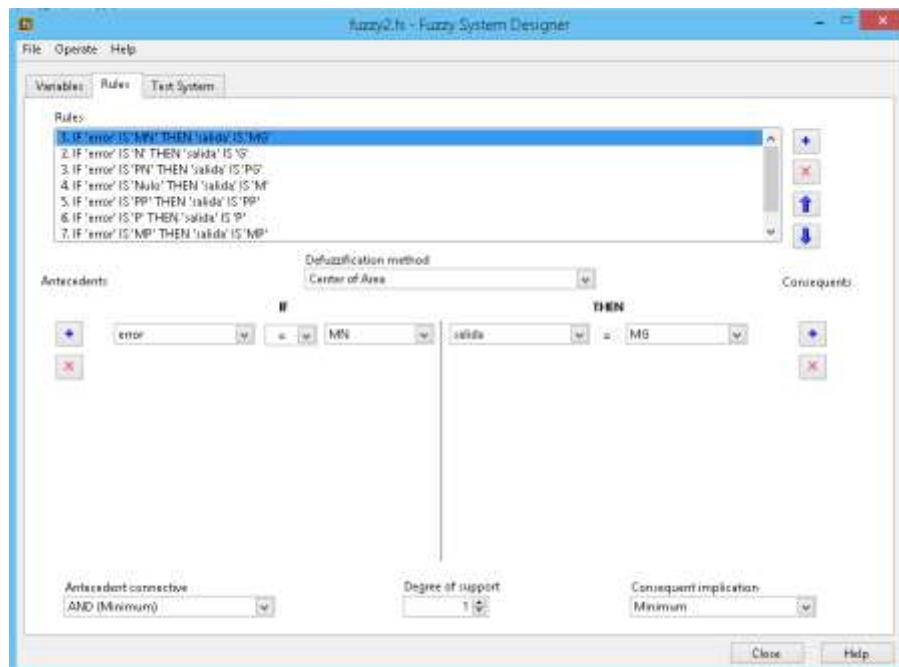
Figura 30 Ventana principal de toolkit Fuzzy System Designer



Fuente: Elaboración Propia

Una vez ingresadas las variables, lo siguiente es añadir la base de reglas, esto se realiza en la pestaña Rules, figura 31, para ingresar una nueva regla se da clic en Agregar, una vez agregada se elige la función de membresía de la entrada así como la función de membresía de salida. De igual manera se elige el Método de Defuzzificación.

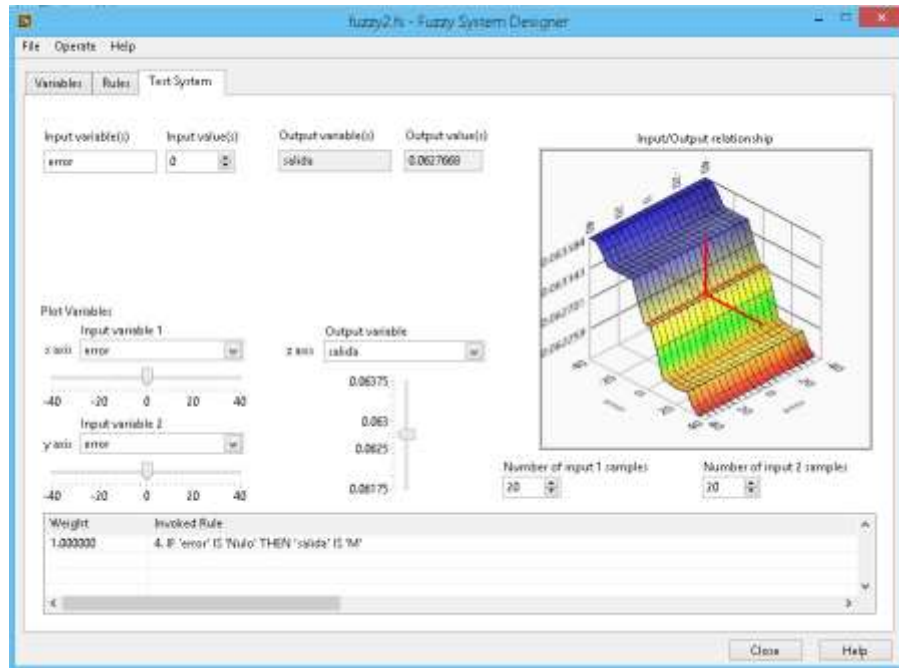
Figura 31 Ventana de edición de reglas



Fuente: Elaboración Propia

Una vez ingresadas las variables y la base de reglas, en la ventana de Test System se puede ingresar un valor de entrada y se muestra el valor que se tendría de salida, de esta forma se puede observar la superficie de control, figura 32.

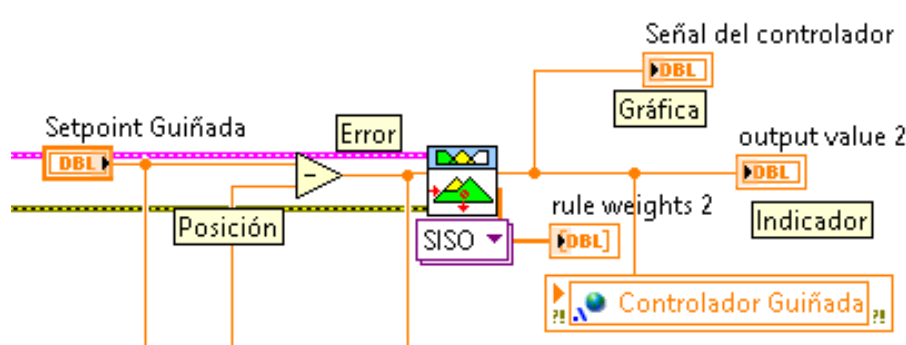
Figura 32 Ventana de Test System



Fuente: Elaboración Propia

Para poder utilizar el controlador es necesario generar la variable de entrada, en este caso en particular se considera como variable de entrada al error. El error se obtiene al restarle la posición actual al Set-point. Una vez que se tiene el error se procede a insertar un bloque *FL Fuzzy Controller*, a la terminal de *Input Value* se le conecta el error, a la terminal de *Fuzzy System In* se le conecta la terminal de Fuzzy System Out del bloque de carga del controlador, de igual manera a la terminal *Error In* se le conecta la terminal *Error Out* del bloque anterior. Debajo del bloque del controlador se encuentra una lista desplegable para elegir el tipo de controlador, en este caso se elige la opción Automático, al tener una sola entrada y salida este controlador se dice que es de tipo SISO (Single Input Single Output). La terminal de salida del controlador será conectada a tres bloques, el primero de ellos es la gráfica de la señal del controlador, el segundo es un indicador digital y el tercer bloque es una variable compartida, todo esto se puede apreciar en la figura 33.

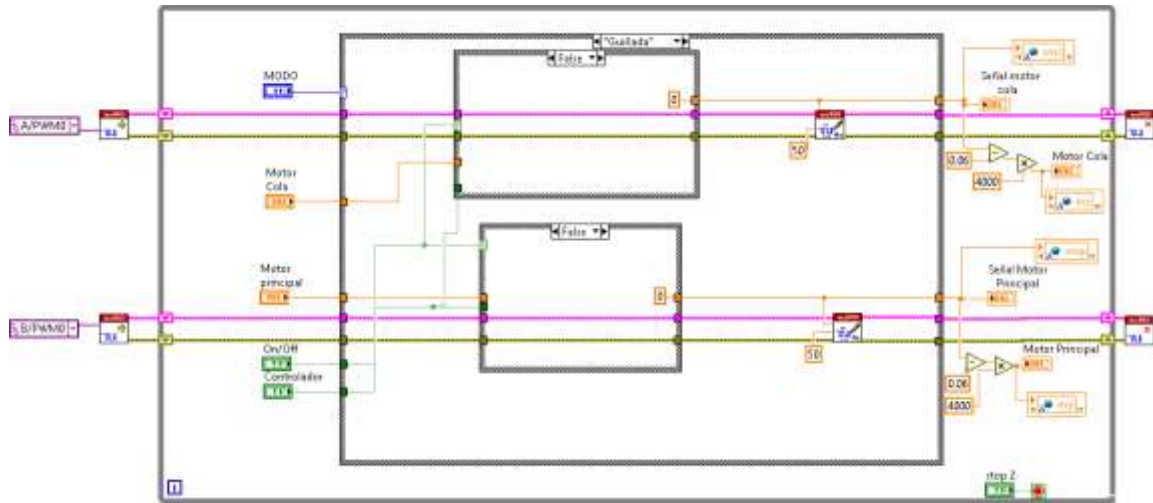
Figura 33 Diagrama de generación de variable de entrada



Fuente: Elaboración Propia

Los valores de salida del controlador son enviados al motor utilizando el diagrama mostrado en la figura 34. En dicho diagrama se observa en la entrada la conexión de dos bloques de inicio de PWM, en cada uno de ellos por medio de una constante. Se elige el puerto PWM a utilizar, en este caso se utilizan dos puertos PWM.

Figura 34 Diagrama de operación modo guiñada



Fuente: Elaboración Propia

5. Resultados

La estructura del helicóptero fue construida con varillas de acero inoxidable unidas mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico. La carcasa fue realizada con fibra de vidrio. La estructura real se puede apreciar en la figura 35.

Figura 35 Estructura del helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

La base giratoria, mostrada en la figura 36, fue fabricada a partir de perfiles tubulares de aluminio, modificados en un torno convencional.

Figura 36 Base giratoria construida



Fuente: Elaboración Propia

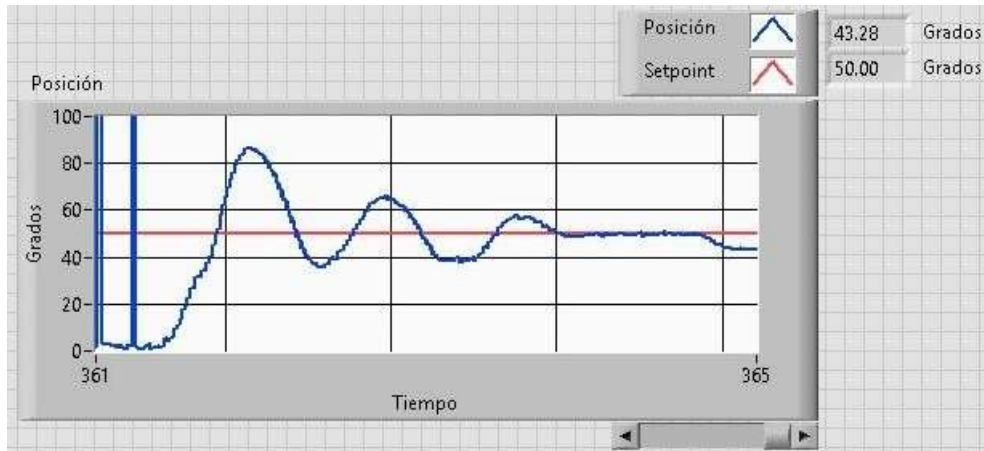
El prototipo final construido se aprecia en la figura 37.

Figura 37 Prototipo final



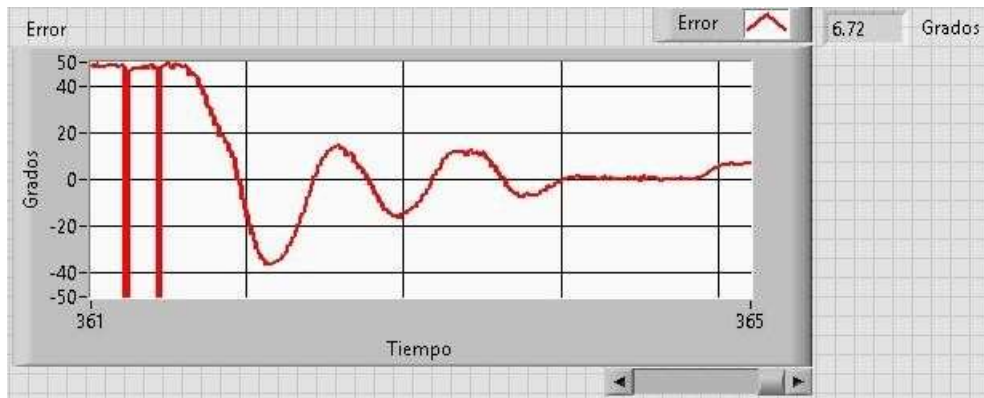
Fuente: Elaboración Propia

Para comprobar la funcionalidad del prototipo construido se realizaron pruebas aplicando el controlador difuso, los resultados obtenidos con un cambio en el set-point de 0 a 50 grados, se muestra en la figura 38, logrando posicionarse en un tiempo inferior a 4 segundos.

