

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Modelado, simulación y control inteligente del movimiento
de una silla de ruedas”**

TESIS DE POSTGRADO

Previo a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
MENCIÓN EN SISTEMAS MECÁNICOS**

Presentada por:

William Alexander Ávila Aguilar

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2022

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mi director de tesis, PhD. Jorge Hurel., a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo, y especialmente a mi familia por darme la oportunidad de poder continuar mis estudios.

DEDICATORIA

Este trabajo realizado con esfuerzo por varios meses, está dedicado a mis padres, abuela, familiares y amigos.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

Jorge Hurel E., Ph.D.
DIRECTOR DE TESIS

Juan Peralta J., Ph.D.
CO - DIRECTOR DE TESIS

Carlos Helguero A., Ph.D.
VOCAL 1

Efraín Terán C., MSc.
VOCAL 2

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este trabajo de titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

William Alexander Ávila Aguilar

RESUMEN

Según la información obtenida por el ministerio de salud pública del Ecuador, actualmente existen 215000 personas que tienen una discapacidad física de cualquier índole y el mayor porcentaje (46,54%) de este grupo, corresponde a edades entre 36 y 64 años, quienes al hacer uso de una silla de ruedas requieren la ayuda de terceros con el fin de cumplir sus rutinas diarias.

En este trabajo, se desarrolló una comparativa de dos controladores borrosos en una silla de ruedas eléctrica jazzy jet 3, con el objetivo de verificar su eficacia en la evasión obstáculos y escalones, brindándole autonomía a los usuarios e independencia de terceros. Primero, se derivaron las ecuaciones del movimiento de una silla de ruedas eléctrica por el enfoque lagrangiano para obtener su respuesta dinámica y estimar el tiempo de llegada al obstáculo que se deseó evadir. Luego, por medio de la dinámica de sistemas multicuerpo, se modeló el conjunto de cuerpos rígidos que conforman a la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo con sus juntas respectivas que describen su movimiento real. Los programas utilizados para realizar las simulaciones del análisis de su respuesta dinámica por ambos enfoques fue Matlab y Simscape, respectivamente. Una vez obtenido el tiempo de respuesta en las simulaciones, se procedió con el desarrollo de dos controladores (controlador 1 y controlador 2) por el método de la lógica borrosa con el sistema de inferencia Mamdani para su implementación en la silla de ruedas eléctrica, con el fin de optimizar recursos computacionales en diseño de la planeación de la silla de ruedas eléctrica. Los materiales utilizados para la implementación del control borroso fueron una tarjeta Arduino Mega 2560, ocho sensores ultrasónicos HC-SR04, cables de conexión de 40 cm de largo para los puertos digitales, dos servos motores MG 995, un mecanismo impreso en material ácido poliláctico y una fuente externa de voltaje de 7,2 Voltios.

El controlador borroso 1 contó con 32 reglas borrosas y el controlador borroso 2 contó con 161 reglas borrosas, siendo más eficiente en recursos computacionales el controlador borroso 1 quien requirió el 60,4% de su capacidad de memoria interna de la tarjeta Arduino en comparación con el controlador borroso 2 quien usó el 80,4% de su memoria interna, sin embargo, ambos controladores cumplieron con el objetivo deseado en este trabajo que fue la evasión de obstáculos en la planeación de una silla de ruedas eléctrica.

Palabras clave: Lógica borrosa, control borroso, recursos computacionales, eficiencia.

ABSTRACT

According to the public health ministry from Ecuador currently, there are 215000 people who have a physical disability from any degree and the greatest percentage from this group (46,54%), belongs to ages from 36 and 64, whom using a wheelchair need help from a third person to accomplish their daily activities.

In this work, a comparative between two fuzzy controllers were developed using an electric wheelchair Jazzy jet 3 model, giving autonomy and independency to the users from third people with the aim to verify its efficacy avoiding obstacles and step stairs. First, using the lagrangian approach, the movement equations to obtain its Dynamic response and determine the arrive time to the goal were developed. Then, using the multibody dynamics approach, all the rigid bodies which are part from the electric wheelchair were designed with their joints which describe its motion. The programs used in this work to simulate the movement Dynamic response by the two approaches were Matlab and Simscape, respectively. Once the time response was obtained in the simulations, two fuzzy logic controllers (controller 1 and controller 2) were developed by using the fuzzy logic and inference Mamdani method to perform the planning motion of the electric wheelchair avoiding obstacles and step stairs with the aim to optimize Computational resources. The materials used to accomplish the progress and implementation of the fuzzy logic control were an arduino mega 2560 board, eight ultrasonic sensors HC-SR04, connection cables of 40 cm lenght for digital ports, two servo motors MG 995, a 3D mechanism polylactic acid material print and an external 7,2 voltage source.

The controller 1 had 32 fuzzy rules and the controller 2 had 161 fuzzy rules, being more efficiency in Computational resources the controller 1 which required only its 60,4% from the arduino board internal memory compared with the controller 2 wich required its 80,4% from the arduino board internal memory, nevertheless, both controllers accomplished the goal from this work which was avoiding obstacles in the planning motion of the electric wheelchair.

Keywords: *Fuzzy logic, fuzzy control, Computational resources, efficiency.*

ÍNDICE GENERAL

	Pág
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
ABREVIATURAS	X
SIMBOLOGÍA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problemática.....	4
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivo General.....	4
1.4. Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO 2	6
2. REVISIÓN LITERARIA.....	6
2.1. El uso de una silla de ruedas como medio de transporte.....	6
2.2. Seguridad y limitantes en las sillas de ruedas eléctricas	8
2.3. Uso de la mecánica lagrangiana y dinámica de sistemas multicuerpo en sistemas mecánicos	9
2.4. Plataformas de programación vigentes para simular respuestas dinámicas.	10
2.5. Aplicaciones de lógica difusa en sillas de ruedas eléctricas en el Ecuador.	11
CAPÍTULO 3	12
3. METODOLOGÍA	12
3.1. Modelo dinámico de una silla de ruedas eléctrica mediante enfoque lagrangiano.	12
3.2. Modelo dinámica de una silla de ruedas eléctrica por enfoque de la dinámica de sistemas multicuerpo.	14
3.3. Implementación de sistema de control utilizando Lógica Difusa para la planeación de una silla de ruedas eléctrica.	21
3.4. Diseño del controlador borroso 1.	24
3.5. Diseño del controlador borroso 2.	26
3.6. Implementación del controlador borroso en la silla de ruedas eléctrica.	28
CAPÍTULO 4	37

4. RESULTADOS	37
4.1. Respuesta al movimiento por enfoque lagrangiano.	37
4.2. Respuesta al movimiento por enfoque de la dinámica de sistemas multicuerpo.	39
4.3. Determinación del tiempo de respuesta con la implementación de los controladores borrosos en la silla de ruedas eléctrica.....	40
4.4. Implementación y funcionamiento del controlador borroso 1.....	42
4.5. Implementación y funcionamiento del controlador borroso 2.....	46
CAPÍTULO 5	51
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1. Conclusiones	51
5.2. Recomendaciones	52

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

CONADIS	Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades
ADAMS	Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems
VREP	Vehicle Readiness Enhancement Program
CAD	Computational Aided Design

SIMBOLOGÍA

x	Posición de la silla de ruedas eléctrica en dicha dirección.
\dot{x}	Rapidez del centro de masa de la silla de ruedas en dicha dirección.
\ddot{x}	Aceleración del centro de masa de la silla de ruedas en dicha dirección.
y	Posición de la silla de ruedas eléctrica en dicha dirección.
\dot{y}	Rapidez del centro de masa de la silla de ruedas en dicha dirección.
\ddot{y}	Aceleración del centro de masa de la silla de ruedas en dicha dirección.
θ	Posición angular del centro de masa de la silla de rueda.
$\dot{\theta}$	Rapidez angular del centro de masa de la silla de ruedas.
$\ddot{\theta}$	Aceleración angular del centro de masa de la silla de ruedas.
ϕ_1	Posición angular del centro de la rueda delantera derecha.
$\dot{\phi}_1$	Rapidez angular del centro de la rueda delantera derecha.
$\ddot{\phi}_1$	Aceleración angular del centro de la rueda delantera derecha.
ϕ_2	Posición angular del centro de la rueda delantera izquierda.
$\dot{\phi}_2$	Rapidez angular del centro de la rueda delantera izquierda.
$\ddot{\phi}_2$	Aceleración angular del centro de la rueda delantera izquierda.
m_T	Masa total de la silla de ruedas eléctrica.
m_B	Masa del chasis de la silla de ruedas eléctrica.
ρ	Radio de las llantas delanteras de la silla de ruedas eléctrica.
d	Distancia desde el centro de la línea que une las ruedas delanteras.
W	Ancho de la silla de ruedas eléctrica.
λ	Multiplicadores de Lagrange debido a restricciones no holonómicas.
I_{yy}^b	Momento de inercia de las llantas delanteras con respecto al eje y .
I_{xx}	Momento de inercia del escenario de trabajo con respecto al eje x .
I_{yy}	Momento de inercia del escenario de trabajo con respecto al eje y .
I_{zz}	Momento de inercia del escenario de trabajo con respecto al eje z .
τ_1	Torque aplicado a la llanta delantera derecha.
τ_2	Torque aplicado a la llanta delantera izquierda.
w_{rueda}	Rapidez angular de cada rueda de la silla de ruedas eléctrica.
α_{rueda}	Aceleración angular de cada rueda de la silla de ruedas eléctrica.
t	Tiempo.
c_b	Coeficiente de amortiguamiento.

k_b Coeficiente de rigidez.

T_c Tiempo de colisión.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
FIGURA 1.1. SECUENCIA EN EL USO DE UN MEDIO DE TRANSPORTE	2
FIGURA 1.2. CLASIFICACIÓN DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD FÍSICA SEGÚN SU EDAD	2
FIGURA 2.1. SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA.....	6
FUENTE: JAZZY JET 3 OWNER'S MANUAL.....	6
FIGURA 2.2. SILLA DE RUEDAS MANUAL	7
FIGURA 2.3. MECANISMO CERRADO.....	10
FIGURA 3.1. COORDENADAS GENERALIZADAS INVOLUCRADAS EN EL ANÁLISIS DINÁMICO DE LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA	13
FIGURA 3.2. SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA UTILIZADA.....	15
FIGURA 3.3. DISEÑO Y MODELO FINAL DE LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA JAZZY JET.....	16
FIGURA 3.4. MODELAMIENTO DEL TIPO DE JUNTAS EXISTENTE ENTRE EL SISTEMA DE CUERPOS RÍGIDOS COMPRENDIDOS EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA.....	18
FIGURA 3.5. UBICACIÓN DE SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA PARA ESTIMAR SU RAPIDEZ ANGULAR	19
FIGURA 3.6. DISEÑO DEL ESCENARIO DE TRABAJO, REPRESENTADO COMO CUERPO RÍGIDO	20
FIGURA 3.7. DISTANCIA ENTRE LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA Y EL OBJETIVO DESEADO PARA EVADIR.....	21
FIGURA 3.8. ALGORITMO DE CONTROL IMPLEMENTADO EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA.....	22
FIGURA 3.9. LADOS ESTABLECIDOS EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR BORROSO.....	23
FIGURA 3.10. VARIABLE DE SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO LA CUAL REPRESENTA DE LOS GIROS EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA	23
FIGURA 3.11. REPRESENTACIÓN DE LOS INTERVALOS DE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LA VARIABLE DE ENTRADA	24
FIGURA 3.12. REPRESENTACIÓN DE LOS INTERVALOS DE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LA VARIABLE DE SALIDA.....	25

FIGURA 3.13. DISEÑO DEL CONTROLADOR BORROSO 1	25
FIGURA 3.14. CONFIGURACIÓN DE REGLAS BORROSAS PARA EL CONTROLADOR 1	26
FIGURA 3.15. REPRESENTACIÓN DE LOS INTERVALOS DE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LA VARIABLE DE ENTRADA	26
FIGURA 3.16. REPRESENTACIÓN DE LOS INTERVALOS DE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LA VARIABLE DE SALIDA.....	27
FIGURA 3.17. DISEÑO DEL CONTROLADOR BORROSO 2	27
FIGURA 3.18. CONFIGURACIÓN DE REGLAS BORROSAS PARA EL CONTROLADOR 2	28
FIGURA 3.19. TARJETA ARDUINO MEGA 2560 UTILIZADA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL BORROSO.....	29
FIGURA 3.20. TARJETA EXTERNA PARA EXTENDER EL NÚMERO DE PUERTOS DE VOLTAJE Y NEUTRO DE LA TARJETA ARDUINO MEGA 2560....	30
FIGURA 3.21. CABLES DE CONEXIÓN DE 40 <i>cm</i> DE LARGO PARA CONECTAR LOS SENSORES ULTRASÓNICOS CON LA TARJETA ARDUINO MEGA 2560 ...	30
FIGURA 3.22. SENSOR ULTRASÓNICO UTILIZADO PARA SENSAR LAS DISTANCIAS DE LADOS DEFINIDOS EN EL CONTROLADOR BORROSO	31
FIGURA 3.23. CONFIGURACIÓN DEL CONTROL BORROSO EN LA PLATAFORMA SIMULINK.....	31
FIGURA 3.24. ACOPLAMIENTO DE SENSORES ULTRASÓNICOS EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA.....	32
FIGURA 3.25. SERVOS MOTORES UTILIZADOS PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	33
FIGURA 3.26. MECANISMO 1 IMPRESO PARA REALIZAR LOS GIROS EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA.....	34
FIGURA 3.27. MECANISMO 2 IMPRESO PARA REALIZAR LOS GIROS EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA.....	34
FIGURA 3.28. BATERÍAS LITIO – ION RECARGABLES DE 3,7 <i>V</i> Y 8800 <i>mAh</i> ACOPLADAS AL MECANISMO DE LOS SERVOS MOTORES.....	36
FIGURA 4.1. VALORES DE PRUEBA PARA ESTIMAR LA RAPIDEZ Y ACELERACIÓN ANGULAR DE LAS RUEDAS EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA	37

FIGURA 4.2. SIMULACIÓN DE LA TRAYECTORIA RECORRIDA POR LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA RESUELTAS SUS ECUACIONES DE MOVIMIENTO POR MEDIO DEL ENFOQUE LAGRANGIANO.....	38
FIGURA 4.3. TIEMPOS DE RESPUESTA Y DISTANCIA RECORRIDA POR LA SILLA DE RUEDAS SIMULADO EN SIMSCAPE	39
FIGURA 4.4. SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA EN SIMSCAPE.....	40
FIGURA 4.5. MECANISMO ACOPLADO A LOS SERVOS MOTORES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL BORROSO	41
FIGURA 4.6. IMPLEMENTACIÓN FINAL DEL CONTROL BORROSO PARA LA EVASIÓN DE OBSTÁCULOS EN LA PLANEACIÓN DE LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA JAZZY JET 3	41
FIGURA 4.7. SISTEMA DE CONTROL BORROSO FINAL CONFIGURADO EN LA PLATAFORMA SIMULINK.....	42
FIGURA 4.8. RESPUESTA DEL CONTROLADOR BORROSO 1 DE ACUERDO CON LOS RANGOS EN LAS DISTANCIAS ESTABLECIDAS	43
FIGURA 4.9. PRUEBAS REALIZADAS CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL BORROSO EN LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA	43
FIGURA 4.10. DISTANCIA SENSADA VS TIEMPO DE LA RESPUESTA DE LA VARIABLE DE ENTRADA DEL CONTROLADOR BORROSO 1 PARA EVADIR OBSTÁCULOS.....	44
FIGURA 4.11. ÁNGULO DE GIRO VS TIEMPO DE LA RESPUESTA DE LA VARIABLE DE SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO 1 PARA EVADIR OBSTÁCULOS.....	44
FIGURA 4.12. DISTANCIA SENSADA VS TIEMPO DE LA RESPUESTA DE LA VARIABLE DE ENTRADA DEL CONTROLADOR BORROSO 1 PARA EVADIR ESCALONES	45
FIGURA 4.13. ÁNGULO VS TIEMPO DE LA RESPUESTA DE LA VARIABLE DE SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO 1 PARA EVADIR ESCALONES	45
FIGURA 4.14. RESPUESTA DEL CONTROLADOR BORROSO 2 DE ACUERDO CON LOS RANGOS DE DISTANCIAS ESTABLECIDOS	46
FIGURA 4.15. DISTANCIA SENSADA VS TIEMPO DE LA RESPUESTA DE LA VARIABLE DE ENTRADA DEL CONTROLADOR BORROSO 9 PARA EVADIR OBSTÁCULOS.....	47

FIGURA 4.16. ÁNGULO DE GIRO VS TIEMPO DE LA RESPUESTA DE LA VARIABLE DE SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO 9 PARA EVADIR OBSTÁCULOS.....	47
FIGURA 4.17. DISTANCIA SENSADA VS TIEMPO DE LA RESPUESTA DE LA VARIABLE DE ENTRADA DEL CONTROLADOR BORROSO 9 PARA EVADIR ESCALONES	48
FIGURA 4.18. ÁNGULO DE GIRO VS TIEMPO DE LA RESPUESTA DE LA VARIABLE DE SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO 9 PARA EVADIR ESCALONES.	48

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág
TABLA 1.....	8
DESVENTAJAS DE ALGUNOS MÉTODOS DE RECONOCIMIENTO ENTRE EL USUARIO Y LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA.....	8
TABLA 2.....	16
NOMBRE DE CADA CUERPO RÍGIDO Y DESIGNACIÓN DE MATERIALES USADOS.....	16
TABLA 3.....	17
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SISTEMA DE CUERPOS RÍGIDOS QUE COMPREDEN A LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA MODELADA.....	17
TABLA 4.....	21
PROPIEDADES FÍSICAS DEL ESCENARIO DE TRABAJO.....	21
TABLA 5.....	32
LISTA DE SERVOS MOTORES UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO.....	32
TABLA 6.....	35
MATRIZ DE DECISIÓN PARA SELECCIONAR EL CONJUNTO DE SERVO MOTORES.....	35
TABLA 7.....	35
MATRIZ DE DECISIÓN PARA SELECCIONAR MECANISMO ACOPLADO A LOS SERVO MOTORES.....	35
TABLA 8.....	50
RESULTADOS GENERALES OBTENIDOS POR LOS MÉTODOS APLICADOS PARA LA RESPUESTA DINÁMICA DE LA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA JAZZY JET 3.....	50

ÍNDICE DE PLANOS

	Pág
ANEXO B	39

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Actualmente, la vigencia de un modelo de inclusión y derechos humanos define a la discapacidad como un concepto que evoluciona y que resulta de la interacción entre las personas con deficiencias, de las barreras debidas a la actitud y al entorno que evitan su participación plena y efectiva en la sociedad, en igualdad de condiciones con los demás (CONADIS, 2013).

La información que registra el banco mundial, indica que el 15% de la población en el mundo, es decir, aproximadamente 1000 millones de personas vive con una discapacidad, del cual, el 80% vive en países en vías de desarrollo. Por otra parte, a nivel local, la información que presenta el ministerio de salud pública del Ecuador, indica que actualmente existen 215000 personas con un tipo de discapacidad física y el mayor porcentaje (46,54%) de este grupo corresponde a edades entre 36 y 64 años. Dentro de este panorama, con el fin de guiar hacia una mejor calidad de vida tanto de personas adultas como discapacitadas, el enfoque debe estar orientado hacia tecnologías asistentes definidas como recursos técnicos que contribuyen a mejorar el desempeño en las rutinas diarias de este grupo de personas en el que su uso se ha vuelto un reto importante debido a discapacidades físicas, cognitivas y sensoriales (Amouri et al., 2019). Además, la tendencia en el crecimiento de personas discapacitadas o de tercera edad, ha motivado a un extenso diseño y avances en este tipo de transporte como una necesidad esencial (Abdul Ghani & Tokhi, 2016). En años recientes, los investigadores cada vez más están interesados en el campo de la rehabilitación en donde la tecnología asistente es un área emergente de estudio con el fin de reforzar y mejorar la habilidad de las personas discapacitadas o mayores de edad para que puedan realizar sus actividades diarias (Chatterjee & Roy, 2021).

Las personas con restricciones funcionales las cuales cuentan con un grado de discapacidad, deficiencia o condición discapacitante, se enfrentan a un amplio espectro de dificultades y debilidades importantes que afectan a su independencia, autonomía, seguridad, plena integración social e igualdad de oportunidades. Es por ello, que los sistemas de transporte es una de las principales manifestaciones para su uso. Un sistema de transporte es una serie de elementos relacionados entre sí que permiten movilizar personas o cargas desde un punto geográfico a otro. Los sistemas de transporte deben tener en cuenta qué necesidades requieren las personas con movilidad reducida debido a una discapacidad física, sensorial o cognitiva, o cualquier otra causa a la hora de hacer uso del sistema de transporte y cuya situación requiera de ayuda externa con carácter especial. Un ejemplo particular es el correcto uso de un dispositivo auxiliar de embarque como es el caso de las sillas de ruedas eléctricas o manuales (INEN, 2015).

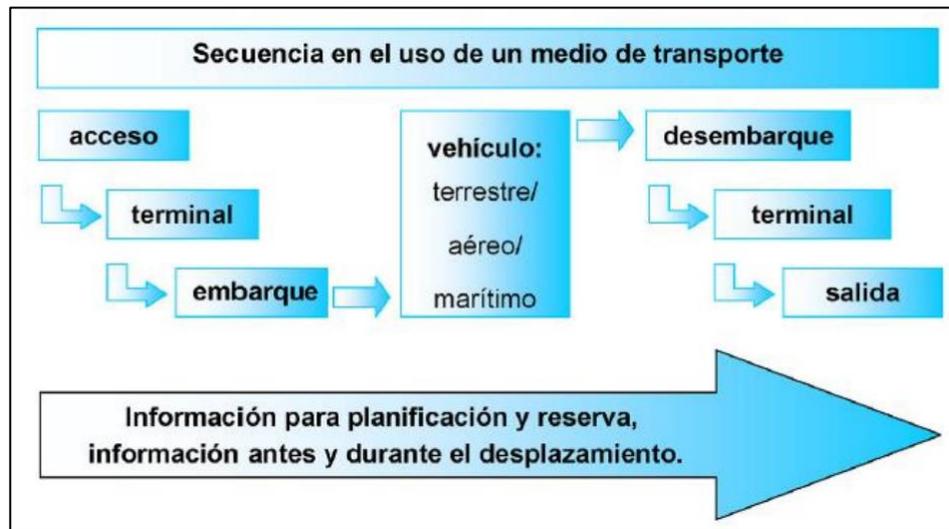


Figura 1.1. Secuencia en el uso de un medio de transporte

Fuente: INEN, 2015

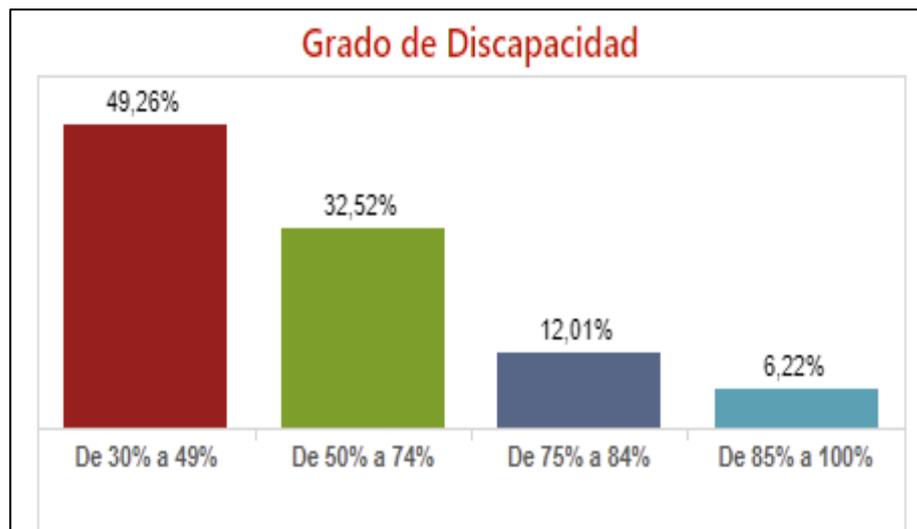


Figura 1.2. Clasificación de personas con discapacidad física según su edad

Fuente: Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades

Existe una gran variedad de enfermedades que afectan a la salud de las personas discapacitadas, las cuales vienen acompañadas de una discapacidad física. Para el caso de personas con problemas cerebro – vasculares, la movilidad es uno de los retos con los que se tienen que enfrentar y una silla de ruedas se vuelve parcialmente independiente con la característica de que le permite realizar sus actividades diarias (Al-qaysi et al., 2018). Según (Feng et al., 2021), enfermedades degenerativas como las cardiovasculares aumentan debido al uso de sillas de ruedas manuales.