Figura 38 Señal del set-point y la posición

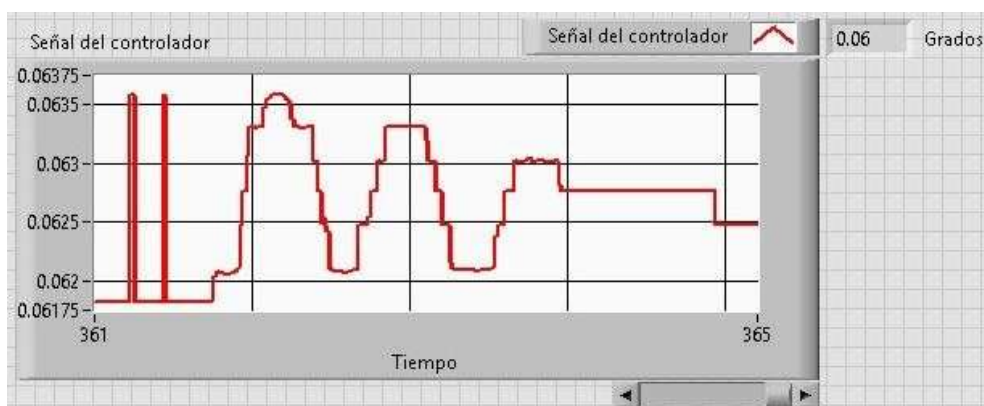
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 39 se muestra la señal del error que tuvo el helicóptero durante su posicionamiento, este error es la diferencia de posición deseada contra la posición real.

Figura 39 Señal del error

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 40 se muestra la señal de control aplicada al motor para lograr la posición deseada.

Figura 40 Señal de control

Fuente: Elaboración Propia

6. Conclusiones

En el presente capítulo se presenta el diseño, construcción y control de un helicóptero didáctico en arquitectura abierta. Se evalúa el prototipo a partir de resultados experimentales, cuyo objetivo consiste en confirmar el funcionamiento de la instrumentación y construcción del mismo, utilizando un controlador difuso, técnica de control adecuada para el manejo de sistemas de cualquier tipo de complejidad. A partir de los resultados mostrados, se concluye que el prototipo generado representa una opción viable para la aplicación de algoritmos de control en un sistema dinámico de un helicóptero, fortaleciendo las competencias relacionadas con el área de control y sus aplicaciones a vehículos aéreos, mediante el desarrollo de prácticas y trabajos de investigación.

Referencias

- Bonifacio, M., & Sanz, A. (2006). *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. Madrid: RA- MA.
- Brizuela-Mendoza, J., Rosales-Díaz, A., Rumbo-Morales, J., Sorcia-Vázquez, F., & Martínez-García, M. (2019). Diseño, instrumentación y control de un helicóptero de tres grados de libertad. *RIIT. Revista internacional de investigación e innovación tecnológica*, 7(37).
- Educación en ingeniería. (s.f.). myRIO-Dispositivos embebidos para estudiantes. Recuperado el 20 de noviembre de 2021 de <https://www.ni.com/es-mx/shop/hardware/products/myrio-student-embedded-device.html>
- Federal Aviation Administration. (2019). *Helicopter Flying Handbook*. Oklahoma. USA.
- Guerrero-Hernández, A., Araque-Gallardo, J. & Gallo-Nieves, M. (2016). “Implementación de módulos didácticos para sistemas electrónicos de potencia”. *Revista Educación en Ingeniería*, 11 (21), 9-13.
- Guevara, P., Falcón, J., Sandoval, R. & Medel J. (2009). “Equipos Didácticos Industriales en el modelo educativo de los Cecati”. *Innovación educativa*, 9(48), 73-81.
- Herrera, F., Merchan, S. & Villamizar, F. (2010). “Kit de desarrollo robótico: Una herramienta de aprendizaje en ingeniería”. *Revista Educación en Ingeniería*, 5(9), 49-63.
- Jiménez, A., Sanz, R., Matía, F., & Galán, R. (2000). Control Inteligente. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 43-48.
- Padfield, R. (2014). *Learning to fly helicopters*. Chicago: Mc Graw Hill Education.
- Parra, N. (2015). “Diseño y construcción de un helicóptero coaxial controlado sobre Android”. [Tesis de Ingeniería, Universidad politécnica de Madrid].
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia Artificial con aplicaciones a la Ingeniería*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Products and Lab Solutions. (s.f.). Solutions optimized for the academic environment. Recuperado el 20 de noviembre de 2021 de <https://www.quanser.com/products/>
- Solaque, L., Cristancho, C., & Gil, C. (2014). Diseño e implementación de una plataforma experimental de dos grados de libertad controlada por dos técnicas: PID y lógica difusa. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 99-115.
- Tovar, G. & Figueroa, E. (2021). “El helicóptero como factor decisivo para la movilidad táctica: el caso colombiano (1997-2012)”. *Revista Científica General José María Córdova*, 19(34), 309-330. <http://dx.doi.org/10.21830/19006586.750>

Capítulo 4 Desarrollo de un prototipo para detección de metano y su concentración en procesos de generación de energía a partir de biomasa

Chapter 4 Development of a prototype for methane detection and concentration in biomass power generation processes

PINEDA-CARDENAL, Orlando†¹, ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth^{1*}, OLIVOS-ORTIZ, Aramis² y CHARRE-IBARRA, Saida¹

¹Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica, Carretera Manzanillo-Barra de Navidad Km 20, El Naranjo, 28860, Manzanillo, Colima, México.

²Universidad de Colima, Facultad de Ciencias Marinas, Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Carretera Manzanillo-Barra de Navidad Km 20, El Naranjo, 28860, Manzanillo, Colima, México.

ID 1^{er} Autor: *Jesús Orlando, Pinea-Cardenal* / **ORC ID:** 0000-0003-4958-1283

ID 1^{er} Coautor: *Janeth, Alcalá-Rodríguez* / **ORC ID:** 0000-0002-0238-3952

ID 2^{do} Coautor: *Aramis, Olivos-Ortiz* / **ORC ID:** 0000-0002-9886-9817

ID 3^{er} Coautor: *Saida, Charre-Ibarra* / **ORC ID:** 0000-0002-3823-5388

DOI: 10.35429/H.2021.10.66.88

O. Pineda, J. Alcalá, A. Olivos y S. Charre

*janethalcala@ucol.mx

J. Gudiño, E. Hernández, S. Charre, J. Alcalá y M. Duran (AA. VV.). Proyectos de Ingeniería Aplicada, Ciencia y Tecnología ©ECORFAN- México, 2021.

1. Introducción

La situación mundial de contaminación y de calentamiento global debido a los gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de la generación de energía y la actividad humana está alcanzando niveles críticos, por lo que México y la mayoría de las naciones trabajan en la creación de acuerdos y planes a futuro cercano, medio y lejano para generar estrategias que contribuyan y promuevan métodos de generación de energía y consumo de energía alternativos limpios y ambientalmente amigables. En este sentido, las naciones tanto desarrolladas como en vía de desarrollo se han comprometido a trabajar unidas, de manera ambiciosa, progresiva, equitativa y transparente, para limitar el incremento de la temperatura global impulsando nuevas formas que buscan reconciliar la actividad humana con un uso y desarrollo sustentable de los recursos disponibles en el mundo y de acuerdo al objetivo de Conferencia de las Partes, conocida como COP en su edición 26 se busca lograr compromisos de acción para mantener el calentamiento global "bien por debajo" de 2 grados centígrados (y alcanzar 1.5 °C) para evitar una catástrofe climática.

En el protocolo de Kioto que entró en vigor en febrero de 2005 (Solórzano, 2003) se estableció como uno de los objetivos reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en especial los producidos por el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) como una medida para reducir los efectos de los GEI.

De acuerdo a los datos de actualización en Laureles (2021) generados a partir del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (Inegycei), en 2019 México emitió 737 millones de toneladas de CO₂, colocándose como uno de los 13 países mayores emisores del mundo. Tal y como se muestra en la Gráfico 1, el CO₂ representa el 74% de los GEI como resultado del uso de combustibles fósiles por la generación de electricidad y calor por transporte, manufactura y consumo. El uso de suelo por la silvicultura contribuye con el 3.3% principalmente por la deforestación. El CH₄ y el N₂O representan el 17.2% y el 6.3% de los GEI, producto de la agricultura, el tratamiento de residuos y la quema de gas. Los gases fluorados de los procesos industriales generan el 2.3% de las emisiones globales. Aunque como se describe en (Solórzano, 2003) se ha identificado que CH₄ "puede ser 21 veces más potente que el CO₂ como atrapador de calor". Por lo que, en conjunto, los costos y la disponibilidad energética, junto con los problemas asociados a su generación y distribución, están impulsando a nuevas formas de encontrar un desarrollo sustentable.

Gráfico 1 Emisiones GEI en México



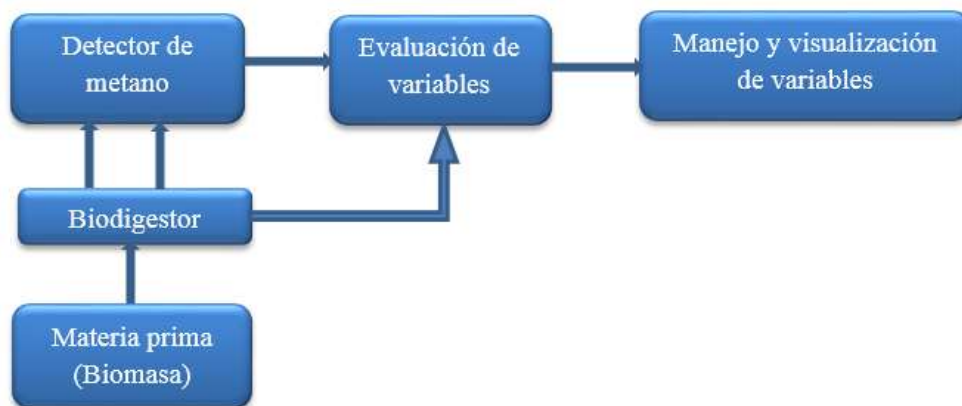
Fuente: Elaboración propia, con base en cifras de Ge et al. (2021)

En cuanto a las posibles soluciones para disminuir la contribución de los GEI al calentamiento global existen iniciativas para aprovechar y dar tratamiento a los residuos residenciales así mismo como a los de la agricultura para la generación de biogás como un sustento energético. De esta manera, se aborda un doble propósito que por un lado buscar generar un sistema alternativo de energía y por otro lado pretende servir como una medida auxiliar el de tratamiento de residuos generados por la actividad y consumo de la humanidad, ya que a partir de la biodigestión de residuos orgánicos se puede obtener biogás, y gas de síntesis por medio la gasificación de la biomasa.

No obstante, para producir biogás se deben tomar en cuenta diversos factores que contribuye o modifican el proceso de la biodigestión, como la concentración de CH_4 , ya que el biogás es una mezcla compuesta principalmente por CH_4 (50%-70%) y CO_2 (25%-40%) y otras cantidades mínimas de gases, por ejemplo, ácido sulfhídrico (H_2S) en 1% (Coto, 2007). No obstante, la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada en su generación. En este sentido, este trabajo propone diseñar y construir un prototipo que permita detectar la presencia de CH_4 y cuantificar la concentración de distintas mezclas en un proceso de biodigestión para determinar la combinación que genera mayor producción de biogás a partir de los residuos generados por tres tipos de mezclas que consideran 1) desechos de comida y/o residenciales; 2) desechos de madera y excrementos de bovinos y 3) plantas y hojarasca secas. La metodología consistió en elaborar diferentes experimentos para evaluar rendimiento de biogás en cada una de las biomazas seleccionadas. En la Figura 1 se muestra un diagrama a bloques general de la propuesta abordada.

A continuación, en las siguientes secciones se presenta una introducción a la biomasa y el proceso de biodigestión, posteriormente se describe el diseño del sistema propuesto y por último se validan los alcances del trabajo mostrando el desarrollo de pruebas y resultados obtenidos.

Figura 1 Diagrama a bloques general de la propuesta



Fuente: Elaboración Propia

2. La biomasa y el proceso de biodigestión

La biomasa es una fuente primaria de energía no convencional que se clasifica dentro de las energías renovables. Se origina a partir de un proceso biológico (producto de materia orgánica), fotosíntesis (producto de materia vegetal) y también como resultado organismo heterótrofos y puede variar según su origen y el tipo de residuo en biomasa natural, biomasa residual y cultivos energéticos (Feijoo y Villacreses, 2020).

La energía química contenida en la biomasa puede ser aprovechada directamente mediante su combustión, gasificación o pirolisis en el estado sólido; o bien a través de la obtención y combustión de biocombustibles gaseosos o líquidos. Dependiendo del grado de procesamiento se pueden clasificar como:

- Biocombustibles sólidos (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales, pellets, briquetas): pueden quemarse directamente o previa gasificación o pirolisis, para producir calor y electricidad.
- Biocombustibles líquidos (bioetanol, biodiesel y bioturbosina): obtenidos de cultivos energéticos como caña de azúcar y oleaginosas o de aceite vegetal usado, grasas animales y otras fuentes.
- Biocombustibles gaseosos (biogás, biometano): obtenidos de los residuos municipales y estiércol; pueden generar calor y electricidad, localmente y en sistemas interconectados.

Tabla 4 Tipos de biomasa

Origen	Fuente	
Animal residual	Residuos de paja, aserrín, estiércol, ganaderos, basura urbana.	Lodo, estiércol bovino, vacuno, entre otros.
Natural	Biomasa seca	Madera, leña, podas de frutales, pasto, residuos forestales, restos de las industrias madereras y del mueble.
	Biomasa húmeda	Residuos de la fabricación de aceites, lodo, residuos ganaderos.
Vegetal residual	Agrícolas	Girasol, maíz, cebada, caña de azúcar.
Cultivos energéticos	Plantaciones generadas exclusivamente para su transformación y aprovechamiento energético	Cardo, Girasol, entre otros.

Fuente: Elaboración propia, con base en cifras de Friedrich y Vigna (2021)

De acuerdo a Macera *et al.*, (2011) las bioenergéticas (o biocombustibles) se pueden clasificar de acuerdo a las tecnologías empleadas para su generación como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de los bioenergéticos con base en sus diferentes generaciones tecnológicas

Bioenergéticas	Sólidos	Líquidos	Gaseosos
1ra generación	Leña, carbón vegetal, bagazo, pellets	Bioetanol, biodiesel, licor negro	Biogás, gas de síntesis
2da generación	Biochar, torrefactos, torpellets	Etanol celulósico, syndiésel, aceite de pirolisis	Biometano
3ra generación		Diésel de algas, etanol de algas	Biohidrógeno

Fuente: Elaboración propia, con base en Masera *et al.*, (2011)

Básicamente, el biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano CH₄, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. En la Tabla 3 se muestran los principales parámetros de interés que se deben acotar cuando se manipula este gas (Moreno, 2011). Estos parámetros servirán como base para el análisis del detector de metano en conjunto con los equipos y dispositivos necesarios para su monitoreo como los sensores, ya que estos parámetros son necesarios para la evaluación de la concentración, límite de explosión, temperatura de ignición, presión crítica, entre otros del metano para su uso en el proceso de generación de energía.

En México, existe una organización que rige y regula todos los parámetros de seguridad y manejo de productos derivados del gas natural. Dentro de estas normas predominan dos las cuales abordan el uso y manejo del CH₄ para generación de energía, la primera es la Norma oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010 Especificaciones del gas natural (Diario Oficial de la Federación [DOF-1], 2010) y segunda es la Norma oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010 Especificaciones del gas natural (Diario Oficial de la Federación [DOF-2], 2010).

La NOM-001-SECRE-2010 tiene como finalidad establecer las especificaciones que debe cumplir el gas natural que se maneje en los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución de gas natural, para preservar la seguridad de las personas, medio ambiente e instalaciones de los permisionarios y de los usuarios. Por otro lado, la NOM-002-SECRE-2010 establece los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplirse en el diseño, materiales, construcción, instalación, pruebas de hermeticidad, operación, mantenimiento y seguridad de las instalaciones de aprovechamiento de gas natural.

Tabla 3 Características generales del biogás

Composición	5 - 70% CH ₄ 30 - 45% CO ₂ Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 - 6.5 kWh
Equivalente de combustible	0.60 - 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 - 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750 °C
Presión crítica	74 - 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg
Olor	Olor Putrefacto (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kgmol ⁻¹

Fuente: (Moreno, 2011)

Tal y como lo estipula la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), para controlar y eficientizar los procesos de digestión anaeróbica de la materia orgánica y producir biogás se utilizan biodigestores. Estos son reactores diseñados para el manejo de residuos en donde se descomponen y se les trata mediante digestión anaeróbica.

En el proceso de digestión anaeróbica en un biodigestor con producción de biogás se pueden identificar tres etapas que ocurren simultáneamente: 1) la hidrólisis, 2) la acidogénesis y acetogénesis, y 3) la metanogénesis. En la etapa 1, la materia orgánica considerada compleja se degrada por la acción de microorganismo en materia orgánica soluble generando sustratos. En la etapa 2 se procesa la materia orgánica soluble y se libera hidrógeno molecular (H₂), CO₂ y acetato (CH₃COO⁻). En la etapa 3, la metabolización acetoclástica transforma el ácido acético en CH₄ y CO₂, y la metabolización hidrogenotrófica permite que a partir del H₂ y el CO₂ se genera el CH₄ (Largo, 2021).

Por otro lado, los biodigestores pueden tener tecnologías muy variadas, por lo que existe una amplia clasificación de biodigestores según la materia prima a degradar y el proceso. Por lo que la elección del tipo de biodigestor que se puede utilizar la producción de biogás depende en gran medida de la zona en la que se desea implementar, de la tecnología y de la materia prima (FAO, 2019). Dentro de los biodigestores más comunes se encuentran los: 1) continuos de una etapa; 2) continuos de dos etapas y 3) discontinuos o en *batch*. En los biodigestores de una sola etapa las reacciones bioquímicas ocurren dentro del biodigestor, la carga de alimentación es continua y existen líneas de entrada y salida para el proceso. El 95% de las plantas que se encuentran reportadas para producción de biogás vía proceso de digestión anaeróbica emplean este sistema ya que su diseño y costo de construcción es económico (Arhoun, 2017). Por otro lado, en los sistemas continuos de dos etapas, el proceso de digestión anaeróbica se da en biodigestores separados (Borja & Rincón, 2017). En cuanto a los discontinuos, estos se alimentan utilizando mezclas de materia orgánica y agua, dejando que ocurra un proceso de fermentación para posteriormente analizar el rendimiento del biogás (Nuntón, 2018).

Existe una diversidad de análisis tanto físicos como químicos que se pueden realizar en sustratos y materiales en el proceso de biodigestión para cualificar y cuantificar el proceso de producción, el rendimiento y la eficiencia en la producción de biogás. De acuerdo a FAO (2019) entre las variables más importantes a monitorear se encuentran la temperatura y el tiempo de retención hidráulica. La temperatura influye en el proceso de la digestión anaerobia, ya que los microorganismos pueden trabajar en tres diferentes rangos: psicrófilos (menos de 25°C), mesófilos (entre 25 y 40°C) y termófilos (entre 40 y 55°C). Para un mismo material y en un mismo lapso de tiempo se producirá más biogás a temperaturas termofílicas que a temperaturas psicrófilas. El tiempo de retención relaciona el volumen del biodigestor y la velocidad de flujo de la carga de alimentación, es decir, permite definir el número de días en que se lleva a cabo el proceso de biodigestión, en función al crecimiento de la población microbiana y la bioconversión de los sustratos. Por otro lado, el tiempo de retención depende de factores como la biodegradabilidad del sustrato y las condiciones operacionales del proceso, siendo una de las más importantes la temperatura de reacción. A temperaturas mesófilas, el tiempo de retención hidráulica se da de 14 a 40 días, a diferencia del rango termofílico que se da de 14 a 20 días, es decir que a mayores temperaturas es más rápida la velocidad del proceso de digestión anaerobia obteniendo un mayor rendimiento de biogás (Srisowmeya, Chakravarthy & Nandhini, 2019).

3. Diseño del biodigestor

Para el proceso de biodigestión anaeróbica en esta propuesta se identifican cuatro fases: 1) diseño del tanque-contenedor, 2) diseño de la lógica de control, 3) almacenamiento de residuos finales y 4) se establecen los productos finales. A continuación, se describen cada uno de estos procesos con mayor detalle.

El diseño del biodigestor propuesto en este trabajo se basa en la configuración cónica, como el mostrado en la Figura 2, identificando las 8 secciones marcadas como se recomienda en (Eutotubo, 2020). Para su construcción se definen los parámetros mostrados en la Tabla 4.

Figura 2 Biodigestor de base cónica



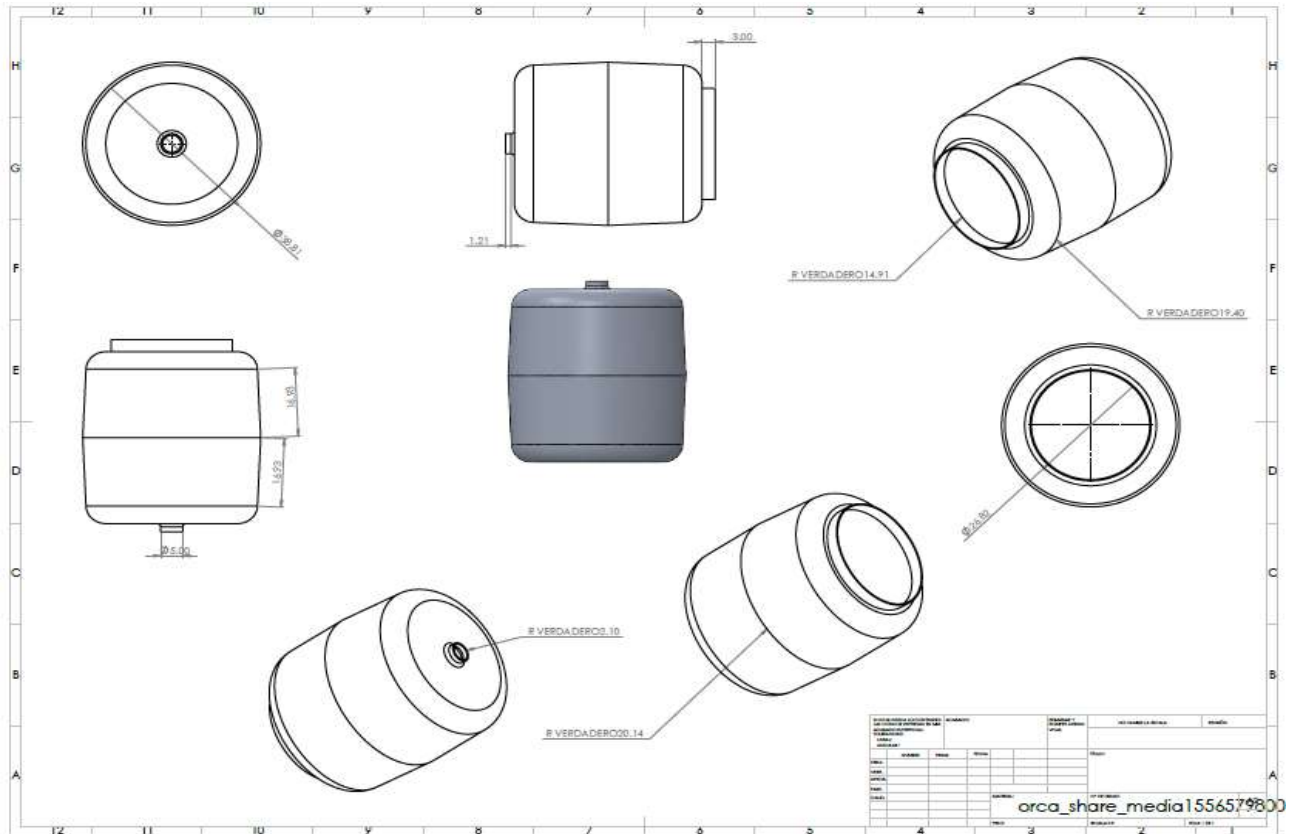
Fuente: Adaptado de Eurotubo [imagen], por los autores, 2021, Eurotubo (<https://eurotubo.com.pe/>)