Parálisis, es uno de los problemas más grandes en el que una persona discapacitada requiere necesariamente el uso de una silla de ruedas (Madona et al., 2020) y su seguridad es uno de los factores más importantes en el que las tradicionales sillas de ruedas eléctricas son usadas vía joystick (Baklouti et al., 2017). (Selph et al., 2021) indica que aproximadamente el 45% de pacientes con múltiple esclerosis tienen dificultades para realizar movimientos después de haberse hecho un diagnóstico médico y casi todos tienen problemas de movilidad después de 10 años. Así mismo dependiendo del nivel y grado de lesión en personas con problemas en la médula espinal, estas requieren del uso de una silla de ruedas. Según (Jordan et al., 2018) aproximadamente, entre el 33 al 62% de individuos que hacen el uso de una silla de ruedas manual padecen de patologías en el hombro debido a los movimientos restrictivos que se producen. (Travlos et al., 2017) indica que desórdenes neuromusculares son enfermedades raras adquiridas genéticamente las cuales causan una debilidad severa en el músculo; atrofia muscular espinal de tipo II y distrofia muscular de Duchenne son los ejemplos más comunes que aparecen a temprana edad en la niñez y adolescencia, por tanto, se ven en la necesidad del uso de una silla de ruedas eléctrica.

En la actualidad, la conexión entre el campo de la robótica y la implementación de estas tecnologías en las sillas de ruedas cada vez se vuelve más fuerte, proponiendo frecuentemente nuevos sistemas de control para brindar seguridad y autonomía a los usuarios, como lo es el caso para detección de obstáculos catalogados como rampas en el que el diseño de controladores para brindar seguridad a estos dispositivos es implementado (Wu et al., 2018). Así mismo el diseño de algoritmos por redes neuronales para entrenar los comportamientos de la silla de ruedas brindan mejor precisión en la respuesta al movimiento debido a la técnica por retroalimentación de la red (Sharifuddin et al., 2020). (Lei et al., 2022) propone un modelo basado en el diagrama de Voronoi para predecir que trayectoria es la más ideal en ausencia de obstáculos para aquellas personas que tienen dificultades en manipular sus manos. (Pu et al., 2018) propone una red de sensores de bajo costo implementada en una silla de ruedas eléctrica con el fin de evitar obstáculos y sugerir que trayectoria es la más segura. (Aina et al., 2022) propone un sistema de control por voz para ejecutar el movimiento de la silla de ruedas además de tener acoplado un detector de pulsaciones cardíacas para monitorear el estado de salud del usuario. (Patthanajitsilp & Chongstitvatana, 2022) propone un sistema de control para evitar obstáculos usando una cámara de un teléfono celular el cual logra dar alertas ante colisiones con una precisión del 90%. Por los ejemplos citados previamente en el que se brindan soluciones eficientes y tecnológicas en estos dispositivos, genera motivación implementar un sistema de control inteligente para evitar obstáculos en sillas de ruedas eléctricas para personas discapacitadas en el Ecuador.

Uno de los métodos vigentes que permiten con gran facilidad resolver sistemas no lineales y altamente complejos como los citados en el párrafo anterior, es la lógica borrosa. Permite manipular datos imprecisos y transformarlos en variables de decisión con el fin de controlar el sistema no lineal en cuestión. Es una técnica que permite vincular la experticia del conocimiento humano para lidiar con la imprecisión o incertidumbre (Masmoudi et al., 2016)

1.1. Problemática

Actualmente en el Ecuador, siendo un país en vías de desarrollo, no se cuenta con la implementación de tecnologías asistidas en sillas de ruedas tanto manuales como eléctricas para evitar obstáculos lo que no les permite incorporarse plenamente en la sociedad, lo que ocasiona que sea un grupo categorizado con un nivel bajo de inclusión social. La mayor parte de este grupo de personas no cuenta con un dispositivo para poder moverse de un lugar a otro y para aquellos que cuentan con una silla de ruedas, estas son manuales o bien hace uso de andadores. Por esta razón, este trabajo de investigación rigiere en proponer soluciones eficaces, innovadoras y accesibles a este grupo de personas para que puedan realizar sus actividades diarias quienes que no cuentan y tampoco tienen acceso a este tipo de dispositivos para su movilización.

1.2. Justificación

Actualmente, según la literatura, en el Ecuador no se han evidenciado aplicaciones de lógica difusa en el campo de la tecnología asistida y sus aplicaciones están presentes en diferentes campos del conocimiento por su capacidad de tratar problemas complejos y altamente no lineales. Esto se debe a que este enfoque puede procesar grandes cantidades de señales de entrada con características incompletas e inciertas, por ende, los sistemas de control difuso pueden proveer un sistema de navegación automático similar al estilo del pensamiento de los humanos (Kahraman et al., 2020). En este trabajo se propone un sistema de control borroso para la planeación del movimiento de una silla de ruedas eléctrica usando lógica difusa con el fin de mejorar la movilidad de personas que tienen una discapacidad física y requieren el uso de este dispositivo para realizar sus rutinas diarias con independencia de terceros. La implementación de este control borroso les permitirá desplazarse de un lugar a otro evitando obstáculos de una forma autónoma. Las sillas de ruedas eléctricas han hecho una mejora significativa en las vidas de las personas discapacitadas debido a que les ha dado libertad para desarrollar sus actividades sin la dependencia de otras personas, sin embargo, con el paso del tiempo, este grupo de personas en su mayoría ha empezado a quejarse acerca de la limitación de algunas sillas de ruedas eléctricas (Abdeselem et al., 2021). Es bien conocido que las sillas de ruedas se han vuelto una importante vía de facilidad para las personas discapacitadas como son aquellas mayores de edad en la sociedad. Está comprobado que el uso de una silla de ruedas en términos de movilidad es más eficiente que caminar para este grupo de personas (Ahmad et al., 2011). El número de personas que usan sillas de ruedas eléctricas ha aumentado en las últimas décadas de acuerdo con el reporte mundial sobre la discapacidad; este equipo puede acompañar a una persona discapacitada tanto a corto como largo plazo (Maatoug et al., 2019).

1.3. Objetivo General

Diseñar un modelo analítico y orientado a objetos mediante la mecánica Lagrangiana para la planeación y control inteligente del movimiento de una silla de ruedas.

1.4. Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo analítico aplicando mecánica Lagrangiana para la determinación de la respuesta dinámica de una silla de ruedas.
- Diseñar un modelo orientado a objetos basado en la dinámica de Sistemas Multi cuerpos para el análisis dinámico de una silla de ruedas.
- Implementar un sistema de control aplicando Lógica Difusa para la planeación de una silla de ruedas.

CAPÍTULO 2

2. Revisión Literaria

2.1. El uso de una silla de ruedas como medio de transporte

Básicamente una silla de ruedas puede ser considerada como un cuerpo rígido en donde su asiento está permanentemente adherido a su marco, el cual previene cualquier ajuste en el cambio de su posición (Temich & Grzechca, 2016). La importancia de este dispositivo es ayudar a la comunidad correspondiente a la tercera edad y discapacitada para poder desplazarse de un lugar a otro con el fin de desarrollar sus actividades rutinarias en el día a día con la intención de que el porcentaje de independencia con terceros sea el mayor. Las consideraciones físicas el uso de este dispositivo corresponden a postura, fuerza, sensación, agudeza visual, percepción y eficiencia en su manejo (Chatterjee & Roy, 2021b).

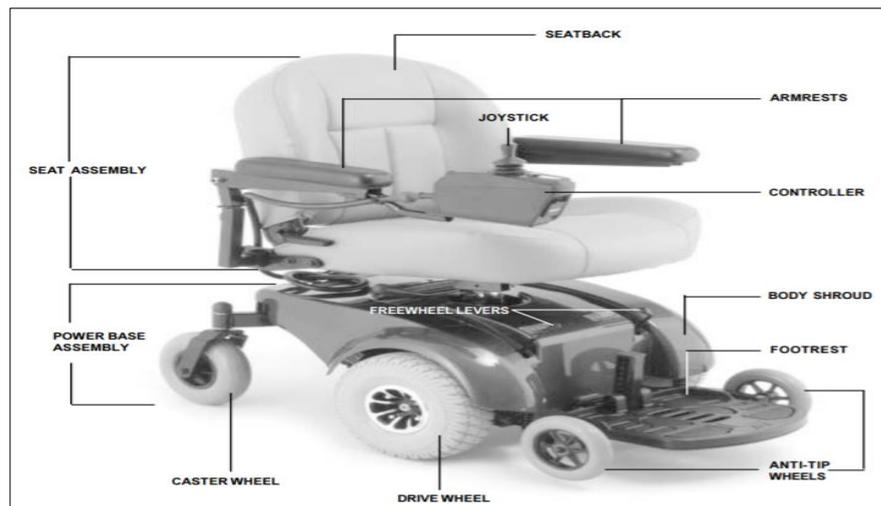


Figura 2.1. Silla de ruedas eléctrica

Fuente: Jazzy Jet 3 Owner's Manual

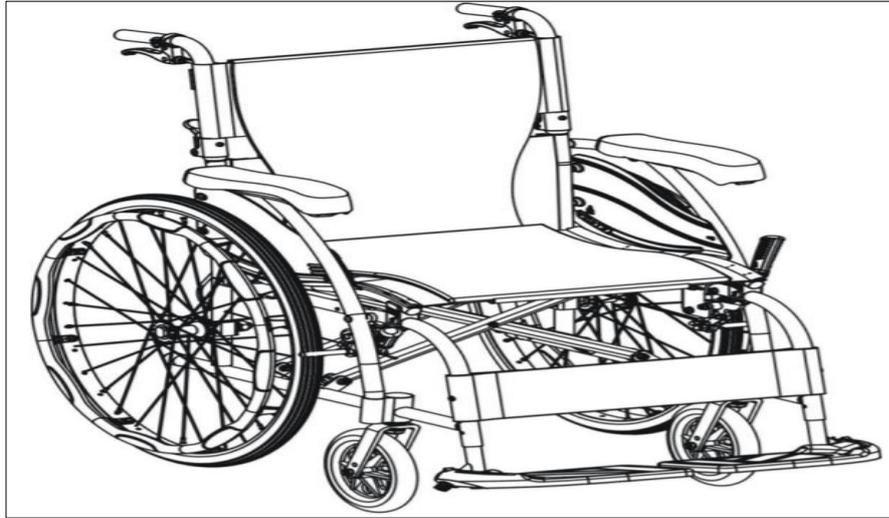


Figura 2.2. Silla de ruedas manual

Fuente: S – Ergo 100 Series Owner's Manual

En la actualidad las sillas de ruedas son utilizadas ampliamente de forma manual, lo que significa, que este grupo de personas no desea ocasionar contra tiempos o interrumpir a terceros para desarrollar sus labores (Madona et al., 2020). De igual forma, las sillas de ruedas manuales las cuales consisten en un mecanismo simple son utilizadas por grupos de personas discapacitadas que tienen gran movilidad en sus brazos y además son económicamente accesibles. Por otro lado, las sillas de ruedas motorizadas han sido desarrolladas para ayudar aquellos usuarios que necesitan desplazarse de un lugar a otro por medio de una fuente eléctrica (Choi et al., 2019). Aun así, existen sillas de ruedas eléctricas cuya fuente de energía es tomada de baterías Li-ion las cuales cada vez más son livianas y eficientes. Actualmente, fuentes de energía solar y celdas de combustible han tenido un gran interés por investigadores debido a su bajo peso e hibridación que permite recargarlas en menor tiempo (Morgado Ramirez et al., 2019).

Hoy en día, las vidas de las personas cada vez más están involucradas con ciencia e innovación y con el desarrollo de la sociedad en el que los sistemas para el cuidado de la salud juegan un papel importante en sus vidas. La prolongación de vida en aquellas personas con enfermedades serias y agudas en crecimiento es un reto para el desarrollo de sistemas de cuidado para la salud en el mundo. Con la evolución de medios sensoriales, objetos y tecnológicos, la 'salud inteligente' está obteniendo considerable atención para la comunidad en el área de salud en general. Es así como se han desarrollado interfaces que están enfocadas directamente con la asistencia al usuario al momento de usar una silla de ruedas. Por ejemplo, sistemas de control vinculados con el cerebro se han vuelto de gran atracción a los investigadores debido a su conveniencia, bajo costo y fácil configuración (Abiyev et al., 2016). En la siguiente tabla se muestran algunos métodos de reconocimiento con el cuerpo humano para el uso de una silla de ruedas como medio de transporte, los cuales brindan confort al usuario, sin embargo, tienen sus desventajas (Ghorbel et al., 2019):

Tabla 1.
Desventajas de algunos métodos de reconocimiento entre el usuario y la silla de ruedas eléctrica.

Interfaz Hombre – Silla de ruedas eléctrica	Desventajas
Interfaz Cebro - Computadora	Baja señal de razón de ruido, limitada frecuencia, tratamiento de señales complejas asociadas al cerebro, razón de errores entre el 30% y 40%.
SnP (Soplo y Sorbo)	La actividad de inhalar y exhalar es agotadora, los tubos utilizados para este método tienen que ser limpiados constantemente.
Reconocimiento por voz	Ruido provoca errores de reconocimiento por voz, sistema lento y agotador.
Movimientos de Lengua	Falta de estabilización del equipo con la cabeza, falta de confort.
Movimientos de Cabeza	Posibles accidentes cuando el usuario mueve su cabeza por intuición al mirar a su alrededor.
Rastreo por Mirada	Daño en los ojos debido al uso de Led InfraRojos.

Fuente: Ghorbel et al., 2019

2.2. Seguridad y limitantes en las sillas de ruedas eléctricas

La seguridad de estos dispositivos es un factor muy importante, debido a que es conocido como el más popular en ayudar a personas para moverse con mayor facilidad respecto a otros, en el cual, la presencia de obstáculos es básicamente su principal característica para solucionar, reduciendo la complejidad en la navegación en donde las sillas de ruedas eléctricas tradicionales son comúnmente controladas por medio de un joystick (Baklouti et al., 2017). Algunas investigaciones en el campo de la robótica con aplicaciones en sillas de ruedas eléctricas están asociadas con personas que tienen enfermedades degenerativas en el corazón, por ende, en dichos casos, las sillas de ruedas manuales deben evitarse (Feng et al., 2021). Existen sillas de ruedas eléctricas automatizadas que pueden ser guiadas por un sistema de implementación por voz el cual facilita las condiciones de confort en el que deseen realizar sus actividades (Yunior & Kusriani, 2018). Otro aspecto importante en el que se han diseñado sistemas de control para evadir obstáculos es el de huecos o rampas. La mayoría de las investigaciones acerca de seguridad en rampas y huecos solamente son consideradas cuando la silla de ruedas está en un entorno que tiene superficies con distintos grados de inclinación (Wu et al., 2018).

2.3. Uso de la mecánica lagrangiana y dinámica de sistemas multicuerpo en sistemas mecánicos

Desarrollar soluciones eficientes para mejorar la planeación en el uso de una silla de ruedas, es teniendo en cuenta su modelo dinámico. Un enfoque alternativo a las ecuaciones de movimiento derivadas por métodos newtonianos es la mecánica lagrangiana. Debido a que las aplicaciones por medio de las leyes de Newton conllevan al uso de fuerzas dinámicas, resolver sus ecuaciones de movimiento se vuelven extremadamente difíciles por lo que, el enfoque lagrangiano es más accesible a resolver estos problemas mecánicos. Además de evitar grandes dificultades en integrar dichos sistemas, por medio de las ecuaciones de Lagrange se pueden obtener ecuaciones de movimiento de forma estándar.

Este enfoque conlleva al uso de coordenadas generalizadas, es decir, variables independientes que generalizan la posición de un sistema mecánico. Por otro lado, estos sistemas están bajo restricciones las cuales caracterizan su comportamiento y se clasifican en holonómicas y no holonómicas. Las restricciones holonómicas dependen esencialmente de la posición del sistema mientras que las restricciones no holonómicas están expresadas en términos de razones de cambio con respecto al tiempo y no pueden ser integradas, caso contrario se tendría una restricción holonómica. Teniendo en cuenta estas definiciones y utilizando el principio de D'Alembert en conjunto con el trabajo virtual, a partir de la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^N (\vec{F}_i - \dot{\vec{p}}_i) \cdot \delta \vec{r}_i = 0 \quad (\text{Ecuación 1})$$

La cual toma en cuenta las fuerzas aplicadas \vec{F}_i , la razón de cambio del momento lineal $\dot{\vec{p}}_i$ en un desplazamiento virtual $\delta \vec{r}_i$ actuando sobre una partícula, se puede llegar a la expresión final que caracteriza el enfoque Lagrangiano:

$$L = T - V \quad (\text{Ecuación 2})$$

En donde L es el Lagrangiano, T es la energía cinética y V es la energía potencial del sistema mecánico.

Los sistemas rígidos se caracterizan por una serie de cuerpos, los cuales, por el hecho de tener masa, tienen inercia y su tendencia de rotación debido a un ente externo se puede modelar por medio de la dinámica de sistemas multi cuerpo, en el que sus conexiones se definen por el tipo de junta presente. Las posiciones de cada cuerpo rígido están caracterizadas por tener un marco de referencia en el que su siguiente posición está determinada por una matriz de rotación.

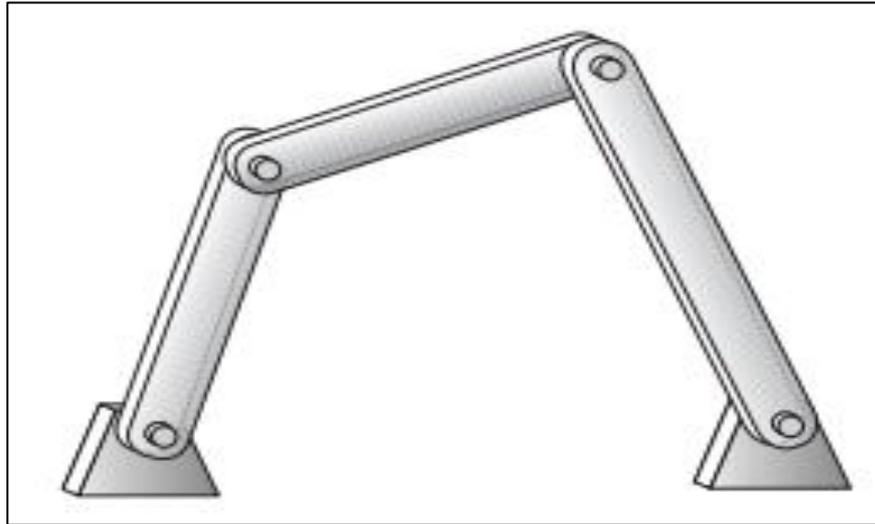


Figura 2.3. Mecanismo Cerrado

Fuente: Robert L. Norton, Diseño de Maquinaria

De forma general, la aplicación de la mecánica lagrangiana en sistemas de cuerpos rígidos se puede expresar mediante la forma:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde T , Q_i , q_i , \dot{q}_i representan, energía cinética, fuerzas generalizadas, coordenadas generalizadas y la razón de cambio con respecto al tiempo de dichas coordenadas generalizadas, respectivamente.

En la actualidad, en el Ecuador no se ha evidenciado investigaciones en modelos dinámicos sobre sillas de ruedas eléctricas ni manuales ya que la función de los organismos públicos hacia las personas con discapacidades físicas es proveer los dispositivos para su uso, con el fin de reducir su dependencia de terceros, mas no, realizar mejoras significativas en ellos.

2.4. Plataformas de programación vigentes para simular respuestas dinámicas.

Actualmente, existe una variedad de programas que sirven para simular el movimiento de diferentes sistemas mecánicos con el fin de idealizar diferentes escenarios en la vida real. Por lo general, una comparativa entre estas simulaciones y pruebas experimentales ayudan a estimar la eficiencia de las implementaciones de nuevos sistemas acoplados a los que se tiene en primera instancia. Proponer nuevas alternativas para mejorar la respuesta de diferentes sistemas mecánicos mediante plataformas de programación es el objetivo de muchas investigaciones con el fin de brindar nuevas soluciones innovadoras hacia un mejor estilo de vida. Para el caso de

la ingeniería mecánica, MSC Adams, Matlab, V-REP, Gazebo entre otros, son alternativas para simular respuestas dinámicas de distintos sistemas mecánicos. Para el caso de este trabajo de investigación, se utilizó la plataforma de programación Matlab con una extensión llamada Simscape para analizar la comparativa con pruebas experimentales realizadas en una silla de ruedas eléctrica. Matlab a diferencia de otras plataformas de programación para simular sistemas mecánicos, tiene la ventaja de contar con distintos paquetes que se pueden conectar a dispositivos como tarjetas de microcontroladores, lo cual permite además de simular respuestas de sistemas mecánicos e implementar físicamente sistemas de control con el fin de mejorar la eficiencia en la respuesta.

2.5. Aplicaciones de lógica difusa en sillas de ruedas eléctricas en el Ecuador.

En los inicios de la era industrial cuando se estaba implementando por primera vez distintos sistemas de control, uno de los controladores claves que se utilizaban era el proporcional – integral – derivativo. Durante este siglo diferentes métodos de control han sido propuestos para superar las limitaciones del controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo) (Zhang et al., 2019). Uno de los controladores más comunes para aplicaciones de sillas de ruedas eléctricas es el regular cuadrático lineal (Razali et al., 2019). Así mismo existe el óptimo control proporcional integral y control no lineal. Además, varios investigadores han propuesto el uso de lógica difusa, algoritmos genéticos, redes neuronales pero no han sido desarrollados en un nivel extenso (Ahmad et al., 2012). A medida que los métodos convencionales han sido superados por métodos de control novedosos, la lógica difusa gobierna y representa un papel sumamente importante en este tipo de aplicaciones. Es un método robusto de alta confianza, el cual supera incertidumbres en distintos entornos de análisis. Requiere una baja complejidad computacional comparada con otros esquemas (Rojas et al., 2018). La particularidad y una de las características más sobresalientes en la lógica difusa es la habilidad que tiene este método para tratar situaciones imprecisas y una gran variedad de sistemas complejos sin soluciones exactas (Lee et al., 2017).

Como realidad nacional, en el Ecuador no se han evidenciado aplicaciones de lógica difusa en sillas de ruedas eléctricas, sin embargo, el consejo nacional para la igualdad de discapacidades fomenta la utilización de estos dispositivos y provee los medios para su adquisición, además de regular las condiciones para su uso tanto en espacios abiertos como cerrados. Toda persona que cuente con un grado de discapacidad física puede aplicar por medio de esta entidad para la obtención de una silla de ruedas manual más no una silla de ruedas eléctrica ya que actualmente el país no ha presentado un plan estratégico para la facilitación de este dispositivo.

CAPÍTULO 3

3. Metodología

La planeación de una silla de ruedas consiste en el camino que recorre según los requerimientos del usuario con el fin de cumplir sus rutinas diarias. Los fundamentos y principios que demuestran el comportamiento de una silla de ruedas eléctrica se componen de sus ecuaciones gobernantes y poder controlar el movimiento de dicho dispositivo mediante la metodología de la lógica borrosa es de carácter innovador y es uno de los objetivos de este trabajo. El desarrollo de este trabajo parte de un modelo general para poder obtener la respuesta dinámica de una silla de ruedas eléctrica en el que se considera la masa total del dispositivo, el cual se compone de sus accesorios principales como son el chasis y las llantas que están controladas por rotores independientes acoplados a cada una. Una vez obtenida la respuesta dinámica de la silla de ruedas mediante el uso de la mecánica lagrangiana se procedió a modelar la silla de ruedas eléctrica mediante el uso de la dinámica de sistemas multi cuerpo en donde cada elemento o accesorio que compone a la silla de ruedas eléctrica se puede modelar por juntas, y sus posiciones se encuentran determinadas por marcos de referencia y matrices de rotación. Finalmente, se procedió con el desarrollo e implementación del control borroso en la silla de ruedas eléctrica. Los detalles de los fundamentos matemáticos aplicados con sus ecuaciones, programas y materiales utilizados que sirvieron para la realización de este trabajo, se muestran a continuación.

3.1. Modelo dinámico de una silla de ruedas eléctrica mediante enfoque lagrangiano.

El modelo dinámico de una silla de ruedas eléctrica mediante el enfoque por mecánica lagrangiana permite obtener la respuesta dinámica del dispositivo por medio de expresiones cinemáticas que involucra la energía cinética de la silla de ruedas y la energía potencial que en este caso es constante. Los grados de libertad del sistema multi - cuerpo son determinados por medio de las restricciones holonómicas que intervienen en el esquema dinámico, sin embargo, para análisis de una silla de ruedas eléctrica también se involucran restricciones no holonómicas debido a las condiciones de rotación de las ruedas. Es así, que se obtienen en primer lugar, coordenadas generalizadas de la forma:

$$\vec{q} = [x \ y \ \theta \ \phi_1 \ \phi_2]^T \quad (\text{Ecuación 4})$$

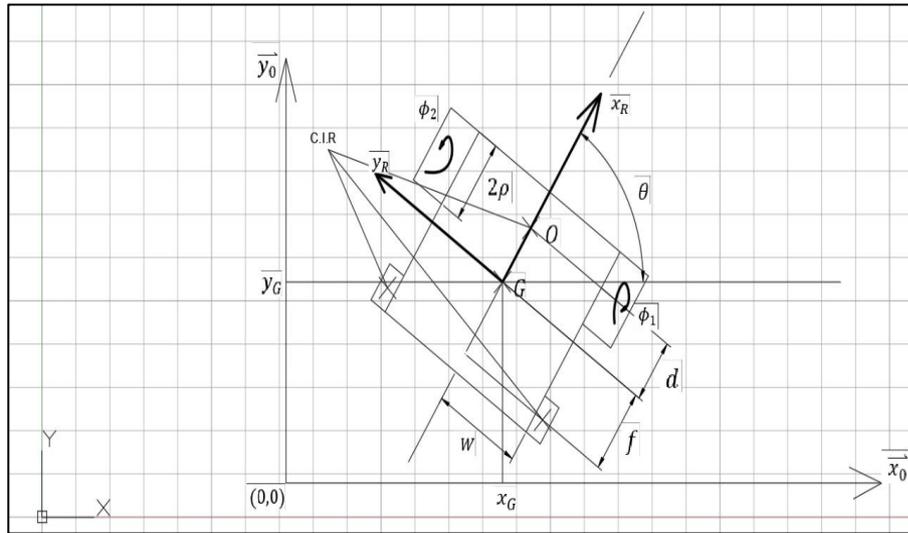


Figura 3.1. Coordenadas generalizadas involucradas en el análisis dinámico de la silla de ruedas eléctrica

Fuente: Autor

En donde $x, y, \theta, \phi_1, \phi_2$ representan la posición en dicha dirección, la posición perpendicular a la dirección anterior, posición angular, posición angular de la rueda derecha y posición angular de la rueda izquierda, respectivamente.

Aplicando las ecuaciones Euler – Lagrange con sus multiplicadores correspondientes debido a las restricciones no holonómicas que corresponden a las condiciones de no deslizamiento, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\vec{q}}} \right] - \frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial \vec{q}} - C(\vec{q})^T \vec{\lambda} = \vec{T} = [0 \ 0 \ 0 \ \tau_1 \ \tau_2]^T \quad (\text{Ecuación 5})$$

En donde, τ_1 y τ_2 son los torques que se deben aplicar a las llantas delanteras al accionar el joystick de la silla de ruedas eléctrica el cual regula su movimiento. Reemplazando los términos correspondientes en la ecuación 2, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} m_T \dot{x} - m_B d \dot{\theta} \sin \theta \\ m_T \dot{y} + m_B d \dot{\theta} \cos \theta \\ I_T \dot{\theta} + m_B d (\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta) \\ I_{yy}^b \dot{\phi}_1 \\ I_{yy}^b \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} + m_B d \dot{\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{y} \sin \theta + \dot{x} \cos \theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \rho/2 & 0 & \rho/2W \\ -\rho/2 & 0 & \rho/2W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Este sistema de ecuaciones al ser derivado convierte las primeras derivadas en sus segundas derivadas, es decir, un campo de clase C^2 , funciones continuas y derivables. La nomenclatura de todos los símbolos utilizados se puede apreciar en la tabla 2. Con dichas restricciones, dicho sistema se puede expresar como:

$$M(\vec{q})\ddot{\vec{q}} + B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) - C^T(\vec{q})\vec{\lambda} = \vec{T} \quad (\text{Ecuación 7})$$

En donde,

$$M(\vec{q}) = \begin{bmatrix} m_T & 0 & -m_B d \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & m_T & m_B d \cos\theta & 0 & 0 \\ -m_B d \sin\theta & m_B d \cos\theta & I_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{yy}^b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy}^b \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) = -m_B d \dot{\theta}^2 \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$C(\vec{q}) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & -\frac{\rho}{2} & -\frac{\rho}{2} \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\rho}{2W} & \frac{\rho}{2W} \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Este sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden conlleva a encontrar ocho incógnitas, estas son $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\theta}, \ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Una de las formas para encontrar $\ddot{\vec{q}}$ es despejando del sistema de ecuaciones diferenciales mostrado anteriormente:

$$\ddot{\vec{q}} = M^{-1}(\vec{q})[\vec{T} - B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + C(\vec{q})^T \vec{\lambda}] \quad (\text{Ecuación 11})$$

Por lo tanto, la expresión para determinar los $\vec{\lambda}$ queda:

$$\vec{\lambda} = -[C(\vec{q})M^{-1}(\vec{q})C^T(\vec{q})]^{-1}[C(\vec{q})M^{-1}(\vec{q})(\vec{T} - B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \dot{C}(\vec{q})\dot{\vec{q}})] \quad (\text{Ecuación 12})$$

3.2. Modelo dinámica de una silla de ruedas eléctrica por enfoque de la dinámica de sistemas multicuerpo.

Con respecto a la silla de ruedas eléctrica analizada en este trabajo la cual es una Jazzy Jet 3, los tipos de juntas considerados fueron de revoluta. Por medio del Software Inventor, se pudo modelar cada cuerpo rígido y a su vez especificar el tipo de material del que está hecho de tal forma que su masa e inercia queden

completamente definidas. Las consideraciones físicas que se tomaron en cuenta para el diseño de cada cuerpo rígido fueron su geometría y material de fabricación. Aquellas conexiones en las que se tenían de por medio pernos y tuercas, se las pudo modelar como juntas tipo revoluta. La silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo se compone principalmente de dos baterías litio ion de 12 voltios cada una, dos servo motores independientes acoplados a cada rueda, un control para regular la rapidez con la que la silla de ruedas eléctrica puede moverse, dos ruedas delanteras acopladas a los servo motores, dos ruedas traseras seguidoras las cuales puede rotar libremente, un asiento para el usuario y una plataforma de metal ubicada en la parte inferior delantera de la silla de ruedas para los pies del usuario.



Figura 3.2. Silla de ruedas eléctrica utilizada.

Fuente: Jazzy Jet Owner's Manual.

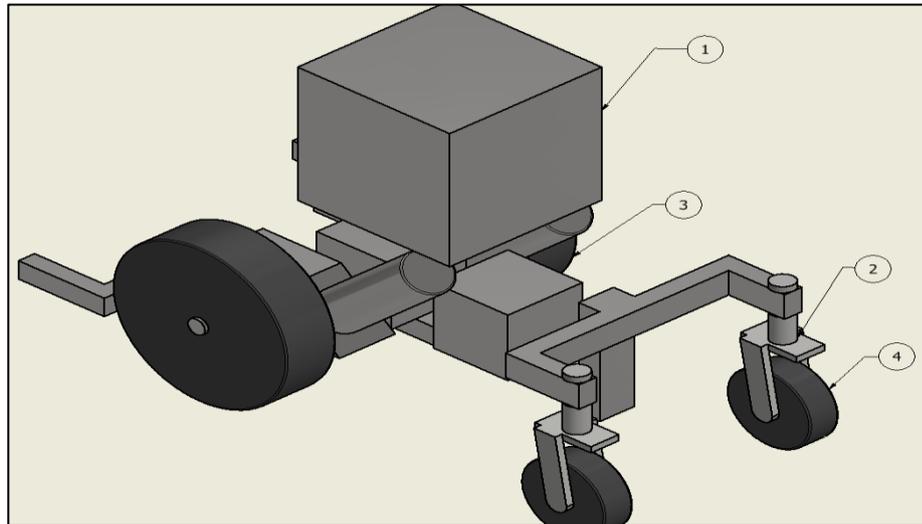


Figura 3.3. Diseño y modelo final de la silla de ruedas eléctrica Jazzy Jet.
Fuente: Autor

Tabla 2.
Nombre de cada cuerpo rígido y designación de materiales usados.

Cantidad	Componente	Nombre	Material
1	1	Chasis	Acero Inoxidable AISI 304
2	2	Junta Trasera	Acero Inoxidable AISI 304
2	3	Llanta Delantera	Espuma de Poliuretano
2	4	Llanta Trasera	Espuma de Poliuretano

Fuente: Autor

Tabla 3.
Propiedades físicas del sistema de cuerpos rígidos que comprenden a la silla de ruedas eléctrica modelada.

Cantidad	Cuerpo Rígido	Material	Masa (kg)	Momentos Principales de Inercia		
				(kg – mm ²)		
				I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
1	Chasis	Acero	140.37	10956813245	2269937.29	11782112.85
2	Llanta Delantera	Espuma de Poliuretano	0.094	480.514	480.514	736.281
2	Llanta Trasera	Espuma de Poliuretano	0.011	12.968	12.968	19.537
2	Conexión Chasis – Llanta Delantera	Acero Inoxidable	0.136	1012.575	1012.575	17.671
2	Conexión Junta Trasera – Llanta Trasera	Acero Inoxidable	0.136	231.083	231.083	5.628
2	Junta Trasera	Acero Inoxidable	1.22	3834.68	639.31	140.37

Fuente: Autor

Luego de tener definidas las propiedades físicas de los cuerpos rígidos que comprenden a la silla de ruedas eléctrica, se establecieron los tipos de juntas que existen entre cada cuerpo rígido con el fin de simular su movimiento para obtener el tiempo de respuesta.

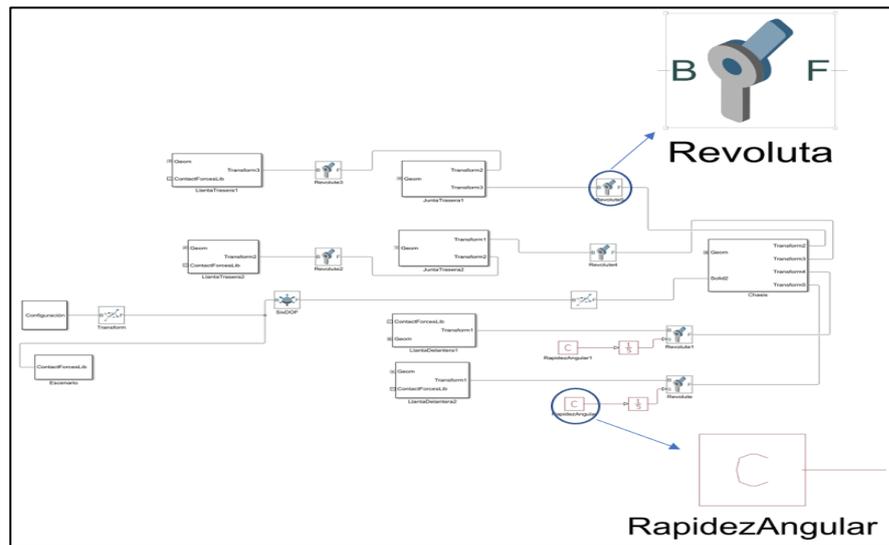


Figura 3.4. Modelamiento del tipo de juntas existente entre el sistema de cuerpos rígidos comprendidos en la silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Autor

De acuerdo con la figura 7, se puede observar el tipo de junta establecido para simular el tiempo de respuesta de la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo. Las juntas del tipo revoluta proporcionan un movimiento rotatorio del cuerpo rígido acoplado con respecto a una base el cual está sin movimiento. Para que se produzca tal respuesta, el sistema de referencia del cuerpo rígido base debe coincidir con el sistema de referencia del cuerpo rígido que puede rotar definido como seguidor. Para que la silla de ruedas eléctrica produzca el movimiento deseado, se debe aplicar la rapidez angular requerida a cada rueda. Para ello, se tomó el tiempo de giro de cada rueda para estimar la rapidez angular:



Figura 3.5. Ubicación de silla de ruedas eléctrica para estimar su rapidez angular.

Fuente: Autor

Con dicho valor se puede obtener una estimación de la rapidez angular de cada rueda mediante:

$$\omega_{rueda} = \frac{2\pi}{t} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (\text{Ecuación 13})$$

Así mismo para estimar la aceleración angular, se tomó el tiempo en el que tarda las llantas de la silla de ruedas en alcanzar la rapidez angular de operación desde el reposo por medio de la relación:

$$\alpha_{rueda} = \frac{\Delta\omega_{rueda}}{\Delta t} \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad (\text{Ecuación 14})$$

Para estimar el tiempo de recorrido de la silla de ruedas eléctrica, se procedió a medir la longitud del lugar de trabajo. El objetivo el cual la silla de ruedas eléctrica tiene que evitar para esta prueba experimental es una silla de escritorio la cual está en reposo y ubicada a 2,90 m de la silla de ruedas eléctrica. Una vez tomada las medidas del principal de trabajo, se lo rincipi en el programa CAD Inventor para simular el movimiento de la silla de ruedas eléctrica tomando en consideración el tipo de material en el que las ruedas hacen contacto con el piso. Para este caso, el escenario de trabajo pertenece a una casa residencial de cuatro pisos de alto, el cual cuenta con escalones y pasillos. El piso esta conformado por baldosas de cerámica no pulida las cuales cuentan con un coeficiente de fricción estática o rugosidad de 0,4 (Demarch et al., 2021). Para poder simular el tipo de contacto que existe entre las ruedas y el piso, se debe establecer los parámetros que modelan la fricción entre los mismos. Estos parámetros rincip definidos por valores de amortiguamiento y rigidez. Se entiende por amortiguamiento a la capacidad de disipar energía entre ambos cuerpos y rigidez por

su tendencia de recuperar su estado inicial una vez que ha iniciado su movimiento. Los valores de amortiguamiento y rigidez según (Li et al., 2017) respectivamente se los puede determinar mediante las siguientes expresiones:

$$c_b = \frac{2m_2 \ln(e)}{(1+\mu)T_c} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$k_b = \frac{m_2}{(1+\mu)T_c^2} (\pi^2 + (\ln(e))^2) \quad (\text{Ecuación 16})$$

En donde m_2, e, μ, T_c representan la masa de uno de los cuerpos en contacto, el coeficiente de restitución entre los cuerpos, la relación de masas entre ambos cuerpos y el tiempo de colisión entre ambos cuerpos, respectivamente.

Teniendo en consideración los parámetros que intervienen en el modelado de la fricción entre las llantas y el piso, el escenario de trabajo se lo representó mediante el siguiente cuerpo rígido:

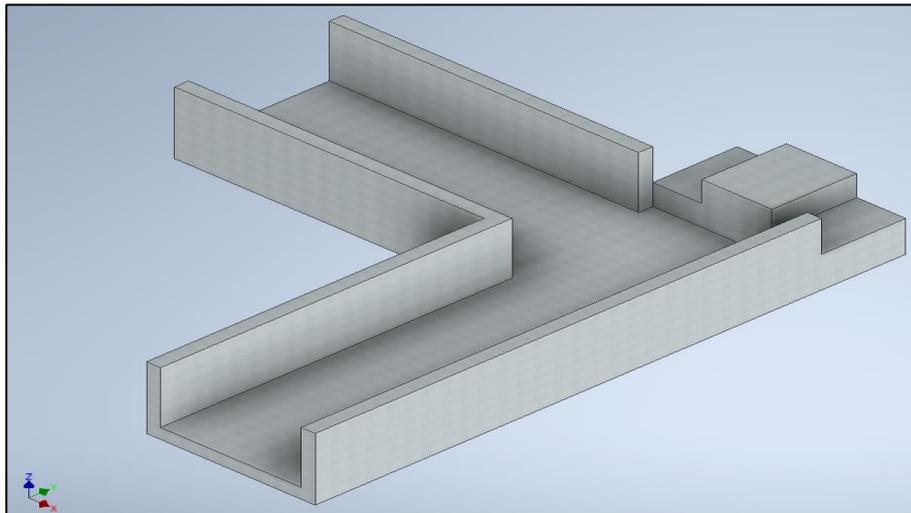


Figura 3.6. Diseño del escenario de trabajo, representado como cuerpo rígido.

Fuente: Autor

El cuerpo rígido diseñado en el programa CAD proporcionó las siguientes propiedades físicas utilizando como densidad un valor de $2 \frac{g}{cm^3}$ el cual corresponde a cerámica de porcelana no pulida:

Tabla 4.
Propiedades físicas del escenario de trabajo.

Masa (<i>kg</i>)	Material	Momentos principales de inercia		
		<i>kg – mm²</i>		
		<i>I_{xx}</i>	<i>I_{yy}</i>	<i>I_{zz}</i>
2994	Baldosa Cerámica pulida No	$4,72 \times 10^9$	$3,72 \times 10^9$	$8,06 \times 10^9$

Fuente: Autor

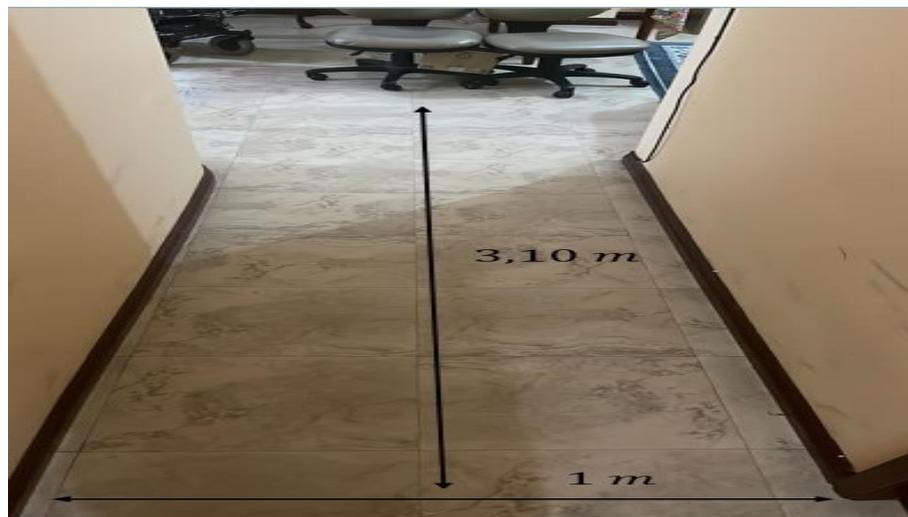


Figura 3.7. Distancia entre la silla de ruedas eléctrica y el objetivo deseado para evadir.

Fuente: Autor

3.3. Implementación de sistema de control utilizando Lógica Difusa para la planeación de una silla de ruedas eléctrica.

Una de las características principales de la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo es su control de velocidad el cual puede ser maniobrado por el usuario que utilice este dispositivo, sin embargo, si se encuentra con diferentes obstáculos según la tarea que realice, la persona tiene que evitarlos moviendo la palanca que está acoplada al control. En el presente trabajo, uno de los objetivos es implementar un sistema de control borroso que permita darle autonomía a la silla de ruedas, brindando comodidad al usuario y sobre todo seguridad. La Lógica Difusa es un método que puede resolver problemas cuya principal característica es la imprecisión. Esto se

refiere a información que puede tomar distintos niveles de validez o veracidad, por lo que, este método proporciona mecanismos lógicos que pueden representarlos.

Para este trabajo, se diseñó dos controladores borrosos con el fin de compararlos y analizar cual de ellos ahorra costos computacionales y cual tiene mejor respuesta a la evasión de obstáculos. Uno de los sistemas de inferencia que permite canalizar la información imprecisa que se tiene en un caso particular con aplicación de Lógica Borrosa es el de Mamdani. Este sistema de inferencia está caracterizado por dar grados de validez debido a la intuición de la persona que sepa del problema en cuestión. El objetivo es que una vez detectado un objeto delante de la silla de ruedas eléctrica, esta lo evada teniendo en consideración sus alrededores. Se tomó como referencia en que el obstáculo sea evadido a partir de 100 *cm*.

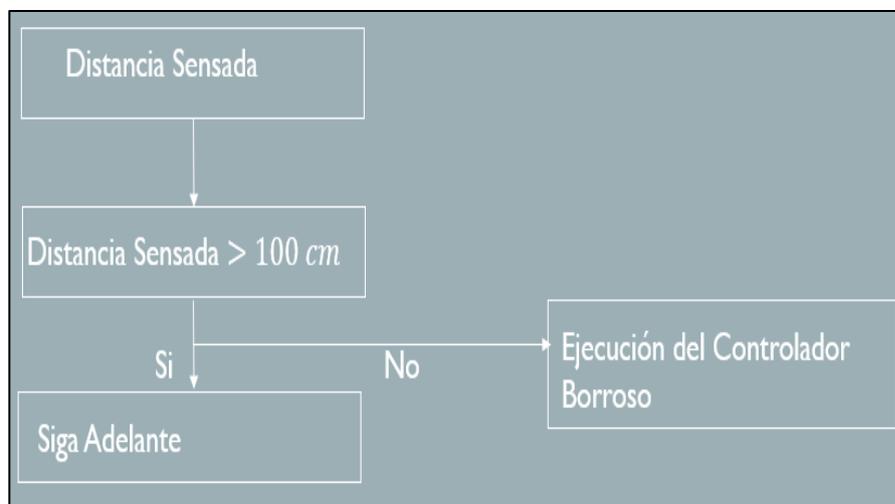


Figura 3.8. Algoritmo de control implementado en la silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Autor

Para el diseño del controlador borroso por el sistema de inferencia Mamdani, se definieron las variables de entrada y salida. Para la configuración de las variables de entrada, se tomó en consideración los lados laterales los cuales sensan las distancias y estiman la posición en la que está un objeto próximo. Estos lados fueron 'izquierdo', 'derecho', 'trasero' e 'inferior'. El lado inferior se refiere a la distancia sensada para evitar escalones, y los lados restantes se visualizan tomando como referencia que el lado frontal es la vista que tiene el usuario una vez que se sienta en la silla de ruedas eléctrica. Para la variable de salida, los giros que realiza la silla de ruedas eléctrica fueron definidos por la posición de la palanca que está acoplada al controlador de velocidad. Estos giros fueron nombrados como 'adelante', 'atrás', 'derecha', 'izquierda' y 'no hay movimiento'. Los giros 'adelante' se refiere al movimiento de la silla de ruedas con dirección a la vista del usuario una vez que se sienta, es decir, el 'lado frontal', 'atrás' se refiere al movimiento en la dirección del 'lado trasero', 'derecha' se refiere al movimiento en la dirección del 'lado derecho', 'izquierda' se refiere al

movimiento en la dirección del 'lado izquierdo' y 'no hay movimiento' se refiere a una posición neutral de la palanca la cual indica que la silla se mantiene en reposo.