Tabla 4 Características del biodigestor

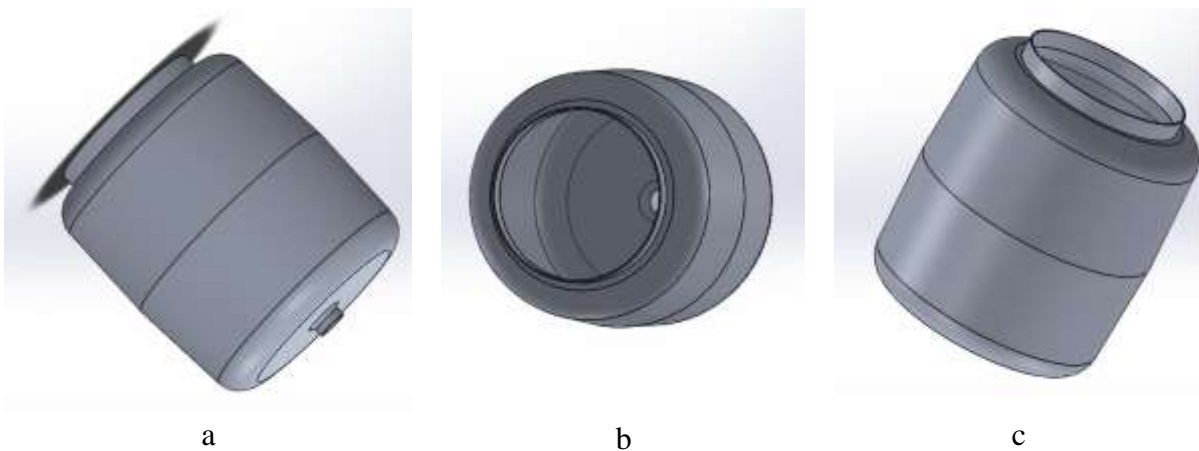
Características	Mezcla
Contenedor	Tanque cilíndrico o rectangular por sobre/debajo del nivel del suelo de 20 kg
Tecnología	Media
Requerimientos caloríficos adicionales	Si
Sólidos totales	3 - 10 % 2 - 3 kg
HRT (días)	15+
Clima optimo	Todos
Líquidos totales	4 - 5 % 1 - 1.5 L

Fuente: Elaboración Propia

Estos tipos de biodigestores son tanques que se instalan por debajo o sobre el suelo, diseñados para tratar residuos con una concentración de sólidos entre el 2.5 % y el 10%. Estas estructuras requieren de una menor superficie, pero necesitan trabajar a una mayor temperatura, por lo que es necesario brindarles una fuente de calor, la estructura suele construirse por sobre o debajo del suelo y los principales materiales pueden ser concreto, acero o fibroglas. Siguiendo las especificaciones y requerimientos necesarios para la generación de biogás a partir de la biomasa, se diseña el tanque-contenedor para el biodigestor partiendo de un tanque de gas de 20 kg, como se muestra en la Figura 3. En la Figura 4 se muestran las vistas inferior, frontal y superior.

Figura 3 Diseño de la tanque-contenedor para el biodigestor

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4 Vistas del tanque-contenedor: (a) inferior, (b) frontal y (c) superior en 3D

Fuente: Elaboración Propia

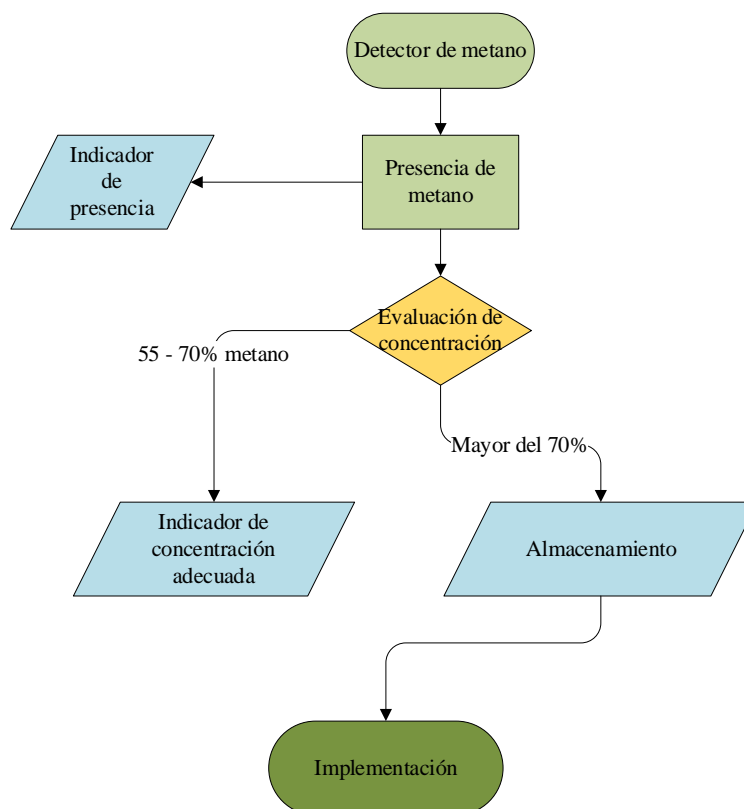
En el tanque-contenedor mostrado en las Figuras 3 y 4, la abertura superior circular que funge como la entrada de los sólidos, se puede observar que la salida inferior es más pequeña para fungir con un drenaje de los productos acuosos generados por la descomposición ya que el producto para el proceso de biodigestión debe estar a un 60 % seco para cumplir con los requisitos de generación, las dimensiones del tanque-contenedor adoptado a partir del modelo de un biodigestor cónico se diseñó para cumplir con las especificaciones mostradas en la Tabla 4, las medidas del tanque contenedor son 55 cm de alto por 24 cm de ancho y 2100 cm de diámetro. Para la construcción se seleccionan los materiales mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5 Materiales seleccionados para el tanque-contenedor del biodigestor

Material
Placa de acrílico de 30 cm x 25.5 cm con 12 mm de espesor
Empaques de plástico vulcanizado de 40 cm
Tubería de cobre para gas
Tornillería
Malla de acero

Fuente: *Elaboración Propia*

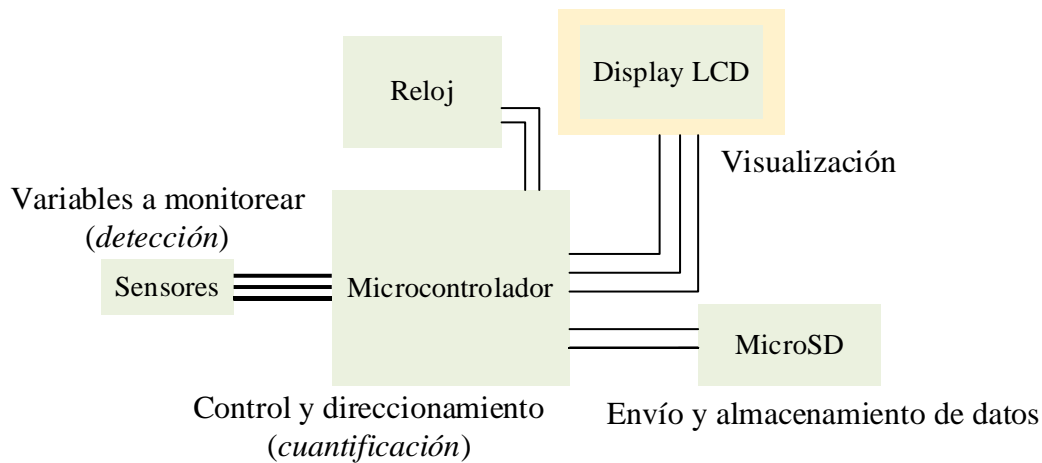
Para el monitoreo y análisis es necesario contar con datos de: presión, temperatura, detección y concentración de CH_4 , por lo que se propone el esquema mostrado en la Figura 5. El flujo inicia con una lectura de la presencia de CH_4 , la cual al dar positiva encenderá un led indicador con descripción “Presencia de metano” y se evalúa la concentración. Si la concentración está en el rango de 55-75 %, el dispositivo encenderá un indicador con descripción “Concentración adecuada”, en caso contrario el sistema realizará una segunda evaluación iniciando y así sucesivamente hasta cumplir con la condición. Si la concentración es mayor al 70 % entonces se realiza el almacenamiento. Una vez analizados todos los parámetros anteriores y validados, se procederá al almacenamiento y cuantificación de generación.

Figura 5 Lógica de funcionamiento para el monitoreo y detección en el proceso de biodigestión

Fuente: *Elaboración Propia*

Para detectar la presencia de CH_4 se utiliza el sensor MQ-4 y para la presión del gas se utiliza el manómetro REGU-1/4 que mide una presión máxima de 160 psi y tiene un diámetro de 5 cm. Los datos leídos son cuantificados en función a la concentración de CH_4 en el microcontrolador PIC18F4550. Además, se incluye en el sistema una pantalla LCD para mostrar las lecturas de las condiciones del biodigestor como la mostrada en la Figura 6. En la pantalla se pueden visualizar los valores instantáneos registrados por los sensores, tales como: presencia del gas, concentración del gas, fecha y hora del día. Complementando con puerto USB y adaptador Micro SD para el almacenamiento de datos e historial del censado del mismo. El sistema cuenta con un conector tipo USB 2.0 el cual se conecta directamente con el micro controlador, el conector USB se encarga de mandar toda la información necesaria de calibración de los sensores, así como los datos del controlador, que es el encargado de procesar todos los datos recabados por los sensores y de darles el formato necesario para que se puedan su visualizar en la pantalla LCD.

Figura 6 Diagrama a bloques del esquema de monitoreo y control para el biodigestor



Fuente: Elaboración Propia

4. Desarrollo de pruebas y resultados

Para el desarrollo de pruebas es importante definir y delimitar las variables que influyen en el proceso por lo que a continuación se definen estos parámetros.

- Temperatura: Como en la mayoría de las reacciones orgánicas, la temperatura afecta la velocidad de la misma. A mayor temperatura, mayor será la actividad biológica. Se han distinguido dos rangos de temperaturas considerados como óptimos para la producción del CH₄. Aunque el CH₄ se puede producir a temperaturas menores de incluso 10 °C, es preferible, para conseguir niveles de reacción adecuados, trabajar siempre a temperaturas mayores a los 20 °C.
- Mezclado: El mezclado sirve para lograr condiciones ambientales homogéneas. De no producirse una mezcla adecuada, se pueden desarrollar microambientes dentro del ambiente. En la medida en que se logre una distribución adecuada, se evitarán altas concentraciones de productos metabólicos intermedios que pueden llegar a inhibir la actividad de las bacterias metalogénicas.
- Tiempo de retención de sólidos: El tiempo de retención de sólidos es el período que una partícula se queda en el biodigestor. En el proceso de crecimiento en suspensión, el TRS es igual para todas las partículas. Sin embargo, en otros tipos de procesos, el TRS puede diferir.
- Tiempo de retención hidráulico: El tiempo de retención hidráulico es la variable más importante en los biodigestores. Este tiempo, que depende de las características de los residuos tratados y las condiciones medioambientales, debe ser lo suficientemente largo como para permitir que las bacterias anaeróbicas metabolicen dentro de los digestores. El tiempo de retención puede ser distinto dependiendo de las condiciones en las que se encuentre dando como estimado de 5 a 15 días.

Las pruebas se realizaron en un periodo promedio de 6 meses, evaluando tres mezclas denominadas consecutivamente como mezcla 1 a 3. Cada una de las mezclas se evaluó por un periodo de dos meses. Para calcular la producción óptima de metano, se utiliza el modelo de Chen y Hashimoto, una adaptación del modelo cinético de Contois (Fuentes, 2011). En este modelo, se parte de la relación volumétrica de metano como se muestra en la Ecuación (1).

$$V = \frac{B_0 \times S_0}{HRT} \times \left[1 - \frac{K}{HRT \times \mu_m - 1 + K} \right] \quad (1)$$

Donde:

V es la relación volumétrica de metano $\left[\frac{m^3}{m^3 \text{ día}} \right]$

HRT es el tiempo de retención hidráulica [días]

B_0 es la producción máxima de metano cuando HRT tiende a infinito $[\frac{m^3}{kg}]$; esta variable dependerá del tipo de residuo del que se trate.

S_0 es la concentración en volumen de sólidos volátiles del efluente entrante $[\frac{kg}{m^3}]$

K es un parámetro cinético adimensional

μ_m es la tasa específica máxima de crecimiento de un organismo $[\frac{1}{días}]$

La relación volumétrica de metano establece cuántos metros cúbicos de metano se pueden obtener por día por metro cúbico del biodigestor.

S_0 se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$S_0 = \frac{SV_e}{E_e} \quad (2)$$

Donde SV_e $[\frac{kg}{día}]$ la masa de sólidos volátiles SV $[kg]$ que ingresa por día y E_e es el volumen del efluente entrante diario que contiene dicha masa $[\frac{m^3}{día}]$.

La masa de sólidos volátiles SV se puede calcular mediante:

$$SV = ST \times r_{TV} \quad (3)$$

Donde ST es la masa de sólidos totales $[kg]$ y r_{TV} es la relación porcentual entre la masa de sólidos volátiles y la masa de sólidos totales $\frac{SV}{ST}$ de la biomasa. A su vez, ST se puede calcular con:

$$ST = SS \times r_{ST} \quad (4)$$

Donde SS es la biomasa $[kg]$ y r_{ST} es la relación porcentual entre la masa de sólidos totales y la masa de desechos orgánicos $\frac{ST}{SS}$. Por lo tanto, SV se puede calcular mediante:

$$SV = SS \times r_{ST} \times r_{TV} \quad (5)$$

La variable K es un parámetro cinético adimensional y está determinado por:

$$K = 0.8 + 0.0016xe^{0.06 \times S_0} \quad (6)$$

Para $K \leq 1.64$ de acuerdo a (Fuentes, 2011)

μ_m es la tasa específica máxima de crecimiento de un organismo $[\frac{1}{días}]$; y viene dado por:

$$\mu_m = 0.013 \times T - 0.129 \quad (7)$$

Donde T es la temperatura de funcionamiento del biodigestor $[°C]$.

Por su parte, la producción diaria de metano V_{CH_4} $[\frac{m^3}{día}]$ se puede expresar mediante:

$$V_{CH_4} = V_d \times \quad (8)$$

Donde V_d es el volumen del biodigestor $[m^3]$.

Prototipo experimental

A continuación, se describen las especificaciones y composición de las mezclas. Así como el proceso de montaje del banco de pruebas. En las Figura 7 se muestra el preensamble del tanque-contenedor para el biodigestor, posteriormente en las Figuras 8, 9 y 19 se muestran el biodigestor ensamblado y verifican las medidas de construcción propuestas con el diámetro y la altura, respectivamente. En la Figura 11 se muestra la vista superior.

Figura 7 Preensamble del tanque-contenedor para el biodigestor



Fuente: Elaboración Propia

Figura 8 Biodigestor ensamblado



Fuente: Elaboración Propia

Figura 9 Vista lateral del biodigestor y verificación de diámetro



Fuente: Elaboración Propia

Figura 10 Vista lateral del biodigestor y verificación de altura



Fuente: Elaboración Propia

Figura 11 Vista superior del biodigestor ensamblado



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se documentan los resultados obtenidos para cada una de las mezclas evaluadas.

Mezcla 1: Desechos de comida y/o residenciales

La mezcla 1 se elaboró con residuos de comidas y desperdicios domésticos los cuales se proporcionaron de una recolecta de residuos por la colonia para la elaboración de la mezcla, compuesta por los siguientes residuos. Conformando 1 kg de mezcla.

Tabla 6 Materiales seleccionados para el tanque-contenedor del biodigestor

Tipos de residuos	Cantidad
Desechos de alimentos: comida, tortillas, frutos, verduras, etc.	70 %
Cascaras, semillas, cereales y productos enlatados caducados	30 %

Fuente: Elaboración Propia

Para calcular el porcentaje de concentración de CH₄ es necesario tomar como referencia la cantidad de partes por millón (PPM) para que el gas contenido en el prototipo sea inflamable y cumpla las características del proyecto. Las PPM necesarias para que el gas sea inflamable son 1800 (REF). Para calcular el porcentaje se utiliza la Ecuación 9. En la Tabla 7 se muestran los resultados de los datos recopilados.

$$\% = \frac{PPM * 100}{PPM REF} \quad (9)$$

Tabla 7 Composición de la mezcla 1

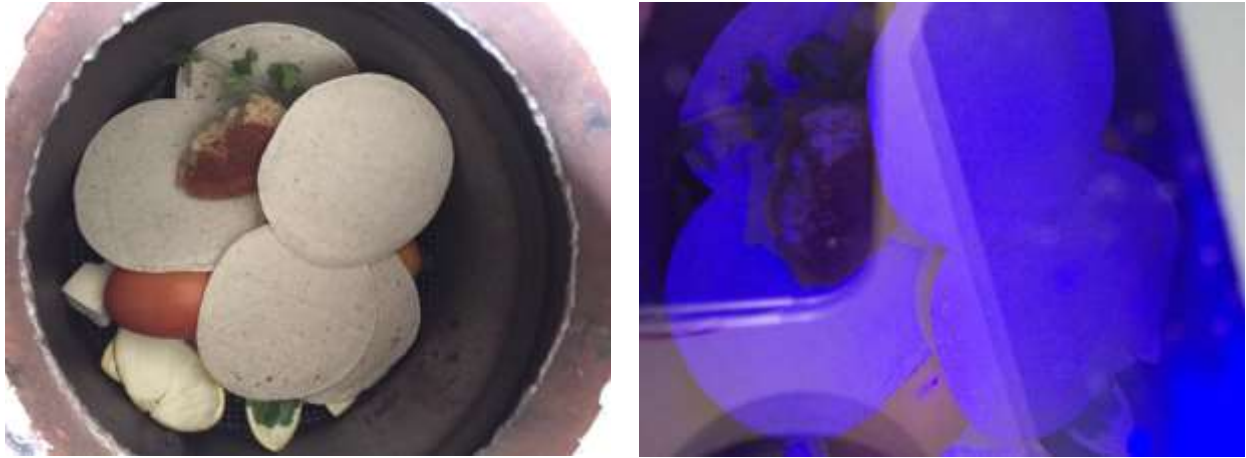
Mes	Datos			
	Semana	CH4 (PPM) (PPM)	CH4 %	Temperatura °C
Enero	1	86	5	28
	2	251	13.90	30
	3	475	26.38	32
	4	683	37.94	36
Febrero	5	790	43.88	38
	6	970	53.88	40
	7	1046	58.11	40
	8	1300	72.22	41

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 12 se puede observar la composición de la mezcla 1, la cual en su mayoría es de residuos de comida y vegetales. En la Figura 13 se muestran las lecturas mínima y máxima registradas por el biodigestor con el prototipo experimental para la mezcla 1.

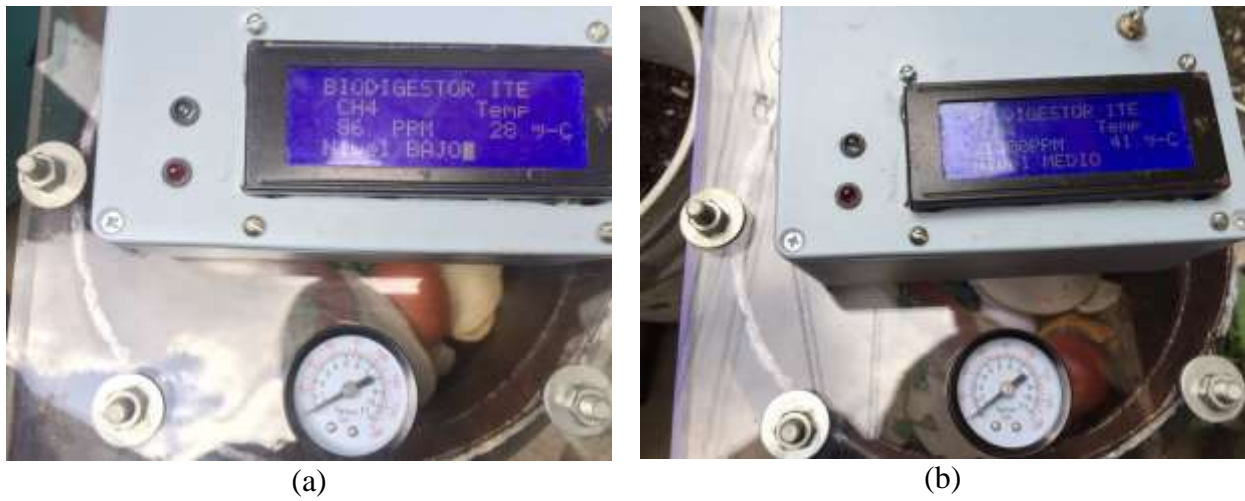
En la Gráfica 2 se muestra la variación de la concentración de CH₄ por semana, se puede observar que el comportamiento muestra una tendencia lineal. Por otro lado, en la Gráfica 3 se muestra el porcentaje de producción por semana. Se puede observar que el comportamiento es consistente con las PPM registradas. Por último, en el Gráfico 4 se muestra la relación de comportamiento para los datos mostrados en la Tabla 7.

Figura 12 Composición de la mezcla 1



Fuente: Elaboración Propia

Figura 13 Lecturas registradas para la mezcla 1: (a) mínima, (b) máxima

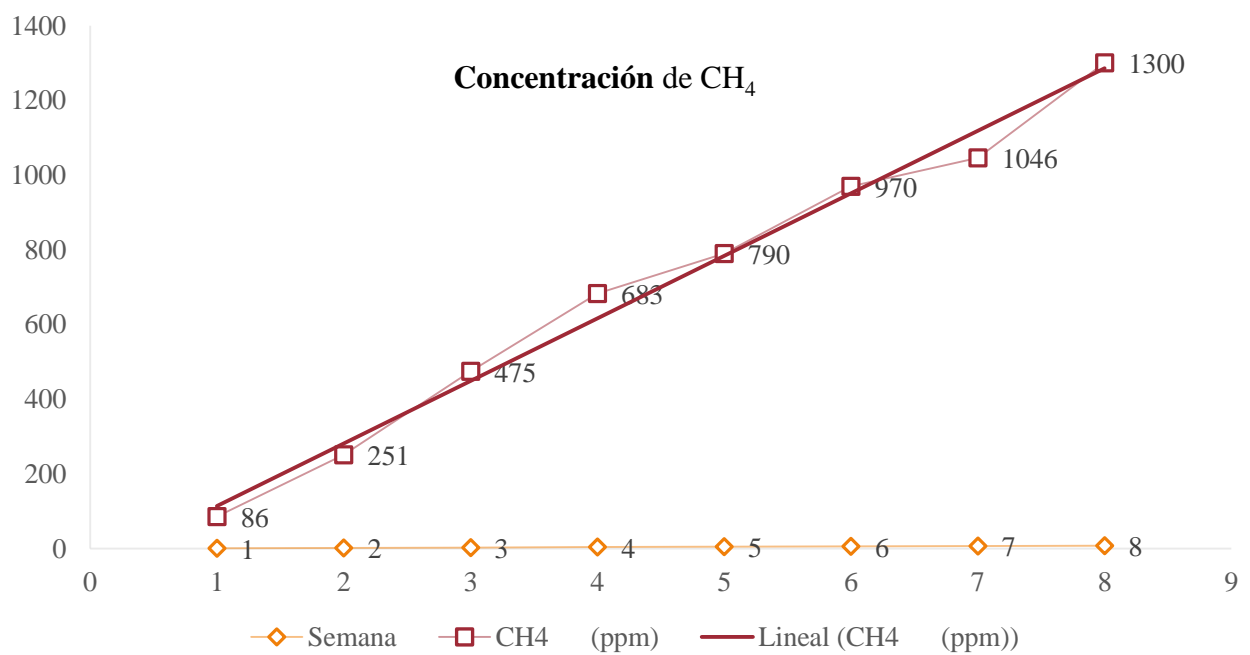


(a)