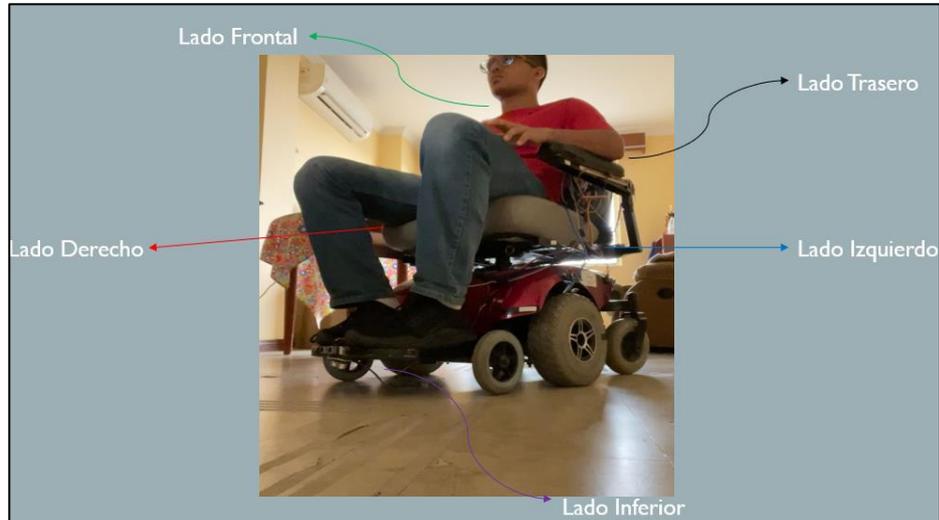


Figura 3.9. Lados establecidos en la silla de ruedas eléctrica para la implementación del controlador borroso.

Fuente: Autor

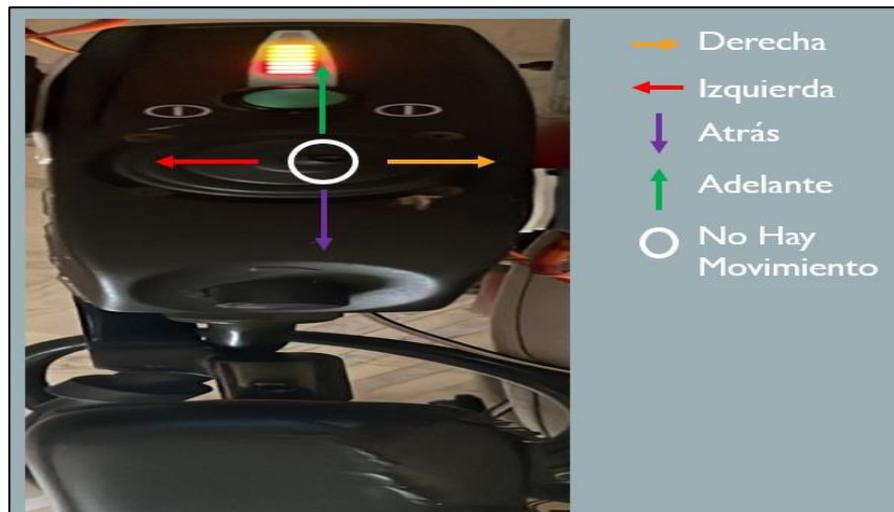


Figura 3.10. Variable de salida del controlador borroso la cual representa de los giros en la silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Autor

3.4. Diseño del controlador borroso 1.

Teniendo definidas las variables de entrada y salida del control borroso para implementarlo en la silla de ruedas, se procedió a establecer las órdenes que debe realizar con el fin de evadir obstáculos. Estas órdenes se definen por medio de reglas borrosas, las cuales están basadas en sentencias condicionales. Estas sentencias condicionales parten de grados de validez que cuentan con intervalos que forman funciones de pertenencia. Las funciones de pertenencia son reglas de correspondencia que convierten valores reales a valores de veracidad, es decir, grados de validez o conjuntos borrosos. Para el desarrollo del controlador borroso 1, se definieron los siguientes intervalos para la variable de entrada: $[0 - 50] \text{ cm}$, $[30 - 70] \text{ cm}$, $[50 - 100] \text{ cm}$ y para la variable de salida: $[0 - 6]^\circ$, $[50 - 130]^\circ$, $[140 - 220]^\circ$, $[230 - 310]^\circ$, $[320 - 400]^\circ$. Estos intervalos convertidos en conjuntos borrosos representan las funciones de pertenencia. Las funciones de pertenencia utilizadas en este trabajo fueron para las variables de entrada, trapezoidales y triangulares. Por otra parte, para la variable de salida se usaron funciones de pertenencia triangulares. Una vez establecidas las funciones de pertenencia, se procedió a definir las reglas borrosas que son todas las combinaciones posibles entre las funciones de pertenencia de las variables de entrada y salida.

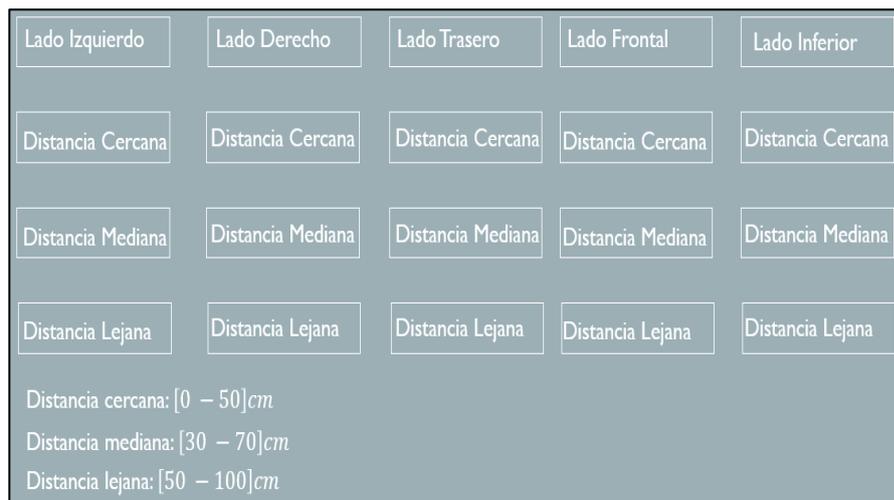


Figura 3.11. Representación de los intervalos de las funciones de pertenencia para la variable de entrada.

Fuente: Autor



Figura 3.12. Representación de los intervalos de las funciones de pertenencia para la variable de salida.

Fuente: Autor

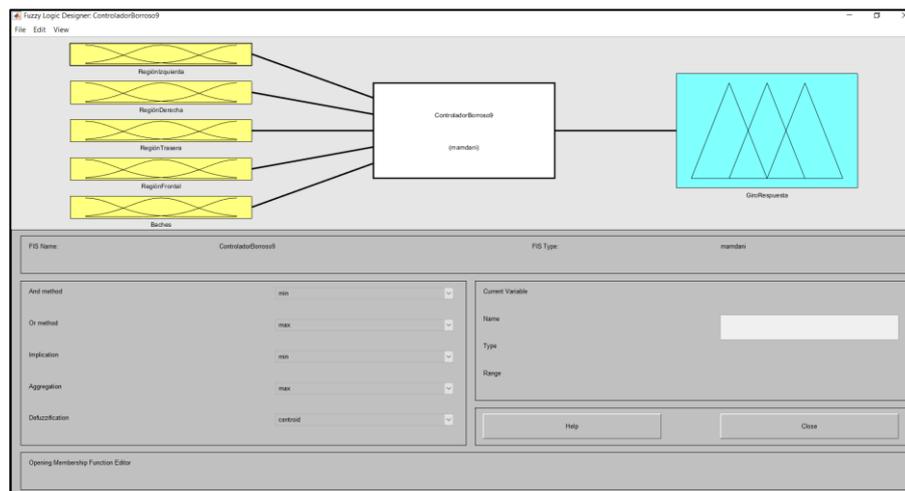


Figura 3.13. Diseño del controlador borroso 1.

Fuente: Autor

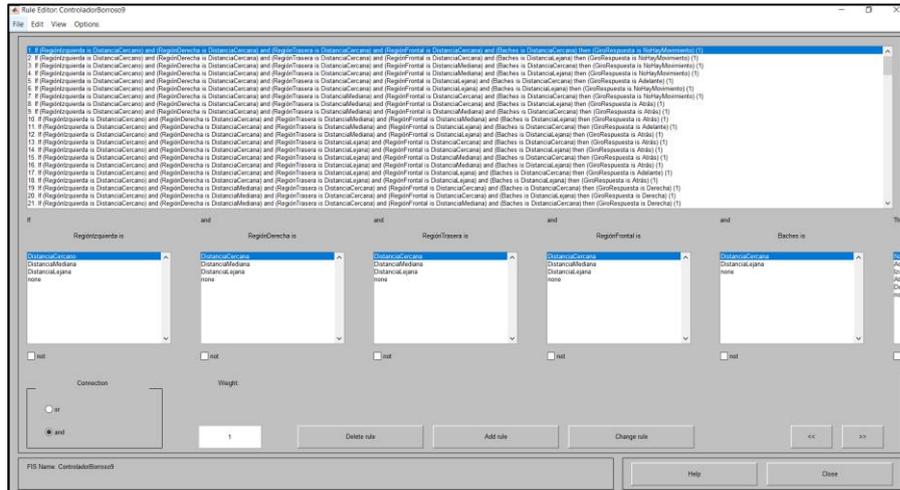


Figura 3.14. Configuración de reglas borrosas para el controlador 1.

Fuente: Autor

3.5. Diseño del controlador borroso 2.

A diferencia del controlador borroso 1, las funciones de pertenencia escogidas para este controlador en la variable de entrada fueron funciones trapezoidales debido a que solamente se establecieron dos intervalos: $[0 - 60]cm$, $[50 - 100]cm$. Para la variable de salida al igual que el controlador borroso 1, se definieron las mismas funciones de pertenencia, pero diferentes intervalos: $[0 - 6]^\circ$, $[40 - 140]^\circ$, $[130 - 230]^\circ$, $[220 - 320]^\circ$, $[310 - 410]^\circ$.

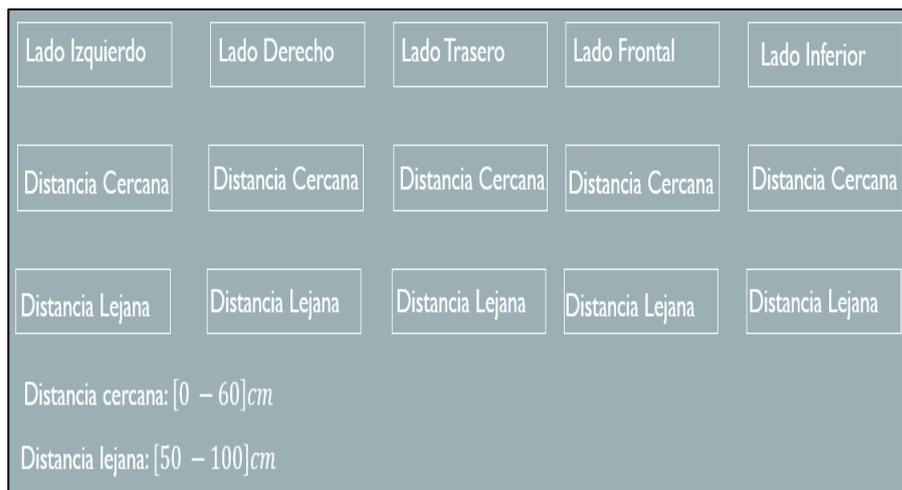


Figura 3.15. Representación de los intervalos de las funciones de pertenencia para la variable de entrada.

Fuente: Autor

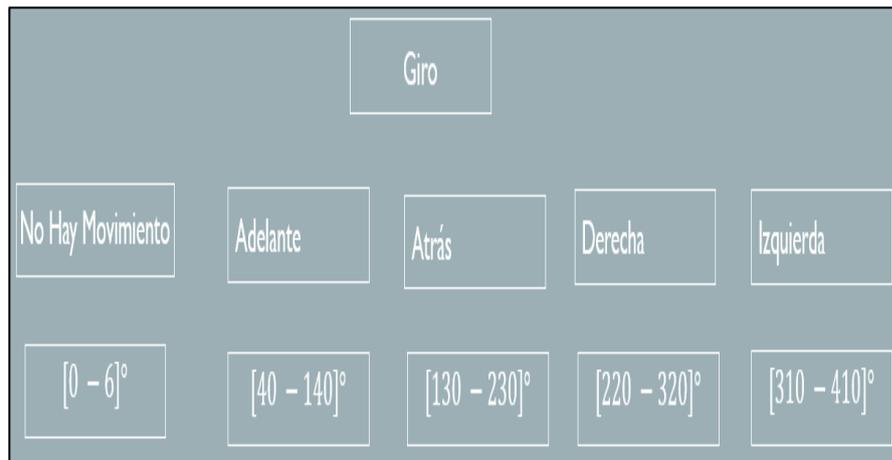


Figura 3.16. Representación de los intervalos de las funciones de pertenencia para la variable de salida.

Fuente: Autor

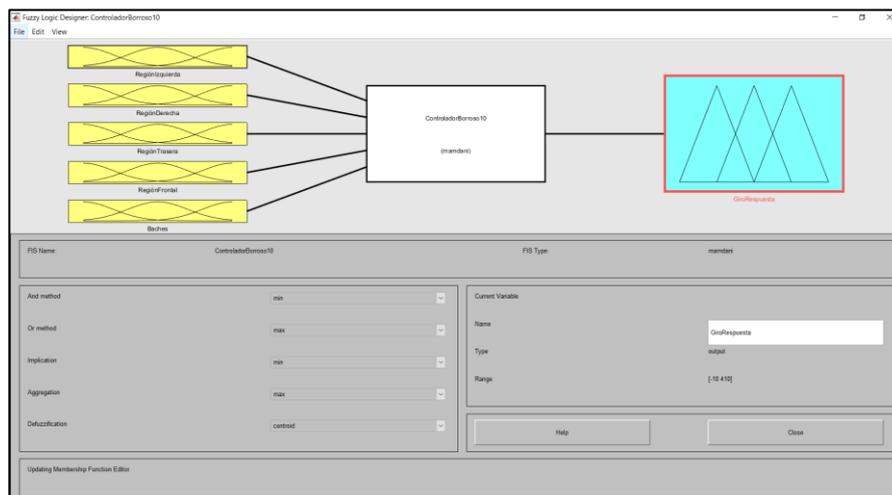


Figura 3.17. Diseño del controlador borroso 2.

Fuente: Autor

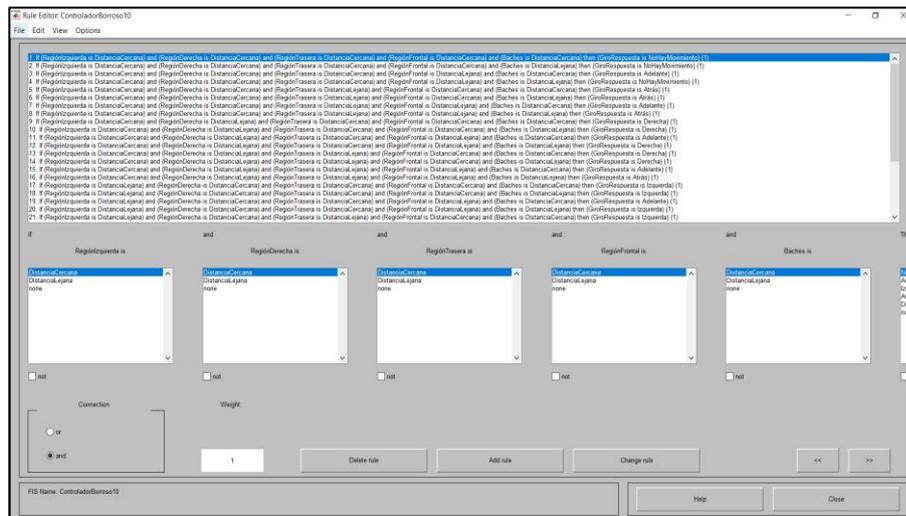


Figura 3.18. Configuración de reglas borrosas para el controlador 2.

Fuente: Autor

3.6. Implementación del controlador borroso en la silla de ruedas eléctrica.

Para poder vincular y ejecutar los controladores borrosos diseñados en la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo, se utilizó una tarjeta de microcontroladores Arduino Mega 2560, ya que esta tiene fácil accesibilidad en el mercado y su costo es bajo. Por otra parte, a diferencia de las demás tarjetas de Arduino, cuenta con 51 puertos de conexión digital que sirvieron para sensar las distancias de los lados mencionados en la silla de ruedas eléctrica, sin embargo, la cantidad de puertos digitales no es la misma que los de voltaje y neutro. Para tener aproximadamente la misma cantidad de puertos digitales, se utilizó una placa que se puede adaptar a la tarjeta Arduino la extiende el número de puertos de voltaje y neutro. En el capítulo 2, se mencionó que la plataforma de programación utilizada en este trabajo fue Matlab, por lo que, fue necesaria la intervención de la paquetería de Arduino vinculada a Matlab. Una vez establecida la conexión serial entre Arduino y Matlab, la interfaz de Simulink sirvió como medio para conectar sensores ultrasónicos los cuales detectan las distancias que se tiene a los lados de la silla de ruedas eléctrica. Estos sensores ultrasónicos fueron del modelo HC – SR04. A diferencia de otros sensores ultrasónicos, cuentan con un bajo costo y gran accesibilidad en el mercado. El funcionamiento de estos sensores es por medio de ondas de sonido utilizando el valor de la rapidez del sonido dependiendo de la humedad, temperatura y presión atmosférica. Estos sensores envían una onda a distinta frecuencia de la que el ser humano puede oír y una vez que esta onda rebota con un objeto próximo se detecta la distancia a la que se encuentra por medio de rapidez del sonido y el tiempo de recorrido. Estos sensores cuentan con cuatro pines digitales: VCC, GND, TRIG y ECHO. Los pines VCC y GND suministran el voltaje de operación del sensor. Este voltaje de operación es de 5 V y la tarjeta Arduino Mega 2560 mencionada es quien funciona como la fuente. El pin TRIG es quien envía una onda a una frecuencia de

40 kHz durante 10 μ s. Una vez enviada la onda de sonido a tal frecuencia, el pin ECHO es el responsable en tomar la distancia recorrida por la onda hasta que impacta al sensor nuevamente. Para realizar la conexión de los sensores ultrasónicos, se utilizó cables de conexión de 40 cm de largo los cuales van conectados a la tarjeta Arduino. Una vez conectados los sensores a la tarjeta Arduino, se procedió a establecer su conexión con la interfaz de Simulink para vincular los controladores borrosos diseñados. Para este trabajo, se utilizaron ocho sensores ultrasónicos en el que un par de sensores se los ubicó en los lados derecho, izquierdo y trasero, mientras que un sensor se lo ubicó en el lado frontal y un sensor se lo ubicó en la parte inferior con el fin de detectar y evadir escalones.

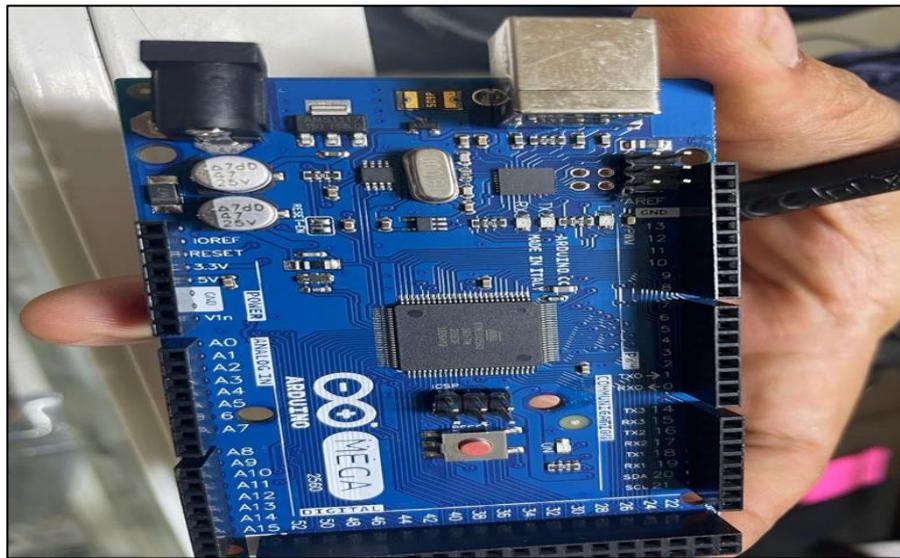


Figura 3.19. Tarjeta Arduino Mega 2560 utilizada para la implementación del sistema de control borroso.

Fuente: Autor



Figura 3.20. Tarjeta externa para extender el número de puertos de voltaje y neutro de la tarjeta Arduino Mega 2560.

Fuente: Autor



Figura 3.21. Cables de conexión de 40 cm de largo para conectar los sensores ultrasónicos con la tarjeta Arduino Mega 2560.

Fuente: Autor

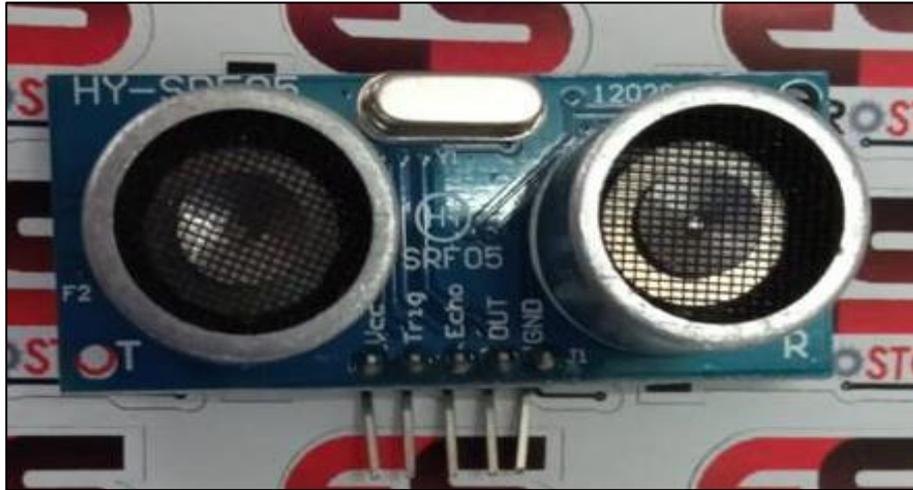


Figura 3.22. Sensor ultras3nico utilizado para sensar las distancias de lados definidos en el controlador borroso.