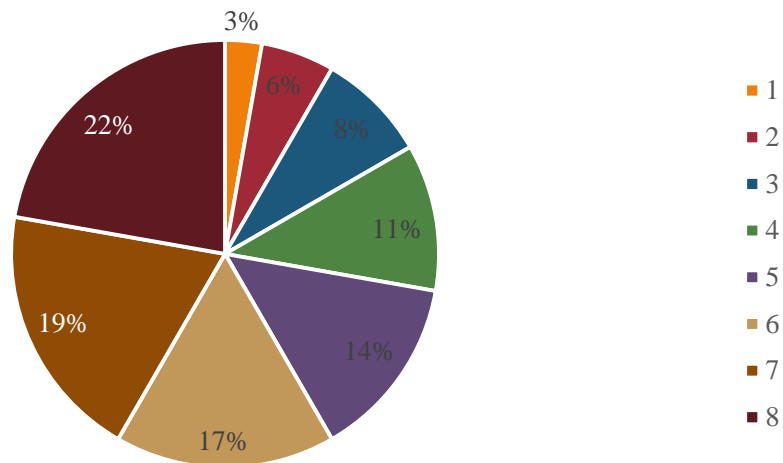
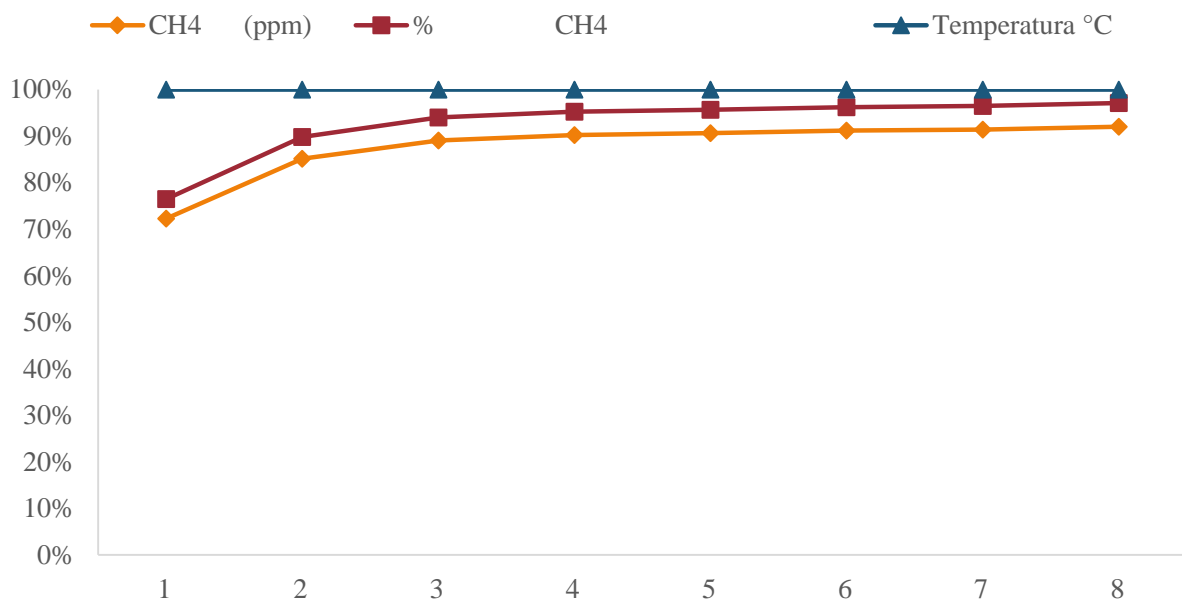
(b)

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 2 Comportamiento de la concentración de CH₄ para la mezcla 1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3 Porcentaje de CH₄ producido por semana para la mezcla 1Producción de CH₄ por semana*Fuente: Elaboración Propia***Gráfico 4** Porcentaje de CH₄ para la mezcla 1 por semana*Fuente: Elaboración Propia***Mezcla 2: Desechos de madera y excrementos de bovinos**

El material utilizado en la mezcla 2 fueron desechos de excrementos que se obtuvieron de las parcelas aledañas. Así como madera podrida recolectada y desechos que se obtuvieron de madererías. Conformando 1 kg de mezcla para la evaluación.

Tabla 8 Composición de la mezcla 2

Tipos de residuos	Cantidad
Desechos de animales: excremento bovino	85 %
Maderas podridas y desechos de madererías	15 %

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 9 se muestran los datos registrados para la mezcla por el lapso de 2 meses.

Tabla 9 Datos recopilados para la mezcla 2

Mes	Datos			
	Semana	CH4 (PPM) (PPM)	CH4 %	Temperatura °C
Marzo	1	100	6	32
	2	179	9.94	32
	3	348	19.33	36
	4	573	31.83	39
Abril	5	813	45.16	42
	6	1078	59.88	40
	7	1346	74.77	42
	8	1689	93.88	40

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 14 se puede observar la composición de la mezcla 2. En la Figura 15 se muestran las lecturas mínima y máxima registradas por el biodigestor con el prototipo experimental para la mezcla 2. Se destaca una generación de CH₄ mucho más elevada que la presentada por la mezcla 1.

Figura 14 Composición de la mezcla 2



Fuente: Elaboración Propia

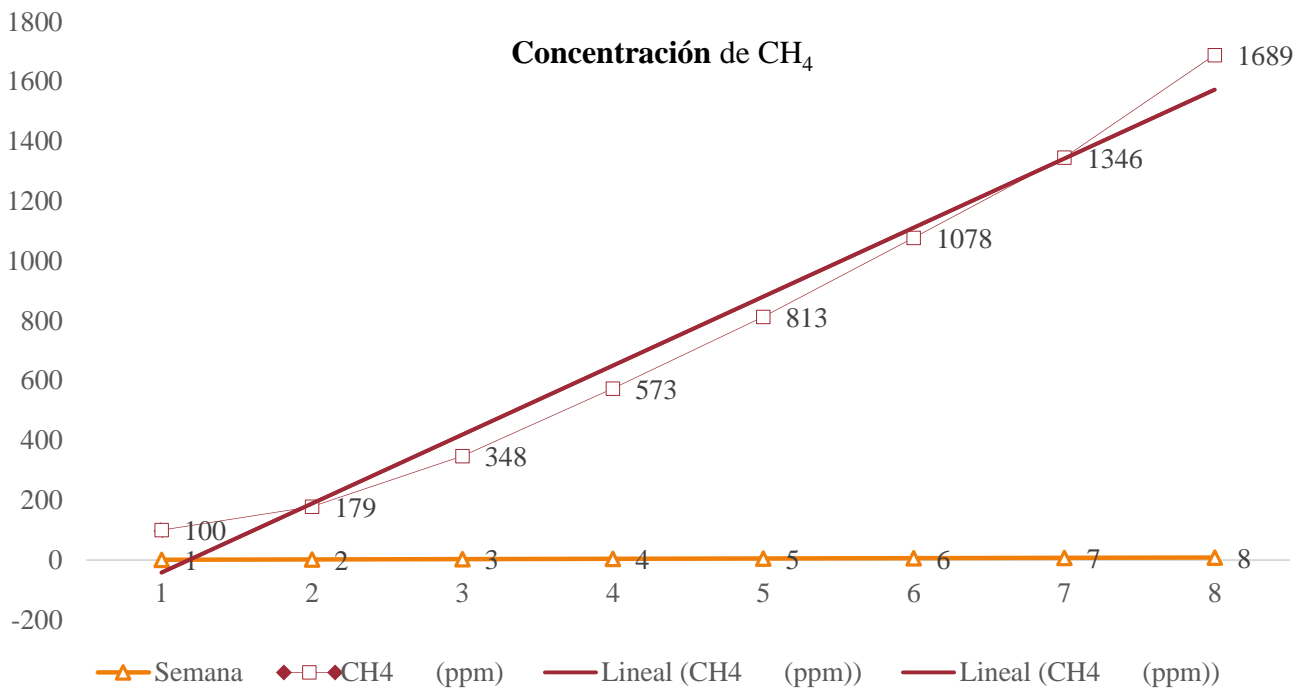
Figura 15 Lecturas registradas para la mezcla 2: (a) mínima, (b) máxima.



Fuente: Elaboración Propia

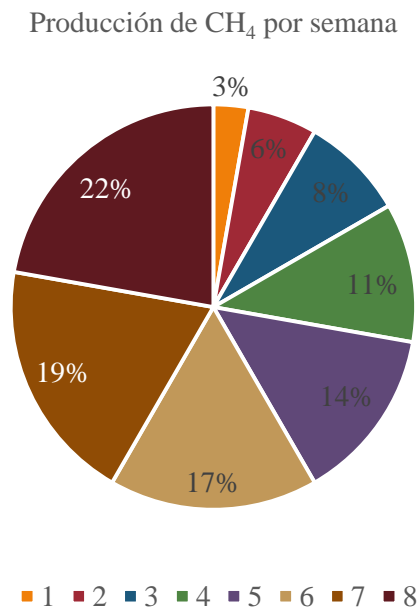
En la Gráfica 5 se muestra la variación de la concentración de CH₄ por semana, se puede observar que el comportamiento muestra una tendencia lineal. Por otro lado, en la Gráfica 6 se muestra el porcentaje de producción por semana. Se puede observar que el comportamiento es consistente con las PPM registradas. Por último, en el Gráfico 7 se muestra la relación de comportamiento para los datos mostrados en la Tabla 9.

Gráfico 5 Comportamiento de la concentración de CH₄ para la mezcla 1

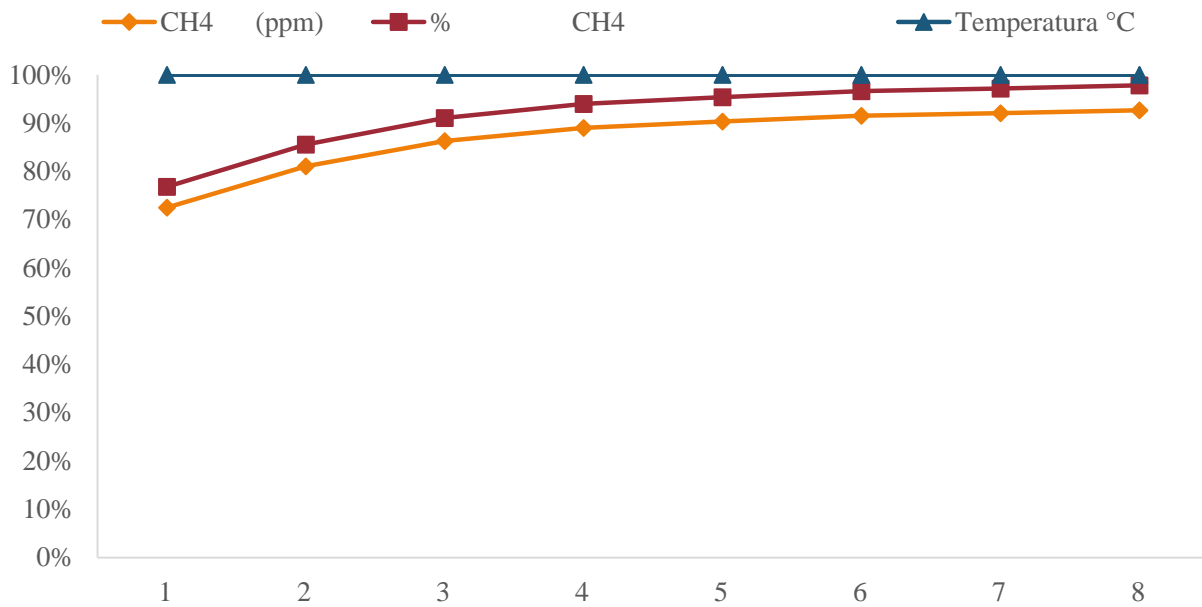


Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 6 Porcentaje de CH₄ producido por semana para la mezcla 2



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 7 Porcentaje de CH₄ para la mezcla 2 por semana

Fuente: Elaboración Propia

Mezcla 3: Plantas y hojarascas secas

Para la mezcla 3 se recolectaron plantas y hojarascas secas productos de los desechos de abonos naturales como árboles, plantas secas encontradas en los campos cercanos aledaños en los campos de cultivo para conformar 1 kg de mezcla con las cantidades mostradas en la tabla 10.