Fuente: Autor

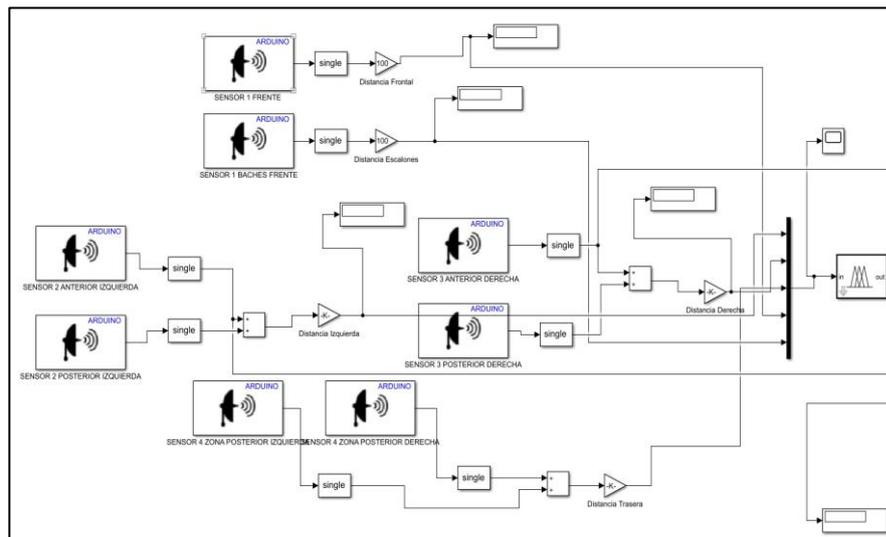


Figura 3.23. Configuraci3n del control borroso en la plataforma Simulink.

Fuente: Autor



Figura 3.24. Acoplamiento de sensores ultrasónicos en la silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Autor

Para que la silla de ruedas eléctrica pueda evadir obstáculos sin la intervención del usuario, se acopló un mecanismo tal que, según la regla borrosa ejecutada, este se accione y evite el obstáculo próximo. Para lograrlo, se utilizaron servos motores los cuales se los ubicó en los extremos del controlador de velocidad de la silla de ruedas eléctrica. Para la selección adecuada de los servos motores, se tuvieron a disposición en el mercado tres modelos distintos:

**Tabla 5.
Lista de servos motores utilizados en este trabajo.**

Modelo	Voltaje de alimentación (V)	Peso (g)	Grados de rotación (°)	Material de engranajes	Torque (kg - cm)	Costo (\$)
SG90	4.8 - 6	13	0 - 180	Nylon	2.5	3
MG 946R	6 - 7.2	55	0 - 180	Metálica	14	8
MG 995	4.8 - 6.6	55	0 - 180	Metálica	11	8

Fuente: Autor

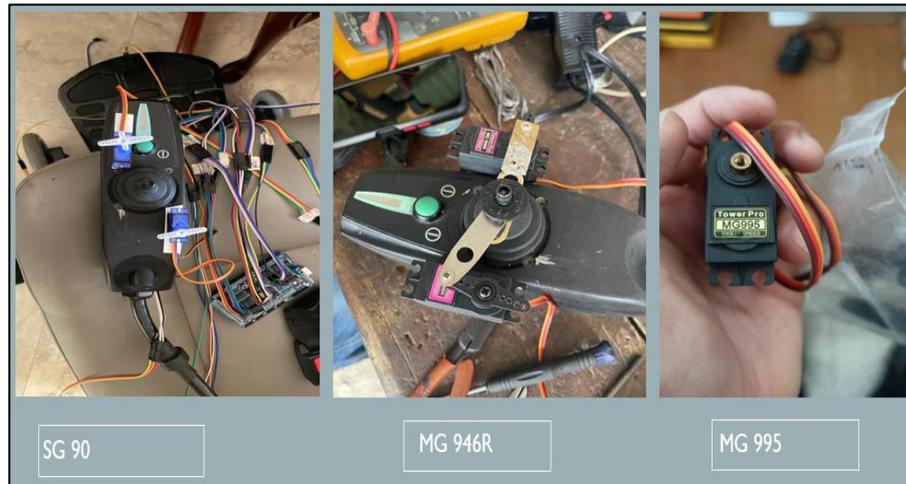


Figura 3.25. Servos Motores utilizados para pruebas experimentales.

Fuente: Autor

Con respecto al mecanismo incorporado a los servos motores para que la silla de ruedas eléctrica realice el giro correspondiente para evadir obstáculos y escalones, se utilizó para realizar pruebas experimentales dos platinas metálicas de espesor 1 mm y 68 mm de largo 12 mm de ancho, y luego fueron impresas en material ácido poliáctico en una impresora 3D modelo Monoprice y dos piezas de distinta geometría impresas en el mismo material en una impresora 3D modelo Anycubic Predator. El principio teórico del movimiento de estos mecanismos es el correspondiente al de biela – manivela. Para determinar las posiciones de los servos motores en conjunto con el mecanismo, se realizó distintas pruebas de configuración en el programa Simulink dependiendo de los ángulos de giro que se le daban a los servos motores con el fin de cumplir el esquema de la figura 13. El diseño de estos mecanismos se lo realizó en el programa CAD Inventor.

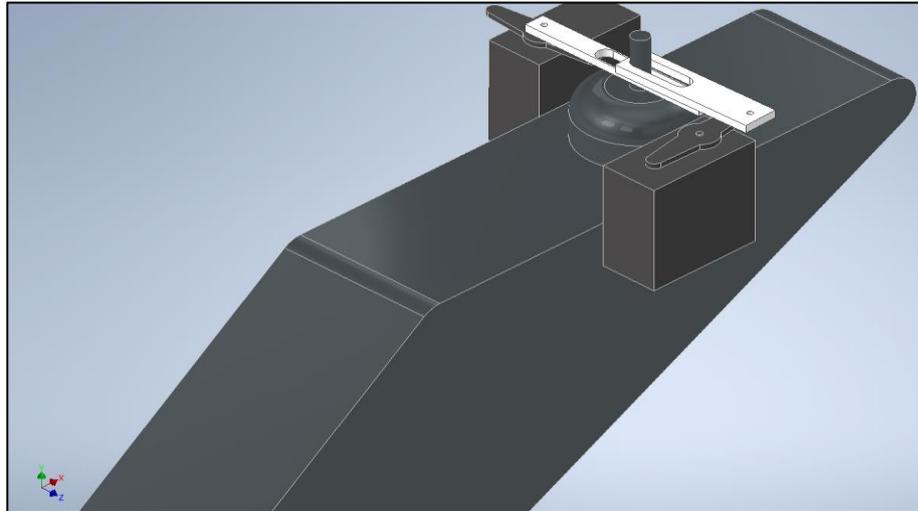


Figura 3.26. Mecanismo 1 impreso para realizar los giros en la silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Autor

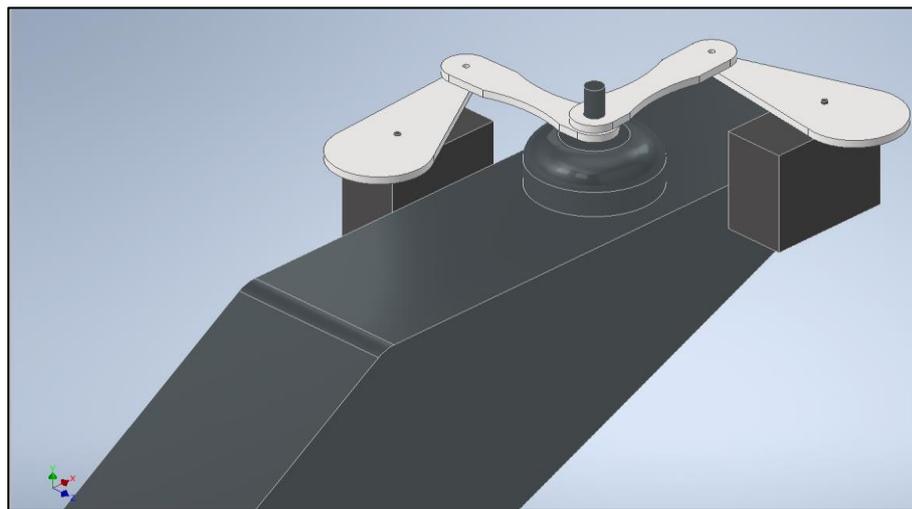


Figura 3.27. Mecanismo 2 impreso para realizar los giros en la silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Autor

Para seleccionar que conjunto de servo motores es el más ideal para este proyecto, se procedió a realizar una matriz de decisión. Para establecer que conjunto de servo motores es el más idóneo, se definieron parámetros con sus respectivos porcentajes o pesos acorde a su utilidad.

Tabla 6.
Matriz de decisión para seleccionar el conjunto de servo motores.

Criterio	peso	Modelo del servo motor		
		SG90	MG 946R	MG995
Facilidad de uso	20%	8	6	6
Seguridad	25%	4	8	9
Costo de producción	35%	9	8	8.5
Mantenimiento	20%	7	6	6
Total		7	7	7.375

Fuente: Autor

Tabla 7.
Matriz de decisión para seleccionar mecanismo acoplado a los servo motores.

Criterio	peso	Mecanismo acoplado a los servo motores	
		Mecanismo 1	Mecanismo 2
Facilidad de uso	20%	8	8
Seguridad	25%	4	8
Costo de producción	35%	6	8
Mantenimiento	20%	7	7
Total		6.25	7.75

Fuente: Autor

Como se puede observar en la tabla 5 y 6, el par de servo motores y mecanismo seleccionado para la implementación del control borroso fue MG995 y mecanismo 2, respectivamente.

Con el fin de optimizar el funcionamiento del controlador borroso en la tarjeta Arduino, los servos motores utilizados en este trabajo se conectaron a una fuente externa de 7,4 V ya que cuando se los conectaba a la tarjeta Arduino, errores por ruido o interferencia entre el funcionamiento de los servos motores con los sensores de proximidad ultrasónicos existieron. Las baterías utilizadas fueron de litio – ion recargables por facilidad de manejo con la implementación del control en la silla de ruedas eléctrica.



Figura 3.28. Baterías litio – ion recargables de 3,7 V y 8800 mAh acopladas al mecanismo de los servos motores.

Fuente: Autor

CAPÍTULO 4

4. Resultados

4.1. Respuesta al movimiento por enfoque lagrangiano.

Es necesario tener en consideración el tiempo que demora la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo hasta llegar al obstáculo que se desea evadir en condiciones ideales con el fin de comprobar la eficacia del controlador borroso implementado en la vida real. Teniendo en cuenta que las ruedas no deslizan, por ende, realizan una rotación pura con respecto al piso a una rapidez angular constante en el que por medio de las ecuaciones de Lagrange se describió su respuesta al movimiento y así mismo, simular en el programa Matlab por métodos numéricos la trayectoria recorrida. Como se indicó en la sección anterior, la rapidez angular promedio se la estimó realizando varias pruebas de tiempo utilizando una referencia en la rueda y para la aceleración angular el tiempo que tarda en llegar a la rapidez que se configuró para que opere el control borroso implementado:

Tiempo ra	Rapidez Angular(rad/s)	aceleración angular(rad/s ²)	Tiempo aa	Torque (N – m)	RMSE rapidez angular	RMSE Torque
8.44	0.744454976	1.654344392	0.45	0.163780095	0.000813364	0.000690148
8.2	0.766243902	1.665747614	0.46	0.164909014	0.004791459	0.000896259
7.23	0.869045643	1.810511757	0.48	0.179240664	0.023560403	0.003512849
7.65	0.821333333	1.825185185	0.45	0.180693333	0.014849367	0.003778068
7.73	0.812833118	1.806295817	0.45	0.178823286	0.013297447	0.003436646
8.54	0.735737705	1.634972678	0.45	0.161862295	0.000778185	0.000340007
8.47	0.741818182	1.685850413	0.44	0.166909091	0.000331953	0.001261422
8.74	0.718901602	1.597559115	0.45	0.158158352	0.003852023	0.000336237
9.04	0.695044248	1.44800885	0.48	0.143352876	0.00820776	0.003039335
8.43	0.745338078	1.521098119	0.49	0.150588714	0.000974595	0.001718258
8.95	0.70203352	1.526159825	0.46	0.151089823	0.006931699	0.001626768
9.07	0.692745314	1.649393605	0.42	0.163289967	0.008627486	0.000600663
9.12	0.688947368	1.602203182	0.43	0.158618115	0.009320893	0.000252297
8.22	0.764379562	1.698621249	0.45	0.168163504	0.004451079	0.001490445
7.62	0.824566929	1.754397722	0.47	0.173685374	0.015439738	0.002498596
9.62	0.653139293	1.718187614	0.38	0.170159974	0.015858523	0.001854949
9.07	0.692745314	1.4739262	0.47	0.145918694	0.008627486	0.002570883
9.91	0.634026236	1.293931094	0.49	0.128099178	0.019348074	0.005824267
7.72	0.81388601	1.808635579	0.45	0.179054922	0.013489678	0.003478937
7.77	0.808648649	1.684684685	0.48	0.166783784	0.012533471	0.001238544
9.4	0.668425532	1.39253191	0.48	0.137862766	0.01306765	0.004041687
8.4	0.748	1.558333333	0.48	0.154275	0.001460593	0.001045237
6.85	0.917255474	1.99403364	0.46	0.19740933	0.032362274	0.006829978
9.8	0.641142857	1.364133739	0.47	0.13504924	0.018048762	0.004555365
8.8	0.714	1.4875	0.48	0.1472625	0.004746929	0.002325539
9.17	0.68519084	1.593467069	0.43	0.15775324	0.010006798	0.0004102
8.45	0.743573964	1.517497887	0.49	0.150232291	0.000652514	0.001783332
8.52	0.737464789	1.536384977	0.48	0.152102113	0.000462864	0.00144195
8.34	0.753381295	1.637785424	0.46	0.162140757	0.002443079	0.000390847
8.43	0.745338078	1.693950178	0.44	0.167701068	0.000974595	0.001406016
Valor Predicho	0.742654727	1.621201804		0.160498979		

Figura 4.1. Valores de prueba para estimar la rapidez y aceleración angular de las ruedas en la silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Autor

Como se puede observar en la figura 31, el valor referencial o previsto se escogió como el promedio de todos los valores de pruebas realizadas para poder estimar el error cuadrático medio que indica que tan alejados o cercanos están del valor referencial para poder simular la trayectoria recorrida. Estos valores referenciales fueron para la rapidez angular de $0,7426 \text{ rad/s}$ y para el torque aplicado a las ruedas de $0,1605 \text{ N – m}$ obteniendo que el RMSE menor para la rapidez angular de las ruedas fue de $0,000331953$ y el RMSE menor para el torque aplicado a las ruedas fue de $0,000252297$, que corresponden a $0,7418 \text{ rad/s}$ y $0,1586 \text{ N – m}$ respectivamente.

Escogidos los valores referenciales, se obtuvo la siguiente respuesta de movimiento para la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo habiendo resuelto las ecuaciones de Lagrange de movimiento:

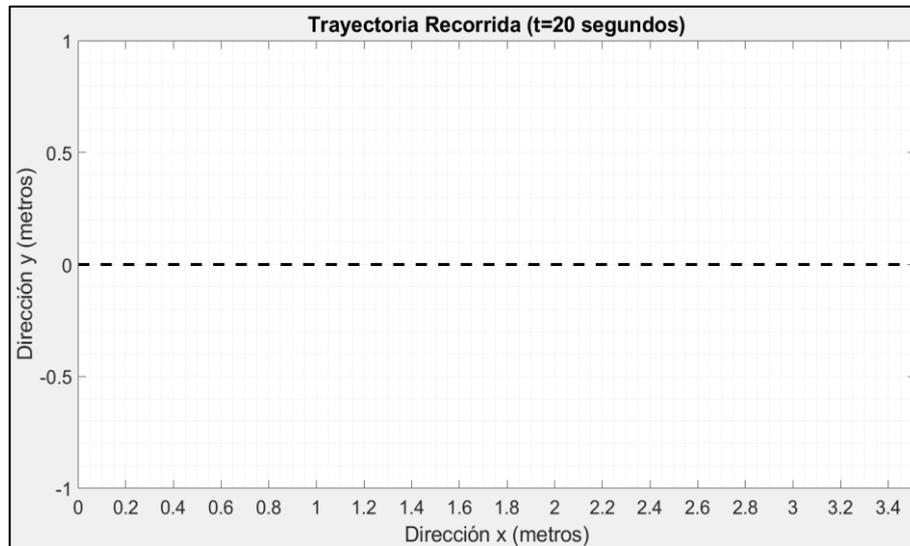


Figura 4.2. Simulación de la trayectoria recorrida por la silla de ruedas eléctrica resueltas sus ecuaciones de movimiento por medio del enfoque Lagrangiano.

Fuente: Autor

La distancia recorrida por la silla de ruedas eléctrica de acuerdo con la simulación fue de $3,51\text{ m}$, sin embargo, la distancia real del escenario de trabajo medida fue de $3,10\text{ m}$ como se puede observar en la figura 10. Esto se debe a que las restricciones no holonómicas impuestas en el modelo de las ecuaciones de Lagrange para describir el movimiento de la silla de ruedas eléctrica están asociadas a rotación pura, sin la intervención de factores de amortiguamiento, rigidez, pérdidas o imprecisión en el manejo del control de velocidad por el usuario. Cabe recalcar que este enfoque Lagrangiano para el análisis de la respuesta de movimiento de la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo representa un escenario ideal y es este modelo el que sirve para compararlo con la respuesta del control borroso implementado en la silla de ruedas eléctrica Jazzy Jet 3. A continuación se mostrará la simulación realizada por medio del análisis por dinámica de sistemas multicuerpo en donde los factores de amortiguamiento y rigidez intervienen, y así estimar el tiempo de respuesta de la silla de ruedas eléctrica.

4.2. Respuesta al movimiento por enfoque de la dinámica de sistemas multicuerpo.

Este enfoque tiene en consideración los tipos de juntas que intervienen en el sistema de cuerpos rígidos que representan a la silla de ruedas eléctrica y además es importante considerar que tipo de junta existe entre el sistema y el escenario de trabajo. Debido a que el sistema de cuerpos rígidos lo convierte en uno solo, el cual cuenta con su centro de masa y momentos de inercia los cuales describen la tendencia del cuerpo a rotar en cierta dirección con la imposición de un ente externo, la silla de ruedas eléctrica modelada tiene un total de seis grados de libertad con respecto al escenario de trabajo. Esto significa que la silla de ruedas eléctrica puede rotar y desplazarse en tres direcciones distintas. Son las restricciones que se impongan entre las ruedas de la silla y el escenario las que reducen sus grados de libertad. Estas restricciones son la fricción, amortiguamiento y rigidez. Al existir estas condiciones, la silla no puede moverse en la dirección perpendicular al plano de contacto y al impartir la rapidez angular a las ruedas que están acopladas a los servos motores independientes, la silla realiza su planeación hasta llegar al objetivo deseado que se necesita evadir. Para estimar la fricción que existe entre el piso y las ruedas, en el modelo CAD diseñado se especificó que el material de las ruedas sea caucho, sin embargo, existen sillas de ruedas con material de plástico (Mohanavel et al., 2020). Para este trabajo se escogió como coeficiente de rugosidad un valor de 0,4. Para estimar los valores de amortiguamiento y rigidez, se realizaron varias pruebas con variaciones en los coeficientes de restitución y luego simulando en el programa Simscape se obtuvieron los tiempos de respuesta con las distancias recorridas.

Masa m_1 - escenario(kg)	Masa m_2 - silla de ruedas eléctrica(kg) u (m_2/m_1)	0.001329	Coef. Restitución(e)	T_c (s)	Amortiguamiento Rigidez		Tiempo de Repuesta (s)	Distancia Recorrida (m)
					C_b	K_b		
108000	143.536	0.001329	1	0.3	0	15719.592	27	2.488017
108000	143.536	0.001329	0.95	0.3	49.01774895	15723.782	27	2.486852
108000	143.536	0.001329	0.8	0.3	213.2441425	15798.899	27	2.487048
108000	143.536	0.001329	0.7	0.3	340.8516273	15922.214	27	2.487117
108000	143.536	0.001329	0.6	0.3	488.1636573	16135.203	27	2.487267
108000	143.536	0.001329	0.5	0.3	662.3968082	16484.823	27	2.487316
108000	143.536	0.001329	0.4	0.3	875.6409507	17056.828	27	2.486455
108000	143.536	0.001329	0.3	0.3	1150.560465	18028.331	27	2.484489

Figura 4.3. Tiempos de respuesta y distancia recorrida por la silla de ruedas simulado en Simscape.

Fuente: Autor

Según la figura 4.3, el tiempo de colisión T_c escogido para las simulaciones fue de 0,3 segundos el cual fue medido a partir del instante en que inicia el contacto entre las

llantas la silla de ruedas eléctrica y el piso. Cabe recalcar que es casi aproximado al tiempo que acelera y establece su rapidez angular constante. La mayor distancia recorrida según los parámetros del coeficiente de restitución, amortiguamiento y rigidez es cuando el valor de amortiguamiento es cero, sin embargo, en la vida real esto no sucede, debido a disipaciones de energía entre la silla de ruedas eléctrica al momento en que el usuario se sienta en ella y ejecuta el movimiento, por ende, se escogió como valor de coeficiente de restitución de 0,95 con el fin de maximizar la idealización del movimiento de la silla de ruedas sin la aplicación del control borroso y además que su movimiento es a una rapidez angular constante de las ruedas. La figura 34, ilustra el instante en el que la silla de ruedas eléctrica ha alcanzado su objetivo con el fin de evadirlo y el tiempo de llegada fue de 27 segundos y una distancia recorrida de 2,4868 m. Además, el peso de la silla de ruedas eléctrica modelada incluye una geometría cuadrada la cual representa el peso del usuario sumada al peso del chasis. Como elección del peso del usuario fue de 68 kg.

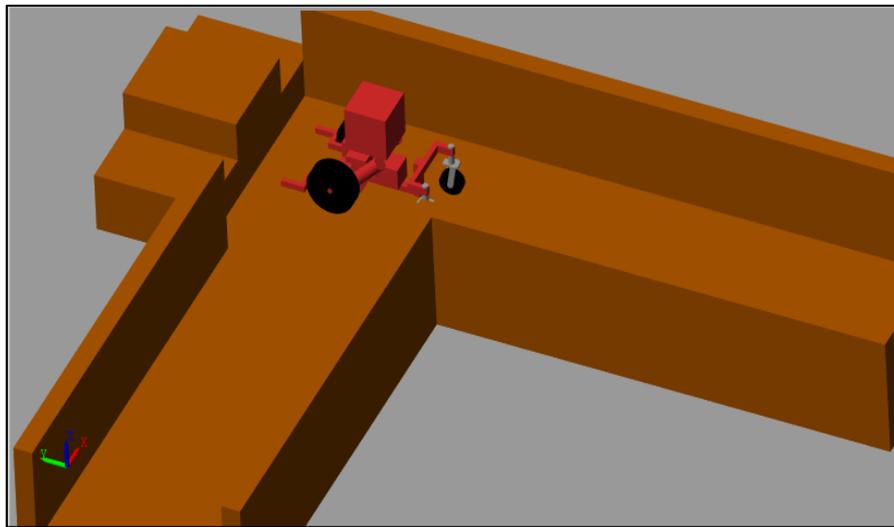


Figura 4.4. Simulación de la respuesta dinámica de la silla de ruedas eléctrica en Simscape.

Fuente: Autor

4.3. Determinación del tiempo de respuesta con la implementación de los controladores borrosos en la silla de ruedas eléctrica.

Teniendo en cuenta los tiempos de recorrido por medio del enfoque Lagrangiano y por dinámica de multicuerpo siendo como referencia el caso idealizado, se procedió con la evaluación del tiempo de respuesta una vez implementado el controlador borroso en la silla de ruedas eléctrica hasta llegar al objetivo que se deseó evadir. El mecanismo final acoplado y configurado para que accione el movimiento de las ruedas a la rapidez angular modelada con anterioridad al controlador de velocidad de la silla de ruedas eléctrica fue el siguiente:

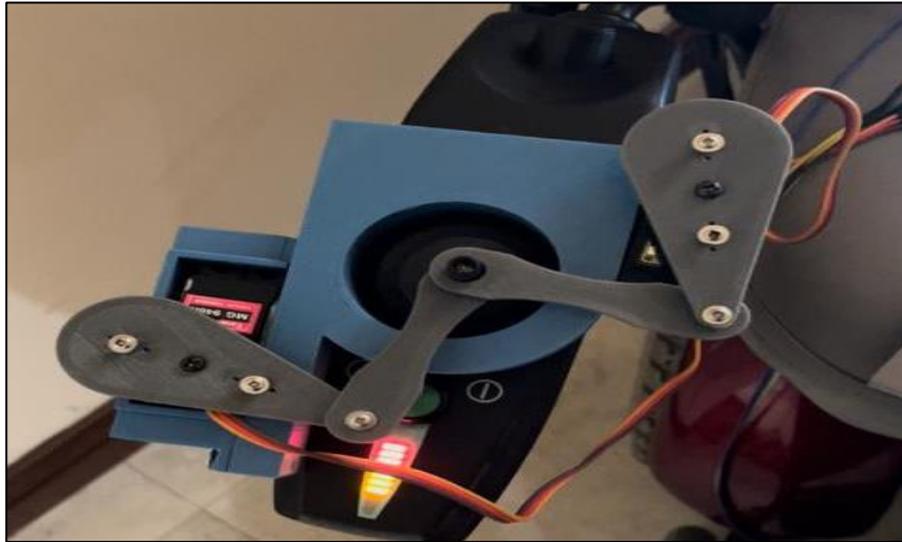


Figura 4.5. Mecanismo acoplado a los servos motores para el funcionamiento del control borroso.

Fuente: Autor



Figura 4.6. Implementación final del control borroso para la evasión de obstáculos en la planeación de la silla de ruedas eléctrica Jazzy Jet 3.

Fuente: Autor

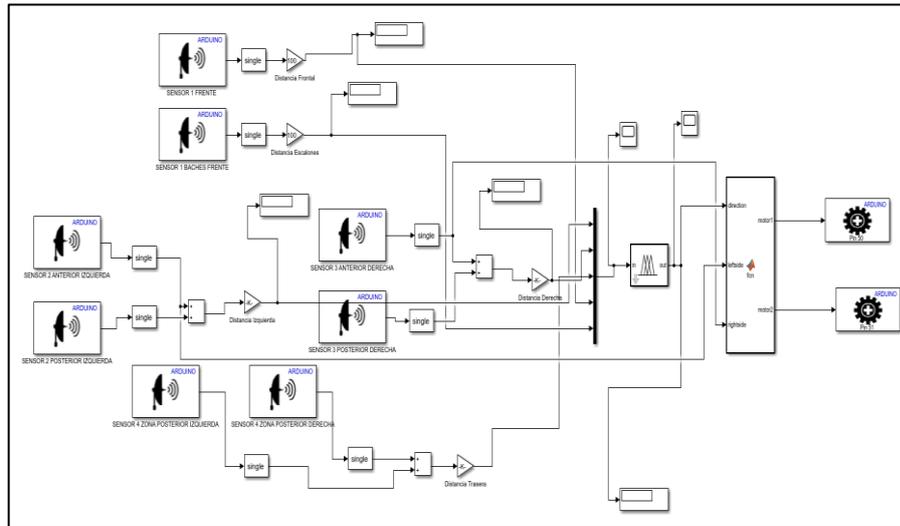


Figura 4.7. Sistema de control borroso final configurado en la plataforma Simulink.

Fuente: Autor

Para estimar el tiempo de respuesta del funcionamiento del controlador borroso implementado en la silla de ruedas eléctrica, se realizaron pruebas tanto del controlador 1 y 2 para analizar que controlador era más eficiente con respecto a recursos computacionales y evasión de obstáculos.

4.4. Implementación y funcionamiento del controlador borroso 1.

El método de defuzificación de los conjuntos borrosos correspondientes a las variables de entrada hacia las variables de salida fue por el método del centroide, el cual realiza la sumatoria de todos los valores evaluados en las variables de entrada y los multiplica por sus posiciones respectivas y los divide nuevamente para la sumatoria de sus valores tomados de las variables de entrada. Los resultados para todas las reglas borrosas definidas en los rangos de distancia establecidos fueron:



Figura 4.8. Respuesta del controlador borroso 1 de acuerdo con los rangos en las distancias establecidas.

Fuente: Autor

Se realizaron dos pruebas con la implementación del sistema de control borroso, una de ellas fue evitar un obstáculo que en este caso fue en un pasillo hacia una silla y la otra prueba fue evitar escalones. Los resultados en el tiempo de respuesta tanto para evadir la silla en el pasillo y escalones fueron respectivamente:



Figura 4.9. Pruebas realizadas con la implementación del control borroso en la silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Autor

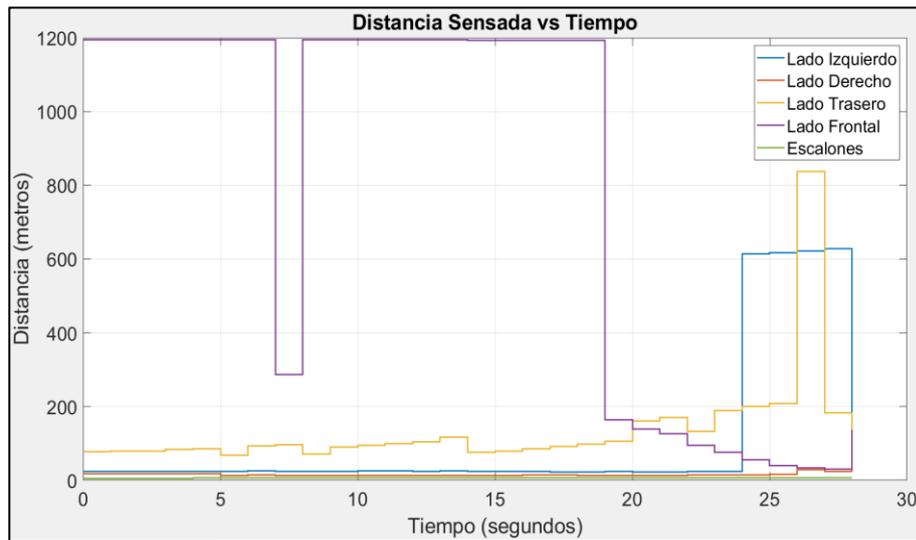


Figura 4.10. Distancia Sensada vs Tiempo de la respuesta de la variable de entrada del controlador borroso 1 para evadir obstáculos.

Fuente: Autor

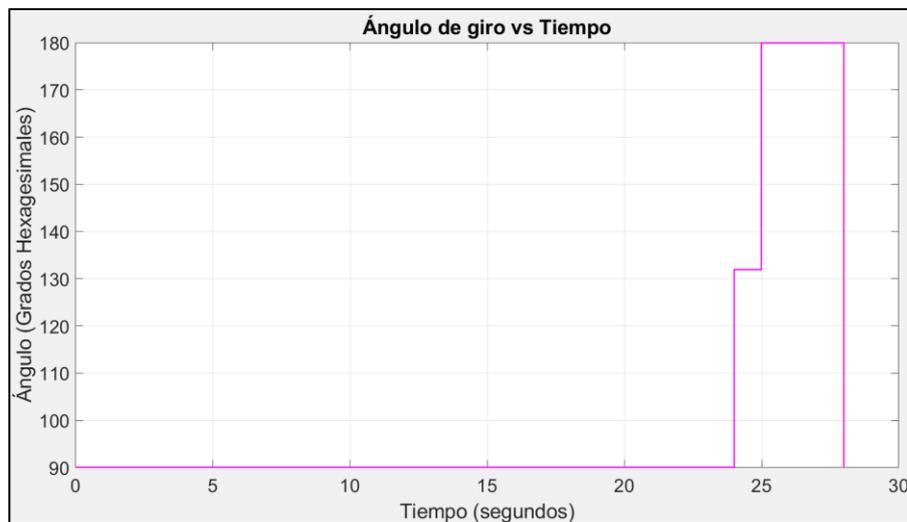


Figura 4.11. Ángulo de giro vs Tiempo de la respuesta de la variable de salida del controlador borroso 1 para evadir obstáculos.

Fuente: Autor

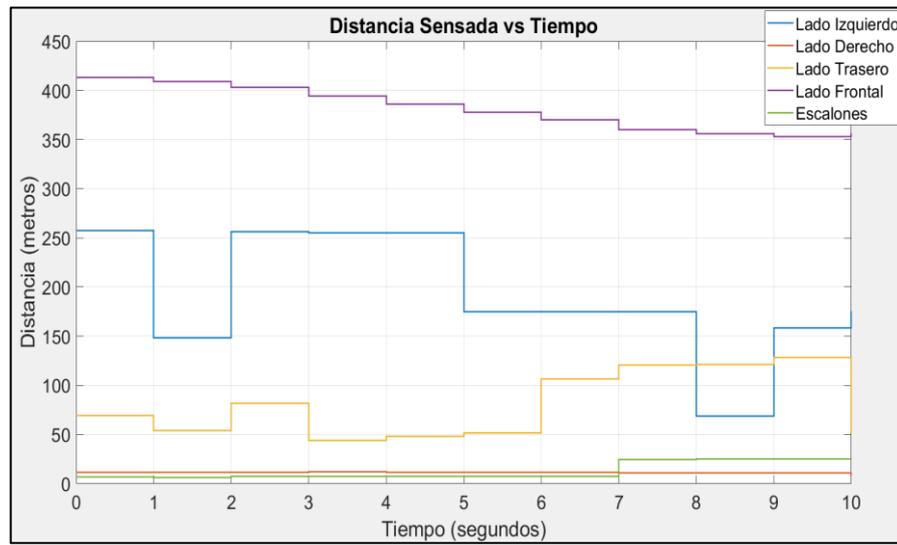


Figura 4.12. Distancia sensada vs tiempo de la respuesta de la variable de entrada del controlador borroso 1 para evadir escalones.

Fuente: Autor

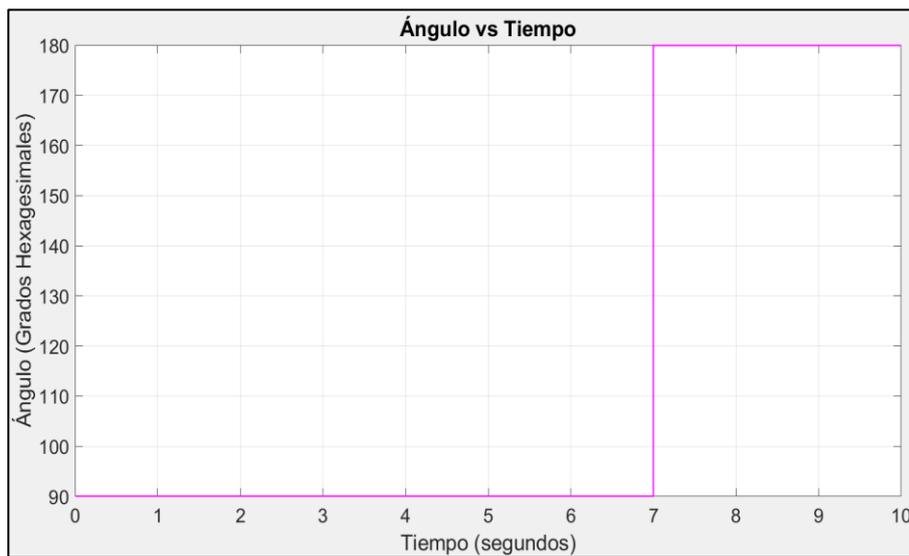


Figura 4.13. Ángulo vs Tiempo de la respuesta de la variable de salida del controlador borroso 1 para evadir escalones.

Fuente: Autor

4.5. Implementación y funcionamiento del controlador borroso 2.

Al igual que el controlador borroso 1, el método de defuzificación realizado en este controlador fue por el método del centroide obteniendo el siguiente resultado para el conjunto de reglas borrosas en el rango de distancias establecido:

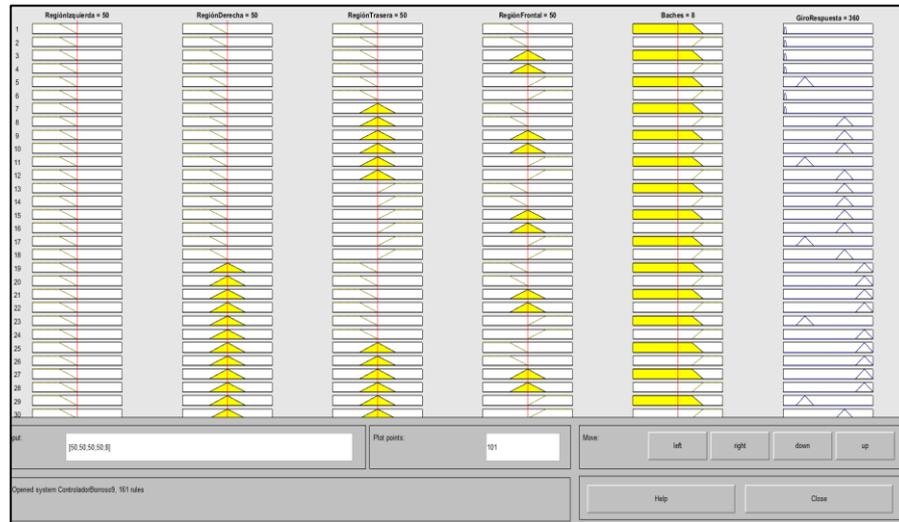


Figura 4.14. Respuesta del controlador borroso 2 de acuerdo con los rangos de distancias establecidos.

Fuente: Autor

De igual manera, las pruebas realizadas para la implementación de este controlador borroso fueron las mismas de la figura 39. Los tiempos de respuesta para evadir la silla en el pasillo y escalones se muestran a continuación:

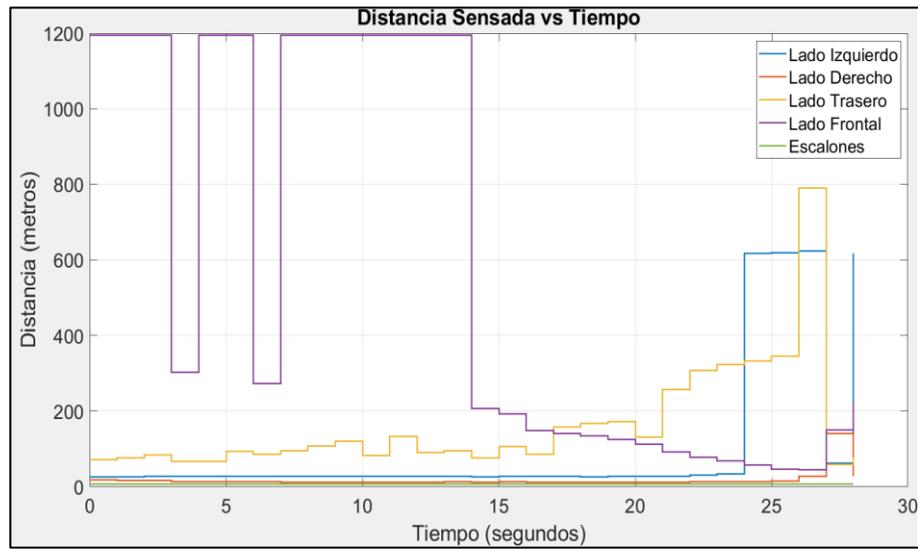


Figura 4.15. Distancia Sensada vs Tiempo de la respuesta de la variable de entrada del controlador borroso 9 para evadir obstáculos.

Fuente: Autor.



Figura 4.16. Ángulo de giro vs Tiempo de la respuesta de la variable de salida del controlador borroso 9 para evadir obstáculos.

Fuente: Autor.

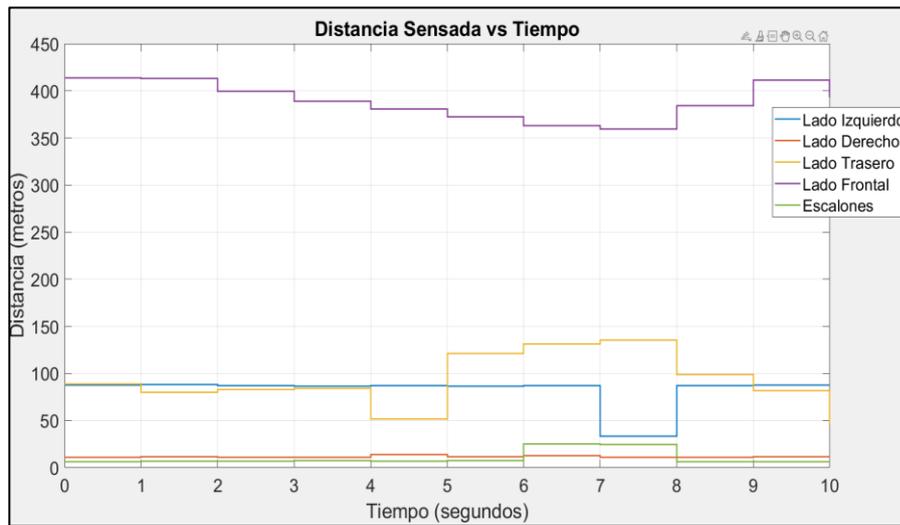


Figura 4.17. Distancia sensada vs Tiempo de la respuesta de la variable de entrada del controlador borroso 9 para evadir escalones.

Fuente: Autor

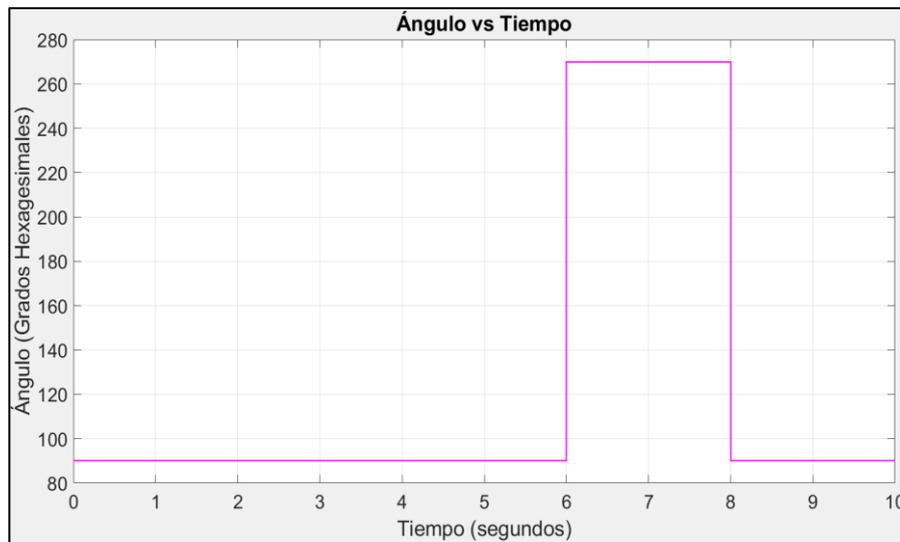


Figura 4.18. Ángulo de giro vs Tiempo de la respuesta de la variable de salida del controlador borroso 9 para evadir escalones.

Fuente: Autor



Figura 4.19. Prueba experimental para evadir obstáculo.

Fuente: Autor.



Figura 4.20. Prueba experimental para evadir escalones.

Fuente: Autor

Como se puede observar en las figuras 4.2 y 4.4 los tiempos de llegada para evadir la silla en el pasillo fueron aproximadamente de 24 segundos recorriendo los 3,10 m medidos para evaluar su funcionalidad con los valores ideales obtenidos tanto por el enfoque Lagrangiano y dinámica de sistemas multicuerpo. A diferencia de las ecuaciones de movimiento obtenidas por el enfoque lagrangiano, la diferencia de tiempo es de 4 segundos más que en el sistema de control borroso implementado en la silla de ruedas eléctrica para pruebas experimentales, sin embargo, la silla de ruedas eléctrica en la simulación recorre una distancia mayor de 49 cm y con respecto al enfoque por dinámica de sistemas multicuerpo, la diferencia es aproximadamente de 3 segundos más en la simulación y la distancia recorrida es la misma. Estos tiempos de diferencia si bien es cierto son bajos, se deben a que tanto en el enfoque lagrangiano y por dinámica de multicuerpos, son en condiciones ideales y para la implementación del sistema de control borroso son experimentales, además, de factores como incertidumbre en el movimiento del mecanismo acoplado a los servos motores, movimientos del usuario repentinos y posibles condiciones externas del escenario. Además, se determinó que la mejor eficiencia hallada en ahorro de recursos computacionales fue en el controlador borroso 1, ya que requirió menor capacidad de memoria interna con la plataforma Arduino a diferencia del controlador borroso 2, cuyos porcentajes de memoria fueron 64,4% y 80,4% respectivamente.

Tabla 8.
Resultados generales obtenidos por los métodos aplicados para la respuesta dinámica de la silla de ruedas eléctrica Jazzy Jet 3.

Método	Tiempo de respuesta (s)	Distancia Recorrida (m)	Plataforma
Lagrangiano	20	3,49	Matlab
Dinámica de multicuerpo	27	3,10	Simscape
Control borroso 1	24	3,10	Simulink - Arduino
Control borroso 2	24	3,10	Simulink -Arduino

Fuente: Autor

CAPÍTULO 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

1. A nivel nacional, no se cuenta con tecnologías asistentes para personas discapacitadas debido a la falta de implementación de nuevos métodos que puedan brindar seguridad a los usuarios, por ende, se ven en la necesidad de utilizar sillas de ruedas manuales perjudicando no solamente a su salud sino a su seguridad integral.

2. El desarrollo de las ecuaciones de movimiento por medio del enfoque lagrangiano en conjunto con el modelado por el enfoque de la dinámica de sistemas de multicuerpo para determinar la respuesta al movimiento de la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo, sirvieron para tener como referencia las condiciones ideales en el tiempo de llegada hacia el obstáculo que se deseó evadir en comparación con las pruebas experimentales en la implementación de los dos controladores borrosos desarrollados. Esto permitió optimizar el funcionamiento de los controladores borrosos con la programación de la tarjeta Arduino y el programa matlab.