Tabla 10 Composición de la mezcla 3

Tipos de residuos	Cantidad
Desechos de plantas: pasto, arboles, maleza	55 %
Hojarascas secas, plantas secas	45 %

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 11 se muestran los datos registrados para la mezcla por el lapso de 2 meses.

Tabla 11 Datos recopilados para la mezcla 3

Mes	Datos			
	Semana	CH4 (PPM) (PPM)	CH4 %	Temperatura °C
Mayo	1	14	1	28
	2	27	1.50	28
	3	46	2.55	30
	4	62	3.44	32
Junio	5	148	8.22	34
	6	194	10.77	34
	7	221	12.72	36
	8	300	16.66	36

Fuente: Elaboración Propia

Para introducir la mezcla 3 en el biodigestor fue necesario pulverizar la madera en trozos pequeños para homogenizar la mezcla y balancear los componentes del producto. En la Figura 16 se muestra la mezcla 3 se encuentra dentro del prototipo lista para su descomposición En la Figura 17 se muestran las lecturas mínima y máxima registradas por el biodigestor con el prototipo experimental para la mezcla 3.

Figura 16 Composición de la mezcla 3

Fuente: Elaboración Propia

Figura 17 Lecturas registradas para la mezcla 3: (a) mínima, (b) máxima.

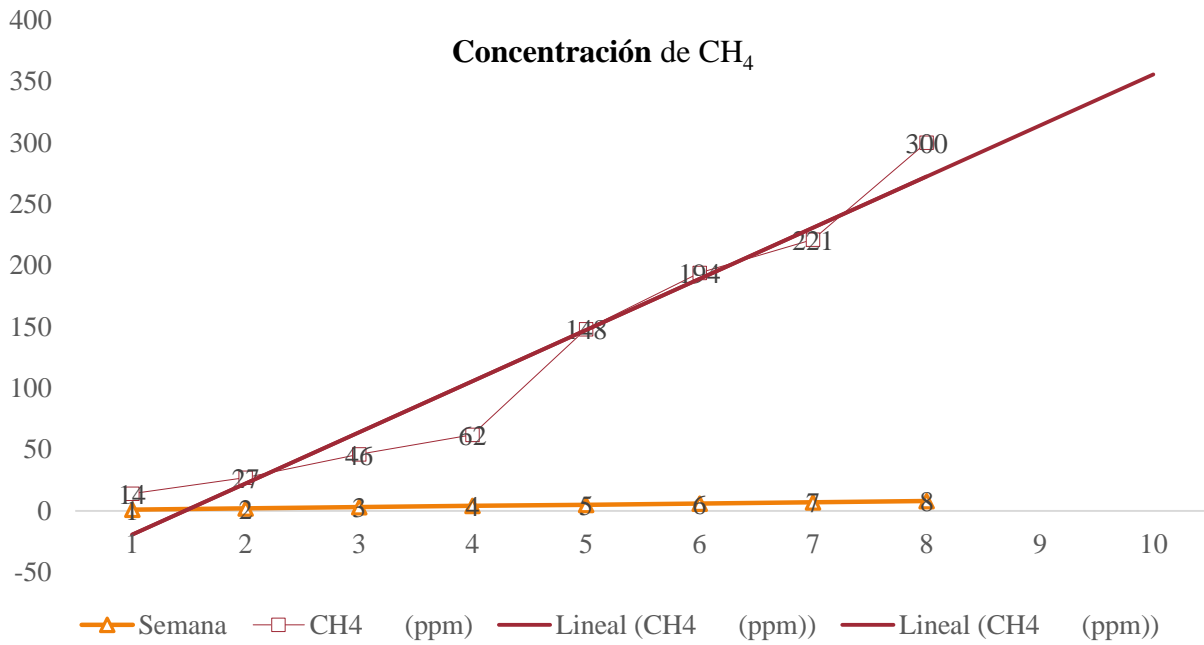
(a)

(b)

Fuente: Elaboración Propia

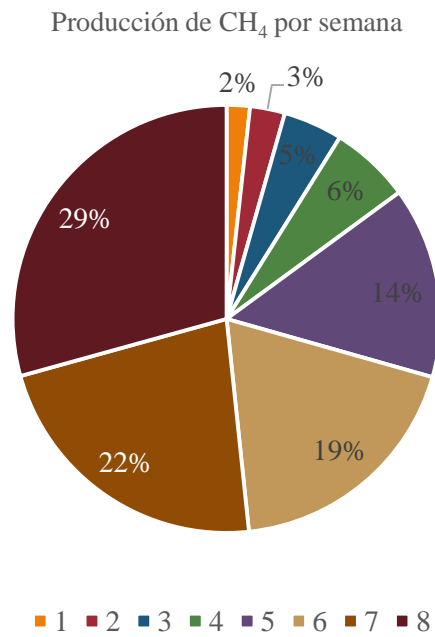
En la Gráfica 8 se muestra la variación de la concentración de CH_4 por semana, se puede observar que el comportamiento muestra una tendencia lineal. Por otro lado, en la Gráfica 9 se muestra el porcentaje de producción por semana. Se puede observar que el comportamiento es consistente con las PPM registradas. Por último, en el Gráfico 10 se muestra la relación de comportamiento para los datos mostrados en la Tabla 11. Se puede observar que la mezcla 3 presenta una menor producción de CH_4 en el periodo evaluado. Por último, en el Gráfico 11 se muestra una comparativa de la producción entre las tres mezclas evaluadas. Se puede identificar a partir de los resultados que la mezcla 2 es la que genero una mayor concentración en la producción de CH_4 .

Gráfico 8 Comportamiento de la concentración de CH₄ para la mezcla 1

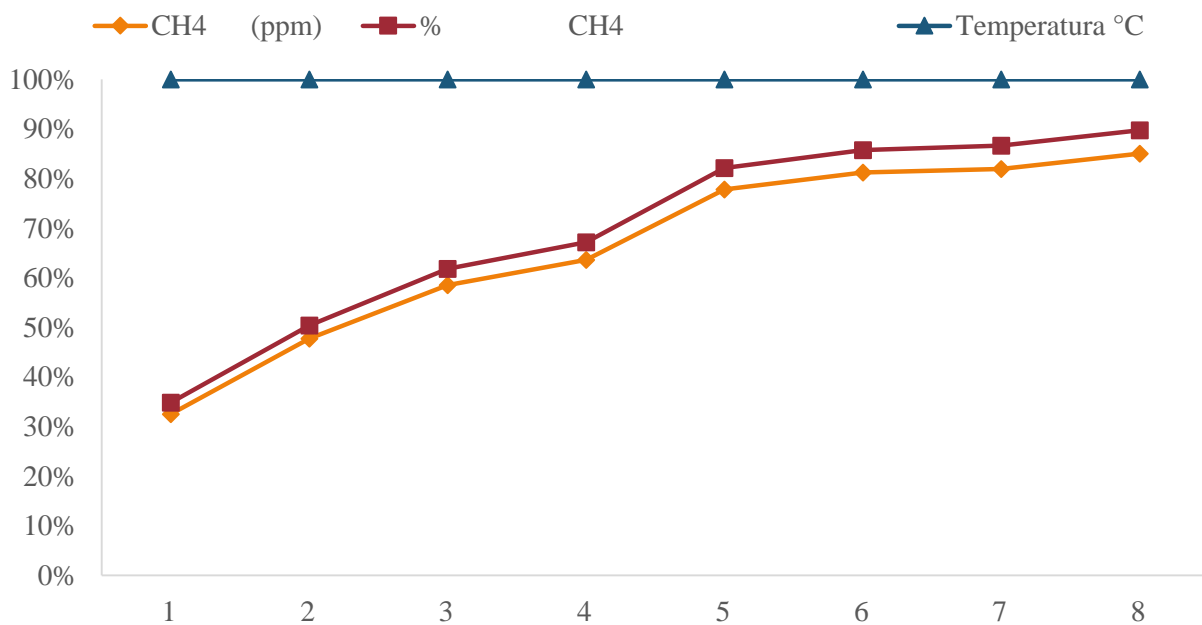


Fuente: Elaboración Propia

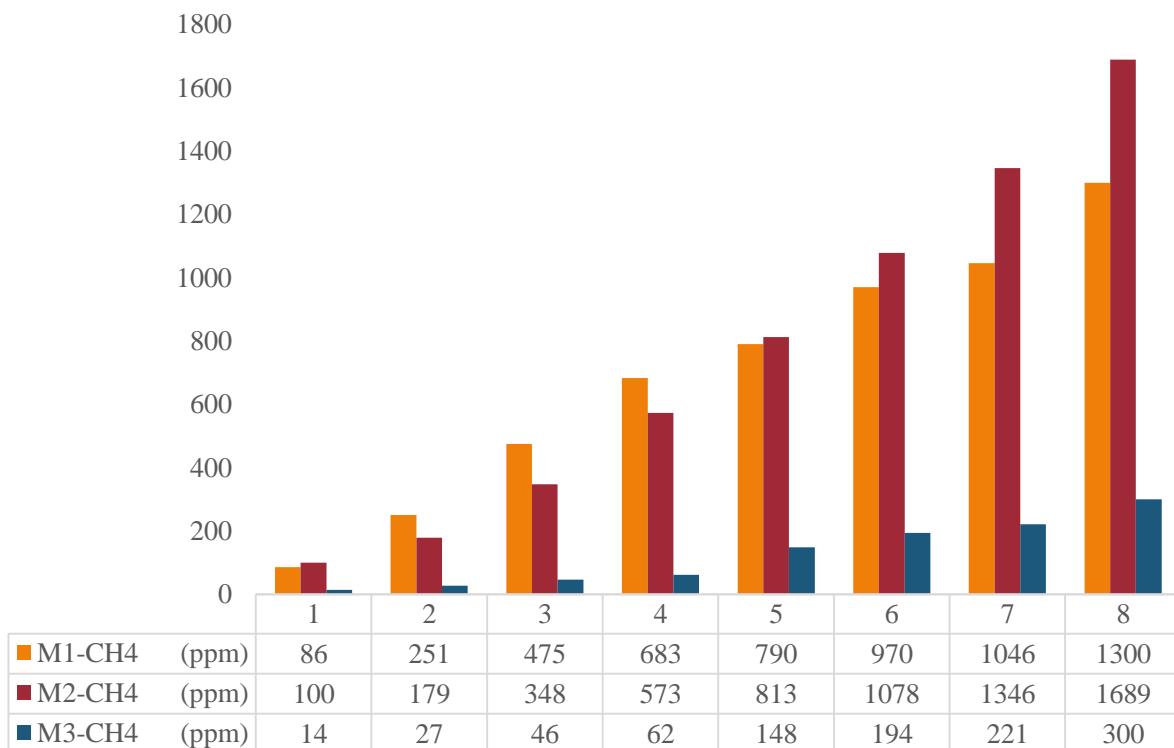
Gráfico 9 Porcentaje de CH₄ producido por semana para la mezcla 3



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 10 Porcentaje de CH₄ para la mezcla 3 por semana

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 11 Comportamiento de la producción de CH₄ en PPM para las distintas mezclas evaluadas en las semanas 1 a 8

Fuente: Elaboración Propia

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso diseñar y construir un prototipo experimental para un biodigestor con el objetivo de cuantificar la presencia de CH₄ y determinar la concentración para distintas mezclas en un proceso de biodigestión. A partir de los resultados obtenidos se logró obtener información relevante de los procesos de generación de biogás a partir de desechos variados combinados en tres tipos de mezclas, tomando como referencia los residuos y desechos más comunes que se puede recolectar en una comunidad.