3. El controlador borroso más eficiente con respecto a recursos computacionales fue el controlador borroso 1, sin embargo, el controlador borroso 2 en su desarrollo contó con más reglas borrosas, es decir, sus rangos de distancias sensadas son mayores en comparación con el controlador borroso 1, lo que le permite en su funcionamiento tener una mejor distribución en su respuesta de salida, es decir que, al contar con más reglas borrosas, las distintas respuestas en el ángulo de giro son mayores con respecto al controlador borroso 1. En el desarrollo del controlador borroso 1 se obtuvieron 32 reglas borrosas, a diferencia del controlador borroso 2 que fueron 161 reglas borrosas. Cabe recalcar que ambos controladores borrosos logran evitar obstáculos a partir de los 100 *cm* sensados por el sensor ultrasónico frontal con un tiempo de respuesta igual programado en la tarjeta arduino que fue de 1 segundo, lo que hace que estos controladores borrosos cumplan con el objetivo deseado en este trabajo.

4. En comparación con los controladores tradicionales PID, los controladores borrosos desarrollados en este proyecto permitieron resolver la no linealidad de las ecuaciones de movimiento por el enfoque lagrangiano por medio del uso del método de inferencia de Mamdani, en donde la intuición del desarrollador del controlador contribuyó para que se logre la evasión de obstáculos en la planeación de la silla de ruedas eléctrica.

5.2. Recomendaciones

1. Instalar una fuente externa al banco de servo motores debido a que al usar una tarjeta de micro controlador como la arduino, la corriente alterna inducida produce ruido en su funcionamiento a diferencia de una fuente externa que genere una diferencia de voltaje por corriente directa.
2. Utilizar el método de inferencia de Mamdani a diferencia del Sugeno ya que permite utilizar completamente la intuición del usuario y así tener una mejor disponibilidad de pruebas experimentales.
3. Se recomienda usar el método del centroide debido a que ahorra recursos computacionales por su baja reutilización de salidas en comparación con los demás establecidos en matlab, por ejemplo, el método de momentos utiliza un alto porcentaje de valores de salida reutilizables, es decir, realimenta al control borroso en un mayor grado en comparación con los demás.
4. Es recomendable utilizar únicamente un solo sensor en la parte frontal para la evasión de obstáculos debido a que si se usaran dos sensores como comúnmente se suele hacerlo, al estar en un espacio cerrado, por ejemplo un pasillo, el ángulo de apertura máximo que es de 45 grados afectaría por las paredes del mismo, obteniendo respuestas de salida erróneas.
5. Es recomendable utilizar mecanismos impresos 3D no solamente por su bajo costo de producción sino también por su facilidad de producción y sobre todo diseño ingenieril a diferencia de un mecanismo metálico como el que se ilustra en la figura 3.25.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdeselem, C., Othmane, A., Brahim, G., Amine, S. M., Oussama, H., & Amine, H. M. (2021). Power management strategy based sugeno fuzzy logic rules in an electric wheelchair. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 12(2), 1187–1195. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i2.pp1187-1195>
- Abdul Ghani, N. M., & Tokhi, M. O. (2016). Simulation and control of multipurpose wheelchair for disabled/elderly mobility. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 23(4), 331–347. <https://doi.org/10.3233/ICA-160526>
- Abiyev, R. H., Akkaya, N., Aytac, E., Günsel, I., & Çağman, A. (2016). Brain-Computer Interface for Control of Wheelchair Using Fuzzy Neural Networks. *BioMed Research International*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9359868>
- Ahmad, S., H., N., & O., M. (2012). Modular Fuzzy Logic Controller for Motion Control of Two-Wheeled Wheelchair. *Fuzzy Logic - Controls, Concepts, Theories and Applications*. <https://doi.org/10.5772/37584>
- Ahmad, S., Siddique, N. H., & Tokhi, M. O. (2011). A modular fuzzy control approach for two-wheeled wheelchair. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 64(3–4), 401–426. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9541-0>
- Aina, N., Ruzi, A. M., Najaa, I., & Nordin, A. M. (2022). Voice-Controlled Wheelchair with Heart Rate and Location Monitoring MALAYSIA *Corresponding Author Designation. *Progress in Engineering Application and Technology*, 3(1), 485–500. <https://doi.org/10.30880/peat.2022.03.01.049>
- Al-qaysi, Z. T., Zaidan, B. B., Zaidan, A. A., & Suzani, M. S. (2018). A review of disability EEG based wheelchair control system: Coherent taxonomy, open challenges and recommendations. In *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (Vol. 164, pp. 221–237). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.06.012>
- Amouri, L., Jallouli, M., Novales, C., Poisson, G., & Derbel, N. (2019). Evaluation of user interface performing a DVZ-fuzzy logic pilot for powered wheelchair. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 13(3), 27–33. <https://doi.org/10.14313/JAMRIS/3-2019/23>
- Baklouti, E., Amor, N. ben, & Jallouli, M. (2017). Autonomna navigacija za invalidska kolica s detekcijom prepreka u stvarnom vremenu korištenjem 3D senzora. *Automatika*, 57(3), 761–773. <https://doi.org/10.7305/automatika.2017.02.1421>
- Chatterjee, S., & Roy, S. (2021a). A low-cost assistive wheelchair for handicapped & elderly people. *Ain Shams Engineering Journal*, xxxx, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.021>

- Chatterjee, S., & Roy, S. (2021b). A low-cost assistive wheelchair for handicapped & elderly people. *Ain Shams Engineering Journal*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.021>
- Choi, J. H., Chung, Y., & Oh, S. (2019). Motion control of joystick interfaced electric wheelchair for improvement of safety and riding comfort. *Mechatronics*, 59, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.03.005>
- CONADIS. (2013). *MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA INCLUSIÓN LABORAL DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD*. www.relacioneslaborales.gob.ec
- Demarch, A., Waterkemper, A., Pasini, D., Ruzza, S., Montedo, O. R. K., & Angioletto, E. (2021). Effects of roughness parameters on slip resistance for different methods used to determine the coefficient of friction for ceramic floor tiles. *Ceramics International*, 47(17), 24281–24286. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.139>
- Feng, G., Guerra, T. M., Busoniu, L., Nguyen, A. T., & Mohammad, S. (2021). Robust observer-based tracking control under actuator constraints for power-assisted wheelchairs. *Control Engineering Practice*, 109(April 2020), 104716. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104716>
- Ghorbel, A., Amor, N. ben, & Jallouli, M. (2019). A survey on different human-machine interactions used for controlling an electric wheelchair. *Procedia Computer Science*, 159, 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.194>
- INEN. (2015). *DIRECTRICES PARA EL DESARROLLO DE NORMAS SOBRE SISTEMAS DE TRANSPORTE. NECESIDADES DE LAS PERSONAS CON DISCAPACIDAD Y ADULTOS MAYORES. PARTE 1: DIRECTRICES BÁSICAS*.
- Jordan, R. W., Sloan, R., & Saithna, A. (2018). Should we avoid shoulder surgery in wheelchair users? A systematic review of outcomes and complications. In *Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research* (Vol. 104, Issue 6, pp. 839–846). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.03.011>
- Kahraman, C., Deveci, M., Boltürk, E., & Türk, S. (2020). Fuzzy controlled humanoid robots: A literature review. *Robotics and Autonomous Systems*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103643>
- Lee, Y. T., Chiu, C. S., & Kuo, I. T. (2017). Fuzzy wall-following control of a wheelchair. *IFSA-SCIS 2017 - Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems*, 27–32. <https://doi.org/10.1109/IFSA-SCIS.2017.8023223>
- Lei, Z., Tan, B. Y., Garg, N. P., Li, L., Sidarta, A., & Ang, W. T. (2022). An Intention Prediction Based Shared Control System for Point-to-Point Navigation of a Robotic

- Wheelchair. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4), 8893–8900. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3189151>
- Li, K., Darby, A., & Darby, A. P. (2017). *Structural Control and Health Monitoring*. 16(3). <https://doi.org/10.1002/stc.238i>
- Maatoug, K., Njah, M., & Jallouli, M. (2019). Electric Wheelchair Trajectory Tracking Control based on Fuzzy Logic Controller. *19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, STA 2019*, 191–195. <https://doi.org/10.1109/STA.2019.8717190>
- Madona, P., Nisa, H. K., Wijaya, Y. P., & Akhyan, A. (2020). The Design of Wheelchair Systems with Raspberry Pi 3-Based Joystick Analog and Voice Control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 846(1), 0–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/846/1/012032>
- Masmoudi, M. S., Krichen, N., Masmoudi, M., & Derbel, N. (2016). Fuzzy logic controllers design for omnidirectional mobile robot navigation. *Applied Soft Computing Journal*, 49, 901–919. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.08.057>
- Mohanavel, V., Vairamuthu, J., Jegan, A., Sathish, T., Rajesh, K., & Tamilselvam, S. (2020). Modelling and manufacturing of light weight materials based stretcher cum wheelchair. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 707–711. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.720>
- Morgado Ramirez, D. Z., Rasha, L., Barbareschi, G., Suzuki, T., Caplan, I., McKinnon, I., Brett, D. J. L., & Holloway, C. (2019). Adjusted method to calculate an electric wheelchair power cycle: fuel cell implementation example. *Journal of Energy Storage*, 23, 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.027>
- Patthanajitsilp, P., & Chongstitvatana, P. (2022). Obstacles Detection for Electric Wheelchair with Computer Vision. *KST 2022 - 2022 14th International Conference on Knowledge and Smart Technology*, 97–101. <https://doi.org/10.1109/KST53302.2022.9729083>
- Pu, J., Jiang, Y., Xie, X., Chen, X., Liu, M., & Xu, S. (2018). Low cost sensor network for obstacle avoidance in share-controlled smart wheelchairs under daily scenarios. *Microelectronics Reliability*, 83, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.03.003>
- Razali, N. A. A., Abdul Ghani, N. M., Jamin, N. F., & Masrom, M. F. (2019). Stability control of wheelchair system using interval type-2 fuzzy logic control (IT2FLC). *2018 9th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2018 - Proceeding, August*, 162–167. <https://doi.org/10.1109/ICSGRC.2018.8657514>

- Rojas, M., Ponce, P., & Molina, A. (2018). A fuzzy logic navigation controller implemented in hardware for an electric wheelchair. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(1), 1–12. <https://doi.org/10.1177/1729881418755768>
- Selph, S. S., Skelly, A. C., Wasson, N., Dettori, J. R., Brodt, E. D., Ensrud, E., Elliot, D., Dissinger, K. M., & McDonagh, M. (2021). Physical Activity and the Health of Wheelchair Users: A Systematic Review in Multiple Sclerosis, Cerebral Palsy, and Spinal Cord Injury. In *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* (Vol. 102, Issue 12, pp. 2464-2481.e33). W.B. Saunders. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2021.10.002>
- Sharifuddin, M. S. I., Nordin, S., & Ali, A. M. (2020). Comparison of CNNs and SVM for voice control wheelchair. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 9(3), 387–393. <https://doi.org/10.11591/ijai.v9.i3.pp387-393>
- Temich, S., & Grzechca, D. (2016). A fuzzy logic controller to seat comfort correction for manually propelled wheelchair - a case study. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.010>
- Travlos, V., Patman, S., Wilson, A., Simcock, G., & Downs, J. (2017). Quality of Life and Psychosocial Well-Being in Youth With Neuromuscular Disorders Who Are Wheelchair Users: A Systematic Review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 98(5), 1004-1017.e1. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2016.10.011>
- Wu, B. F., Chen, Y. S., Huang, C. W., & Chang, P. J. (2018). An Uphill Safety Controller with Deep Learning-Based Ramp Detection for Intelligent Wheelchairs. *IEEE Access*, 6, 28356–28371. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839729>
- Yunior, Y. T. K., & Kusriani. (2018). Integration System of Voice Recognition and DC Motor Control Using Fuzzy Logic on Smart Wheel Chair. *Journal of Physics: Conference Series*, 1140(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1140/1/012053>
- Zhang, S., Cao, F., Li, C., & Ming, Y. (2019). Robust H^∞ Fuzzy Logic Control of Intelligent Electrically Powered Wheelchair. *Proceedings of 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2019, laeac*, 2091–2096. <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997953>

ANEXOS

ANEXO A

Derivación de ecuaciones de movimiento de la silla ruedas eléctrica por enfoque Lagrangiano

Grados de Libertad de la silla de ruedas eléctrica

Para determinar los grados de libertad de la silla de ruedas eléctrica, se debe considerar cuales son los cuerpos rígidos principales que la componen. Si bien es cierto que en el capítulo 3 se indicó que se modelaron los cuerpos rígidos independientes correspondientes a las juntas y llantas traseras que son parte de la silla de ruedas eléctrica, estos cuerpos rígidos son en conjunto parte del chasis, ya que, quien ejecuta el movimiento de la silla de ruedas eléctrica son las llantas delanteras mientras que el conjunto compuesto por juntas, llantas traseras y chasis componen un sub – sistema de cuerpos rígidos que acoplados a llantas delanteras forman el sistema de cuerpos rígidos global que representan a la silla de ruedas eléctrica. Con lo mencionado, se especifican las restricciones holonómicas en la silla de ruedas eléctrica:

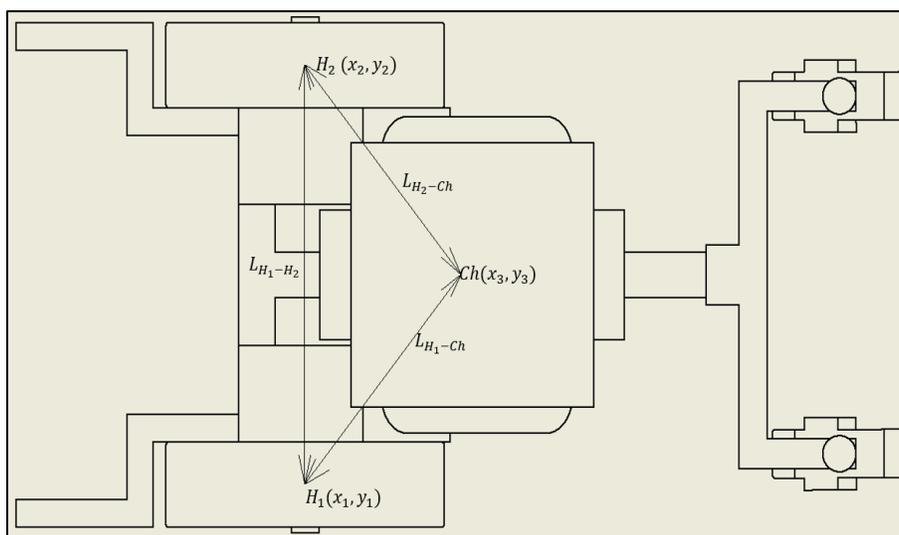


Figura A.1. Restricciones holonómicas de la silla de ruedas eléctrica.

Como se puede observar, las restricciones L_{H_2-Ch} , L_{H_1-Ch} , $L_{H_1-H_2}$ son distancias fijas que están restringidas por la geometría de la silla de ruedas eléctrica. Además, otra restricción que involucra el movimiento en la derivación de las ecuaciones por el enfoque Lagrangiano es $z_1 = z_2 = z_3 = 0$. Por lo tanto, el número de grados de libertad está definido como:

$$G = 3(n) - j$$

En donde n es el número de coordenadas que describen el sistema y j el número de restricciones o ecuaciones independientes.

$$G = 3(3) - 6 = 3$$

Es decir, el cuerpo puede desplazarse en las direcciones x, y y rotar un ángulo θ . Con estos grados de libertad se pueden establecer coordenadas generalizadas independientes como la terna x, y, θ .

Restricciones no holonómicas – Condición de no deslizamiento de las ruedas delanteras.

Denotando los centros de las ruedas que están conectadas a los motores que realizan los torques para el movimiento de la silla de ruedas eléctrica tanto derecha como izquierda y el punto de contacto con el suelo por H_1, C_1 y H_2, C_2 , respectivamente, las velocidades en dichos puntos de contacto son:

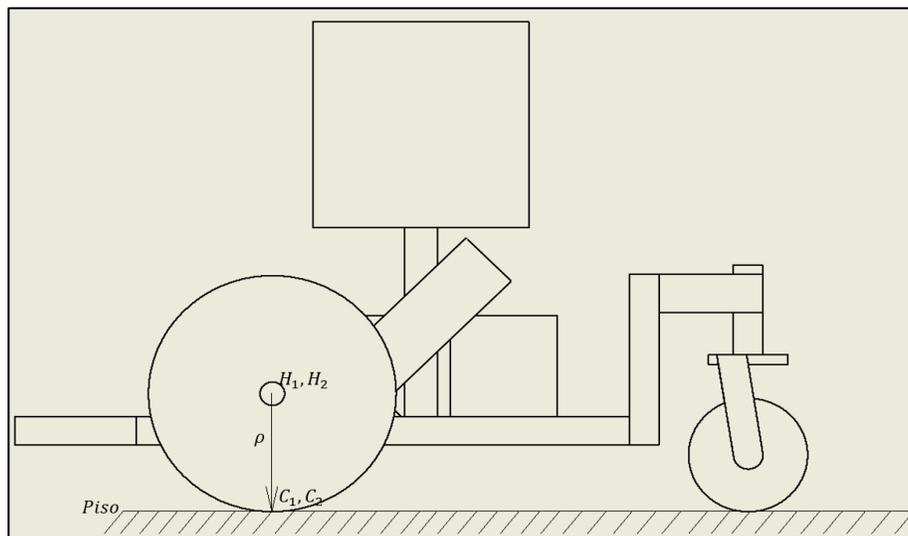


Figura A.2. Esquema de condición de no deslizamiento de las ruedas delanteras de la silla de ruedas eléctrica.

Las condiciones de movimiento de las ruedas delanteras de la silla, corresponden a que su punto de contacto entre el suelo y las llantas representan una condición de no deslizamiento. Para ello, se expresan las velocidad de los puntos de contacto C_1, C_2 que corresponden a la llanta delantera derecha e izquierda, respectivamente:

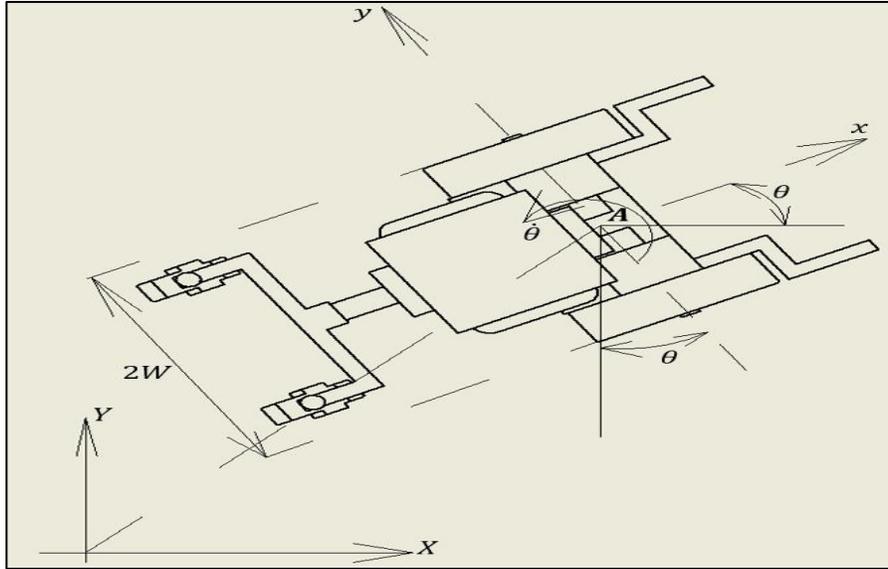


Figura A.3. Sistemas de referencia inercial y no inercial correspondientes en la derivación de las velocidades en los puntos de contacto entre el suelo y las ruedas.

$$\vec{V}_{H_1} = \begin{bmatrix} \dot{x} + W\dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y} + W\dot{\theta} \operatorname{sen} \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{C_1} = \vec{V}_{H_1} + \vec{\omega}_{W_1} \times \vec{r}_{H_1 C_1} = \begin{bmatrix} \dot{x} + W\dot{\theta} \cos \theta - \rho\dot{\phi}_1 \cos \theta \\ \dot{y} + W\dot{\theta} \operatorname{sen} \theta - \rho\dot{\phi}_1 \operatorname{sen} \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{H_2} = \begin{bmatrix} \dot{x} - W\dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y} - W\dot{\theta} \operatorname{sen} \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{C_2} = \vec{V}_{H_2} + \vec{\omega}_{W_2} \times \vec{r}_{H_2 C_2} = \begin{bmatrix} \dot{x} - W\dot{\theta} \cos \theta - \rho\dot{\phi}_2 \cos \theta \\ \dot{y} - W\dot{\theta} \operatorname{sen} \theta - \rho\dot{\phi}_2 \operatorname{sen} \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

Tomando en cuenta condiciones de no deslizamiento por parte de las ruedas, se expresa cuatro condiciones no holonómicas:

$$\dot{x} + W\dot{\theta} \cos \theta + \rho\dot{\phi}_1 \cos \theta = 0$$

$$\dot{y} + W\dot{\theta} \operatorname{sen} \theta + \rho\dot{\phi}_1 \operatorname{sen} \theta = 0$$

$$\dot{x} - W\dot{\theta} \cos \theta - \rho\dot{\phi}_2 \cos \theta = 0$$

$$\dot{y} - W\dot{\theta} \operatorname{sen} \theta - \rho\dot{\phi}_2 \operatorname{sen} \theta = 0$$

Con dichas restricciones, se pueden obtener dos variables dependientes que dependen de los grados de libertad de la silla de ruedas eléctrica las cuales son ϕ_1, ϕ_2 , por lo tanto, se necesitan 5 variables como coordenadas generalizadas para describir el movimiento de la silla de ruedas. Estas coordenadas generalizadas se pueden expresar por medio del vector $\vec{q} = [x \ y \ \theta \ \phi_1 \ \phi_2]$. Despejando las variables independientes ($\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$) que representan los grados de libertad de la silla de ruedas eléctrica y además las velocidades o razones de cambio de posición en el tiempo con respecto al marco de referencia inercial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{\rho}{2} \begin{bmatrix} (\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_1)\cos\theta \\ (\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_1)\sen\theta \\ (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)/W \end{bmatrix}$$

Estas restricciones no holonómicas se pueden expresar en la forma:

$$C(\vec{q})\dot{\vec{q}} = 0$$

En donde,

$$\dot{\vec{q}} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta} \ \dot{\phi}_1 \ \dot{\phi}_2]$$

$$C(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & \frac{\rho}{2} & -\frac{\rho}{2} \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\rho}{2W} & \frac{\rho}{2W} \end{bmatrix}$$

Energía cinética total de la silla de ruedas eléctrica

Debido a que existen restricciones no holonómicas, las ecuaciones de Lagrange deben incluir sus multiplicadores correspondientes:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial \dot{\vec{q}}} \right] - \frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial \vec{q}} - C(\vec{q})^T \vec{\lambda} = \vec{Q}_i$$

En donde \vec{Q}_i representa el vector de fuerzas generalizadas que están vinculadas a los torques de cada motor que se acoplan las ruedas delanteras de la silla de ruedas eléctrica y $\vec{\lambda}$ representa los multiplicadores de Lagrange correspondientes a las restricciones no holonómicas.