Para la mezcla 1 se identifica que la generación de biogás es del 40% de su capacidad de combustión. En este proceso, los residuos de comidas y desechos de cascaras de fruta y vegetales generan en el proceso de descomposición desprendimiento de desechos acuosos que elevan la producción de biogás, no obstante, es importante monitorear la proliferación de hongos y bacterias que se pueden presentar. Por otro lado, para la mezcla 2 se identificó la generación de biogás en un 75% de su capacidad de combustión, lo anterior se atribuye a que los residuos de madera y excrementos bovinos, desde el proceso de asentamiento y descomposición desprenden CH₄, de acuerdo a las investigaciones realizadas se puede mencionar que esto ocurre ya que en el proceso de digestión de los bovinos los desechos son altamente ricos en bacterias que fomentan la generación de gas natural, pasado el tiempo se observa que la generación de gas no disminuye, se resalta esta característica como relevante, ya que se puede utilizar como un residuo de generación de biogás por excelencia. Finalmente, en la mezcla 3 se nota una generación por debajo de las cantidades necesarias para la combustión, lo anterior se atribuye a que los desechos de hojarasca secas y plantas de acuerdo a necesitan que el proceso de descomposición sea complementado con algún agente externo en este caso, por ejemplo, como el que se presenta en la digestión con los jugos gástricos para los bovinos y que se encuentran en el excremento. Para este trabajo, este catalizador no se incluyó por lo que no se alcanzó el nivel de combustión mínimo con la mezcla 3.

6. Referencias

- Arhoun, B. (2017). *Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Málaga]. Repositorio Institucional-Universidad de Málaga.
- Borja, R.; Rincón, B. Biogas Production. *Reference Module in Life Sciences*; 2017; pp 1–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.09105-6>.
- Coto, J. M. (2007). Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integradora de EARTH. *Tierra Tropical, Sostenibilidad, ambiente y Sociedad (Revista de la Universidad de EARTH)*, pag. 129 - 138.
- COP26. (31 de octubre). *Secure global net zero and keep 1.5 degrees within reach*. Recuperado de <https://ukcop26.org/cop26-goals/mitigation/> [Consulta: 2021, noviembre 8].
- Diario Oficial de la Federación. (2010). *DOF-1: Norma Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010*. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3997/sener/sener.htm>
- Diario Oficial de la Federación. (2010). *DOF-2: Norma Oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010*. <http://dof.gob.mx/normasOficiales/4290/sener/sener.htm>
- Eurotubo (2020). Biodigestor. Imagen tomada de: eurotubo.com.pe [Página Web en línea]. Recuperado de: <https://eurotubo.com.pe/> [Consulta: 2021, septiembre 6]
- Feijoo, V. & Villacreses, D. (2020). *Generación de gas metano mediante la codigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos y biomasa de la ciudad de Machla* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio Institucional-Universidad Técnica de Machala.
- Ge, M., Friedrich, J., y Vigna, L. (2 de septiembre de 2021). “Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector”. WRI México. <https://wrimexico.org/bloga/cuatro-gr%C3%A1ficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pa%C3%ADs-y-por-largo>
- Largo, M. (2021). *Monitorización de un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales mediante narices electrónicas*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Valladolid]. Repositorio Documental-Universidad de Valladolid]
- Laureles, J. (3 de octubre de 2021). “México, uno de los 13 países mayores emisores de CO₂ del mundo: Inegycei”. La jornada. <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/10/01/sociedad/mexico-uno-de-los-13-paises-mayores-emisores-de-co2-del-mundo-inegycei/>
- Masera, C., Coralli, F., Garica, B., Riegelhaput, E., Arias, T., Vega, J., Díaz, R., Guerrero, G. & Cecotti, L. (2011). La bioenergía en México: situación actual y perspectiva. *Cuaderno temático 4*(1), 1-44.

Moreno, M. T. (2011). Manual de Biogás. Santiago, Chile: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF.

Nuntón, S. & De los Angeles, S. (2018). *Influencia de la temperatura y pH en el rendimiento de obtención de biogás a partir de bagazo de caña y estiércol de equino mediante un digestor batch* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional-Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO. (2019). “Guía teórica-práctica sobre el biogás y los biodigestores”. *Colección de documentos técnicos*, (12), 1-21.

Solorzano, G. (2003). Aportaciones de gases de efecto invernadero por el manejo de residuos sólidos en México: el caso del metano. *Gaceta ecológica*, 66(1), 7-15.

Srisowmeya, G., Chakravarthy, M. & Nandhini, G. (2019). Critical Considerations in Two Stage Anaerobic Digestion of Food Waste – A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 119(1), 1-14.

Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2^{do} Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3^{er} Coautor

Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)

International Identification of Science - Technology and Innovation

ID 1st author: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 1st author: (Scholar-PNPC or SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1st coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 1st coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

ID 2nd coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 2nd coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

ID 3rd coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 3rd coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

(Report Submission Date: Month, Day, and Year); Accepted (Insert date of Acceptance: Use Only ECORFAN)

Citación: Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 1^{er} Autor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 1^{er} Coautor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 2^{do} Coautor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 3^{er} Coautor. Apellido

Correo institucional [Times New Roman No.10]

Primera letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre Editores. Apellidos (Dir.) *Título del Handbook [Times New Roman No.10]*, Temas Selectos del área que corresponde ©ECORFAN- Filial, Año.

Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

Abstract

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo, en inglés.

Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman y Negritas No.12

1 Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?.

Enfocar claramente cada una de sus características.

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del Capítulo.

Desarrollo de Secciones y Apartados del Capítulo con numeración subsecuente

[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Capítulos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

En el *contenido del Capítulo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

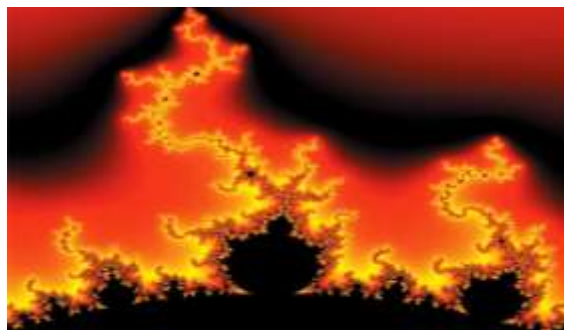
[Indicando el título en la parte Superior con Times New Roman No.12 y Negrita, señalando la fuente en la parte Inferior centrada con Times New Roman No. 10]

Tabla 5.1 Título

Particiones	Valores	Log
P1	7.58	0.88
P2	7.62	0.88
P3	7.58	0.88
P4	7.59	0.88
P5	7.57	0.88
P6	7.58	0.88
P7	7.57	0.88

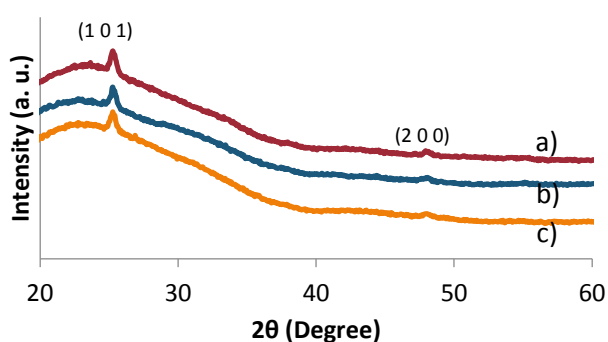
Fuente de Consulta:
(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

Figura 1.1 Título



Fuente de Consulta:
(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

Gráfico 1.1 Título



Fuente de Consulta:
(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

Cada Capítulo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Título secuencial.

Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$P = \frac{[V_V - P_V]^{1/2}}{V_O - P^{Uh}} + \frac{3}{4} \left[\frac{(P^{VL})}{(P_u)} \right] \rightarrow \int_{V^{La}}^{J_a} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados.

Resultados

Los resultados deberán ser por sección del Capítulo.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

Referencias

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo, en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Capítulo.

Ficha Técnica

Cada Capítulo deberá presentar en un documento Word (.docx):

Nombre del Handbook

Título del Capítulo

Abstract

Keywords

Secciones del Capítulo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

Reserva a la Política Editorial

ECORFAN Handbooks se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar la Obra Científica a la Política Editorial del Ecorfan Handbooks. Una vez aceptada la Obra Científica en su versión final, el Ecorfan Handbooks enviará al autor las pruebas para su revisión. Ecorfan® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación de la Obra Científica.

Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Declaración de Originalidad y carácter inédito de la Obra Científica, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución

La Dirección de Ecorfan-México, S.C reivindica a los Autores de la Obra Científica que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes de la Obra Científica deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia de la Obra Científica propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título de la Obra Científica:

- El envío de una Obra Científica a Ecorfan Handbooks emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en esta Obra Científica ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeado en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en la Obra Científica, así como las teorías y los datos procedentes de otras Obras Científicas previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que Ecorfan-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de esta Obra Científica se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en la Obra Científica.

Copyright y Acceso

La publicación de esta Obra Científica supone la cesión del copyright a ECORFAN-Mexico, S.C en su Holding México para su ECORFAN Handbooks, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada de la Obra Científica y la puesta a disposición de la Obra Científica en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título de la Obra Científica:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre la Obra Científica enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio a la Obra Científica el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de la Obra Científica. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con la Obra Científica que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter la Obra Científica a evaluación.

Responsabilidades de los Autores

Los Autores deben garantizar que sus Obras Científicas son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Obra Científica definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza de la Obra Científica presentado a arbitraje.

Servicios de Información

Indización - Bases y Repositorios

RESEARCH GATE	For international bibliographer's manager
MENDELEY	For basification of data from scientific journals
GOOGLE SCHOLAR	For your international search specialized in retrieving scientific documents
REDIB	Ibero-American Network of Innovation and scientific knowledge-CSIC

Servicios Editoriales:

Identificación de Citación e Índice H.
Administración del Formato de Originalidad y Autorización.
Testeo del Chapter con PLAGSCAN.
Evaluación de Obra Científica.
Emisión de Certificado de Arbitraje.
Edición de Obra Científica.
Maquetación Web.
Indización y Repositorio
Publicación de Obra Científica.
Certificado de Obra Científica.
Facturación por Servicio de Edición.

Política Editorial y Administración

143 - 50 Itzopan, Ecatepec de Morelos – México. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MSc

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistentes Editoriales

SORIANO-VELASCO, Jesus. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio

(ECORFAN®- Mexico- Bolivia- Spain- Ecuador- Cameroon- Colombia- El Salvador- Guatemala- Nicaragua- Peru- Paraguay- Democratic Republic of The Congo- Taiwan),sponsorships@ecorfan.org

Oficinas de Gestión

143 - 50 Itzopan, Ecatepec de Morelos–México.

21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre–Bolivia.

38 Matacerquillas, CP-28411. Moralzarlal –Madrid-España.

18 Marcial Romero, CP-241550. Avenue, Salinas 1 - Santa Elena-Ecuador.

1047 La Raza Avenue -Santa Ana, Cusco-Peru.

Boulevard de la Liberté, Immeuble Kassap, CP-5963.Akwa- Douala-Cameroon.

Southwest Avenue, San Sebastian – León-Nicaragua.

6593 Kinshasa 31 – Republique Démocratique du Congo.

San Quentin Avenue, R 1-17 Miralvalle - San Salvador-El Salvador.

16 Kilometro, American Highway, House Terra Alta, D7 Mixco Zona 1-Guatemala.

105 Alberdi Rivarola Captain, CP-2060. Luque City- Paraguay.

Distrito YongHe, Zhongxin, calle 69. Taipei-Taiwán.

43 Calle # 30 -90 B. El Triunfo CP.50001. Bogotá-Colombia.