La energía cinética total del sistema viene dada por las dos ruedas que están acopladas a los motores de cada una y la energía cinética del chasis.

$$K_{chasis} = \frac{m_B}{2} |\vec{V}_B|^2 + \vec{\omega}_B^T I_B \vec{\omega}_B = \frac{m_B}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + d^2 \dot{\theta}^2 + 2d\dot{\theta}(\dot{y}\cos\theta - \dot{x}\sin\theta)) + \frac{I_B}{2} \dot{\theta}^2$$

En donde m_B es la masa del conjunto chasis – llantas, I_B es la inercia rotacional del conjunto total chasis – llantas alrededor de un eje normal a sus planos de movimiento el cual pasa por el centro de masa, y la velocidad \vec{V}_B del chasis está denotada por:

$$\vec{V}_B = \vec{V}_R + \vec{\omega}_R \times \vec{r}_{CM1} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d \cos \theta \\ d \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} - d \dot{\theta} \sin \theta \\ \dot{y} + d \dot{\theta} \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_B = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}]^T$$

En donde \vec{V}_R es la velocidad del centro del eje que une a las ruedas delanteras, $\vec{\omega}_R$ es la velocidad angular del punto central entre las ruedas delanteras, \vec{r}_{CM1} es la distancia d que existe entre el punto central de las ruedas y el centro de masa del chasis. Para las llantas delanteras, se asume un espesor t de las mismas. Como caso particular para la llanta derecha, su velocidad lineal en el centro de la llanta y matriz de inercia son:

$$\vec{V}_{CM1} = \vec{V}_{H1} = \begin{bmatrix} \dot{x} + W \dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y} + W \dot{\theta} \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{\Omega}_w = \dot{\phi}_1 \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \sin \theta \\ \dot{\phi}_1 \cos \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$I_w^b = \begin{bmatrix} I_{xx}^b & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy}^b & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m_w}{12} (3\rho^2 + t^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_w \rho^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_w}{12} (3\rho^2 + t^2) \end{bmatrix}$$

$$I_w = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx}^b & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy}^b & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, su energía cinética se puede escribir como:

$$K_{rd} = \frac{m_w}{2} \|V_{CM1}\|^2 + \frac{1}{2} \vec{\Omega}_w^T I_w \vec{\Omega}_w = \frac{m_w}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + W^2 \dot{\theta}^2 + 2W \dot{\theta} (\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta)) + \frac{I_{zz}^b}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{I_{yy}^b}{2} \dot{\phi}_1^2$$

En donde V_{CM1} es la rapidez de la llanta en su centro de masa correspondiente, $\vec{\Omega}_w$ es la velocidad angular de la llanta con respecto al marco de referencia inercial, I_w es la matriz de inercia de la llanta con respecto al marco de referencia inercial y $\dot{\phi}_1$ es la velocidad angular de la llanta con respecto a su centro de masa.

De la misma manera para la llanta izquierda delantera, su energía cinética se puede expresar como:

$$K_{ri} = \frac{m_w}{2} \|V_{CM2}\|^2 + \frac{1}{2} \vec{\Omega}_{w2}^T I_w \vec{\Omega}_{w2} = \frac{m_w}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + W^2 \dot{\theta}^2 - 2W \dot{\theta} (\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta)) + \frac{I_{zz}^b}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{I_{yy}^b}{2} \dot{\phi}_2^2$$

En donde V_{CM2} es la rapidez de la llanta en su centro de masa correspondiente, m_w es la masa de la llanta, $\vec{\Omega}_w$ es la velocidad angular de la llanta con respecto al marco de referencia inercial, I_w es la matriz de inercia de la llanta con respecto al marco de referencia inercial y $\dot{\phi}_2$ es la velocidad angular de la llanta con respecto a su centro de masa.

Por lo tanto, la energía cinética total del sistema chasis-llantas delanteras se puede expresar como:

$$K_{total} = K_{chasis} + K_{rd} + K_{ri}$$

$$K_{total} = \frac{m_B}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + d^2 \dot{\theta}^2 + 2d\dot{\theta}(\dot{y}\cos\theta - \dot{x}\sin\theta)) + \frac{I_B}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{m_w}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + W^2 \dot{\theta}^2) + \frac{I_{yy}^b}{2} \dot{\phi}_1^2 + \frac{I_{zz}^b}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{m_w}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + W^2 \dot{\theta}^2) + \frac{I_{yy}^b}{2} \dot{\phi}_2^2 + \frac{I_{zz}^b}{2} \dot{\theta}^2$$

$$K_{total} = \frac{1}{2} (m_B + 2m_w) (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} (m_B d^2 + I_B + 2m_w W^2 + 2I_{zz}^b) \dot{\theta}^2 + m_B d \dot{\theta} (\dot{y}\cos\theta - \dot{x}\sin\theta) + \frac{I_{yy}^b}{2} (\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2)$$

Simplificando términos se puede introducir las siguientes expresiones como:

$$m_T = m_B + 2m_w$$

$$I_T = I_B + m_B d^2 + 2m_w W^2 + 2I_{zz}^b$$

En donde m_T, I_T representan la masa total y la inercia total rotacional de la silla de ruedas eléctrica, respectivamente.

Aplicando las ecuaciones Euler – Lagrange con sus multiplicadores correspondientes debido a las restricciones no holonómicas que corresponden a las condiciones de no deslizamiento, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\vec{q}}} \right] - \frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial \vec{q}} - C(\vec{q})^T \vec{\lambda} = \vec{T} = [0 \ 0 \ 0 \ \tau_1 \ \tau_2]^T$$

En donde, τ_1 y τ_2 son los torques que se deben aplicar a las llantas delanteras al accionar el joystick de la silla de ruedas eléctrica el cual regula su movimiento. Reemplazando los términos correspondientes en la ecuación 2, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} m_T \dot{x} - m_B d \dot{\theta} \sin \theta \\ m_T \dot{y} + m_B d \dot{\theta} \cos \theta \\ I_T \dot{\theta} + m_B d (\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta) \\ I_{yy}^b \dot{\phi}_1 \\ I_{yy}^b \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} + m_B d \dot{\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \rho/2 & 0 & \rho/2W \\ -\rho/2 & 0 & \rho/2W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

Este sistema de ecuaciones al ser derivado convierte las primeras derivadas en sus segundas derivadas, es decir, un campo de clase C^2 , funciones continuas y derivables. La nomenclatura de todos los símbolos utilizados se puede apreciar en la tabla 2. Con dichas restricciones, dicho sistema se puede expresar como:

$$M(\vec{q}) \ddot{\vec{q}} + B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) - C^T(\vec{q}) \vec{\lambda} = \vec{T}$$

En donde,

$$M(\vec{q}) = \begin{bmatrix} m_T & 0 & -m_B d \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m_T & m_B d \cos \theta & 0 & 0 \\ -m_B d \sin \theta & m_B d \cos \theta & I_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{yy}^b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy}^b \end{bmatrix}$$

$$B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) = -m_B d \dot{\theta}^2 \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C(\vec{q}) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & \frac{\rho}{2} & -\frac{\rho}{2} \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\rho}{2W} & \frac{\rho}{2W} \end{bmatrix}$$

Este sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden conlleva a encontrar ocho incógnitas, estas son $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\theta}, \ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Una de las formas para encontrar $\ddot{\vec{q}}$ es despejando del sistema de ecuaciones diferenciales mostrado anteriormente:

$$\ddot{\vec{q}} = M^{-1}(\vec{q}) [\vec{T} - B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + C(\vec{q})^T \vec{\lambda}]$$

Para encontrar los multiplicadores de Lagrange, se puede tomar la derivada de la matriz correspondiente a las restricciones no holonómicas de la forma $C(\vec{q}) \dot{\vec{q}}$:

$$\frac{d}{dt}[C(\vec{q})\dot{\vec{q}}] = C(\vec{q})\ddot{\vec{q}} + \dot{C}(\vec{q})\dot{\vec{q}} = 0$$

Por lo tanto, la expresión para determinar los $\vec{\lambda}$ queda de la forma:

$$\vec{\lambda} = -[C(\vec{q})M^{-1}(\vec{q})C^T(\vec{q})]^{-1}[C(\vec{q})M^{-1}(\vec{q})(\vec{T} - B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \dot{C}(\vec{q})\dot{\vec{q}})]$$

Código Matlab

```
function zdot=DD_EOM(t, z)

zdot=zeros(10,1);
theta=z(5);
thetadot=z(6);
qdot=[z(2);z(4);z(6);z(8);z(10)];

global mT mB d IT Iyy Izz ro W T1 T2;

M=[mT 0 -mB*d*sin(theta) 0 0;...
    0 mT mB*d*cos(theta) 0 0;...
    -mB*d*sin(theta) mB*d*cos(theta) IT 0 0;...
    0 0 0 Iyy 0;...
    0 0 0 0 Iyy];

B=-mB*d*thetadot^2*[cos(theta);sin(theta);0;0;0];

C=[cos(theta) sin(theta) 0 -ro/2 -ro/2;...
    -sin(theta) cos(theta) 0 0 0;...
    0 0 1 -0.5*ro/W 0.5*ro/W];

Cdot=[-sin(theta)*thetadot cos(theta)*thetadot 0 0 0;...
```

```

        -cos(theta)*thetadot -sin(theta)*thetadot 0 0
0;...
        0 0 0 0 0];

T=[0;0;0;T1;T2];

lambdas=-inv(C*inv(M)*C')*(C*inv(M)*(T-B)+Cdot*qdot);

temp=inv(M)*(T-B+C'*lambdas);

zdot(1)=z(2);
zdot(2)=temp(1);
zdot(3)=z(4);
zdot(4)=temp(2);
zdot(5)=z(6);
zdot(6)=temp(3);
zdot(7)=z(8);
zdot(8)=temp(4);
zdot(9)=z(10);
zdot(10)=temp(5);
clc;close;clear;

% parámetros
global mT mB d IT Iyy Izz ro W T1 T2;
mw=0.094; % masa de las ruedas delanteras
mB=142+(2*(2.906/2.2))+(2*(0.031/2.2)); % masa del
chasis

```

```

d=0.134; % distancia del centro de las ruedas al centro
del chasis

W=0.208; % distancia media desde la llanta delantera
hacia la siguiente

IB=2.29+(2*1.29e-5)+(2*1.01e-3); % momento de inercia
del chasis

ro=0.125; % radio de las ruedas

t=0.6; % espesor de las ruedas

Izz=4.35-3; % momento de inercia de las ruedas alrededor
del eje z

Iyy=4.42e-3; % momento de inercia de las ruedas
alrededor del eje y

mT=mB+2*mw+(2*0.011)+(2*0.136); % masa total de la silla
de ruedas

IT=IB+mB*d^2+2*mw*W^2+2*Izz; % momento total de inercia
de la silla de ruedas

% condiciones iniciales

x0=0;

xdot0=0;

y0=0;

ydot0=0;

theta0=0;

thetadot0=0;

phi10=0;

phildot0=0;

phi20=0;

phi2dot0=0;

```

```

init_conds=[x0;xdot0;y0;ydot0;theta0;thetadot0;phi10;phi
1dot0;phi20;phi2dot0];

% tiempo de simulación
tspan=[0 20];

% torques de entrada a las ruedas
T1=0.16;
T2=0.16;

% solución
[T,Z]=ode45(@DD_EOM,tspan,init_conds);

% gráficas
tick_fontsize=20;
lw=3;
figure('DefaultAxesFontSize',tick_fontsize);
x=Z(:,1);
y=Z(:,3);

theta=Z(:,5);
plot(x,y,'k--','linewidth',lw);
title('Trayectoria Recorrida (t=20 segundos)')
xlabel('Dirección x (metros)')
ylabel('Dirección y (metros)')
grid minor
ax=gca;

```

```

set(gca, 'XTick', 0:0.2:5);
set(gca, 'YTick', -3:0.5:3);
xlim([min(Z(:,1)) max(Z(:,1))]);
ylim([min(Z(:,3)) max(Z(:,3))]);
hold on;

```

Modelado de la silla de ruedas eléctrica por dinámica de Multi – Cuerpos con Inventor y Simscape

La herramienta utilizada para el diseño de los cuerpos rígidos correspondientes a la silla de ruedas fue el programa CAD Inventor. Con el sistema de cuerpo rígidos ensamblados, se lo exportó como archivo XML para la lectura en Matlab con SimScape y luego proceder con su configuración para la simulación de su respuesta dinámica.

Parámetros de configuración para simulación de la respuesta dinámica de la silla de ruedas en Simscape

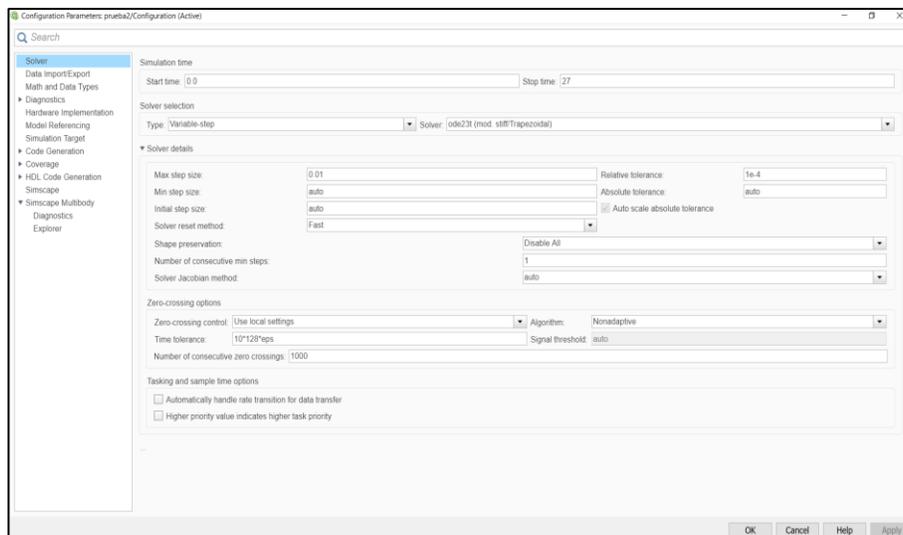


Figura A.4. Configuración de parámetros para simulaciones.

Uno de los aspectos importantes en la configuración de los parámetros es el método de solución numérica que se implementó en la simulación para obtener la respuesta dinámica de la silla de ruedas. En este caso, se usó el método numérico Trapezoidal ode23 el cual usa una regla de interpolación libre. Como discretización en el tiempo se usó un paso de 0,01 segundos y una tolerancia relativa de $1e^{-4}$.

Diseño de juntas utilizadas en el modelado por Multi – Cuerpos.

En el diseño del tipo de juntas que se implementó, se utilizaron solo del tipo revoluta especificando las posiciones en donde están acoplados todos los cuerpos rígidos que conforman a la silla de ruedas eléctrica que se modelo en el programa Inventor. El funcionamiento con el diseño de la junta revoluta utiliza dos marcos de referencia, uno de ellos es el primitivo o base, y el siguiente es el seguidor el cual se acopla o está en el siguiente cuerpo rígido. Una vez utilizada este tipo de junta, su posición se especifica con niveles de prioridad, definidos como algo o aproximado. En el modelado de la silla de ruedas, las posiciones de cada cuerpo rígido ensamblado utilizaron como nivel de prioridad el aproximado. Además, no se establecieron en las juntas pérdidas de energía asociadas a amortiguación y rigidez con respecto a los demás cuerpos rígidos ensamblados.

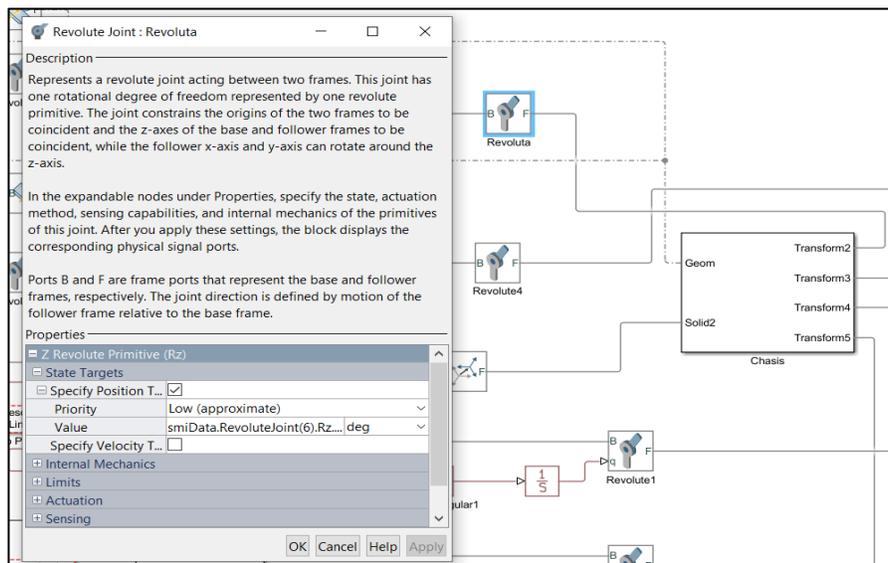


Figura A.5. Configuración de parámetros en el tipo de junta seleccionada.

Diseño de los controladores borrosos

Controlador borroso 1

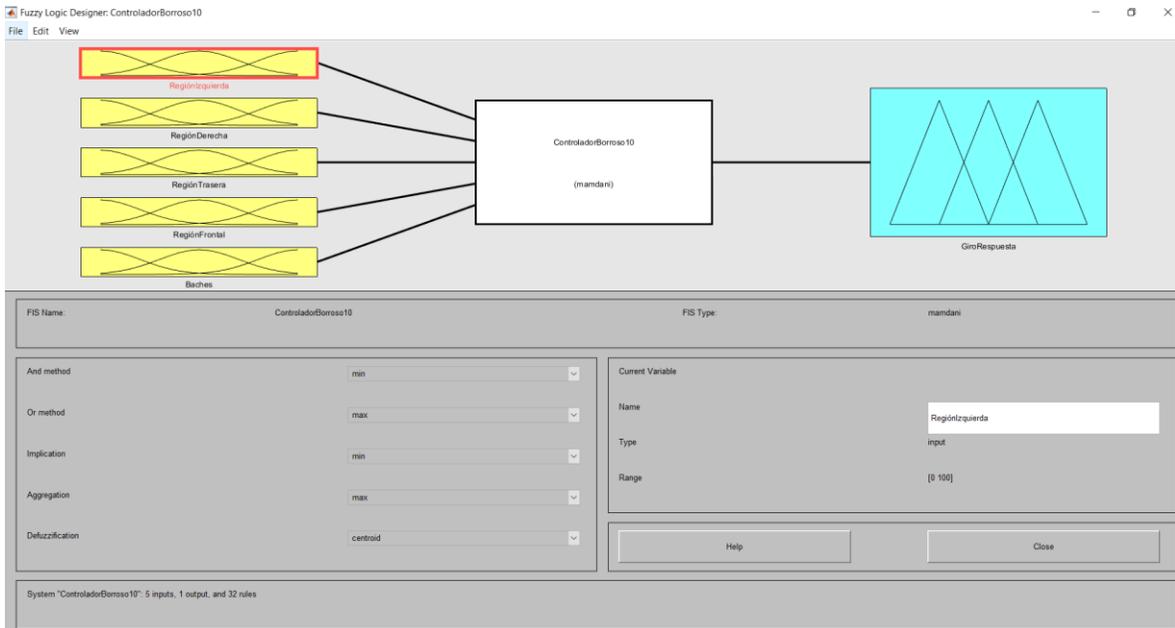


Figura A.6. Controlador borroso 1.

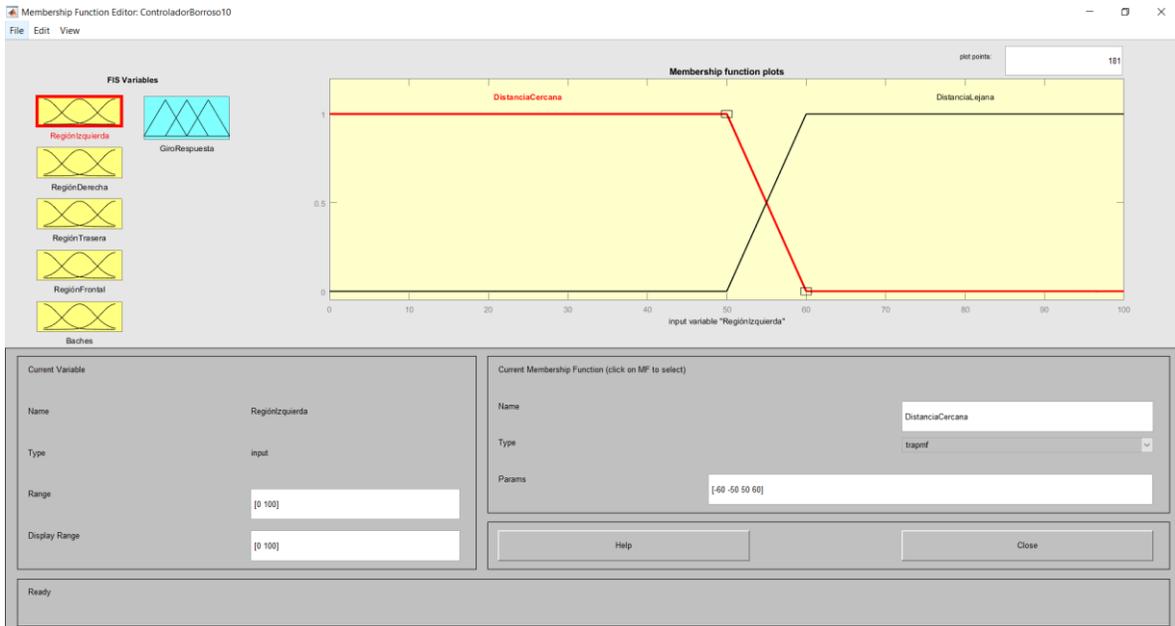


Figura A.7. Configuración de variable de entrada para región izquierda.

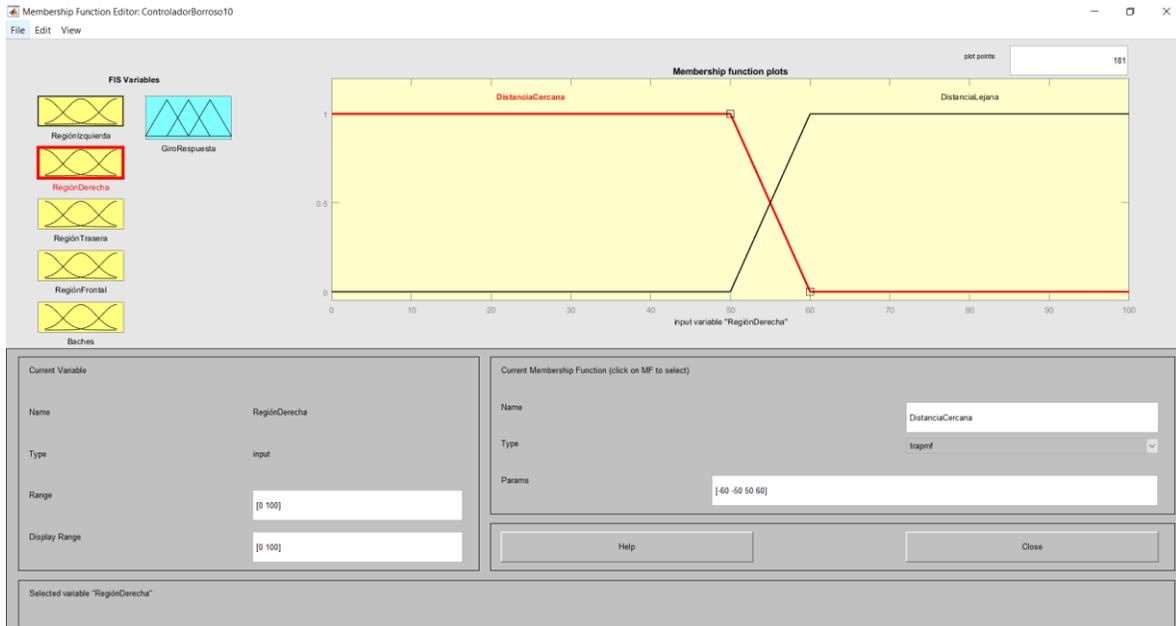


Figura A.8. Configuración de variable de entrada para región derecha.

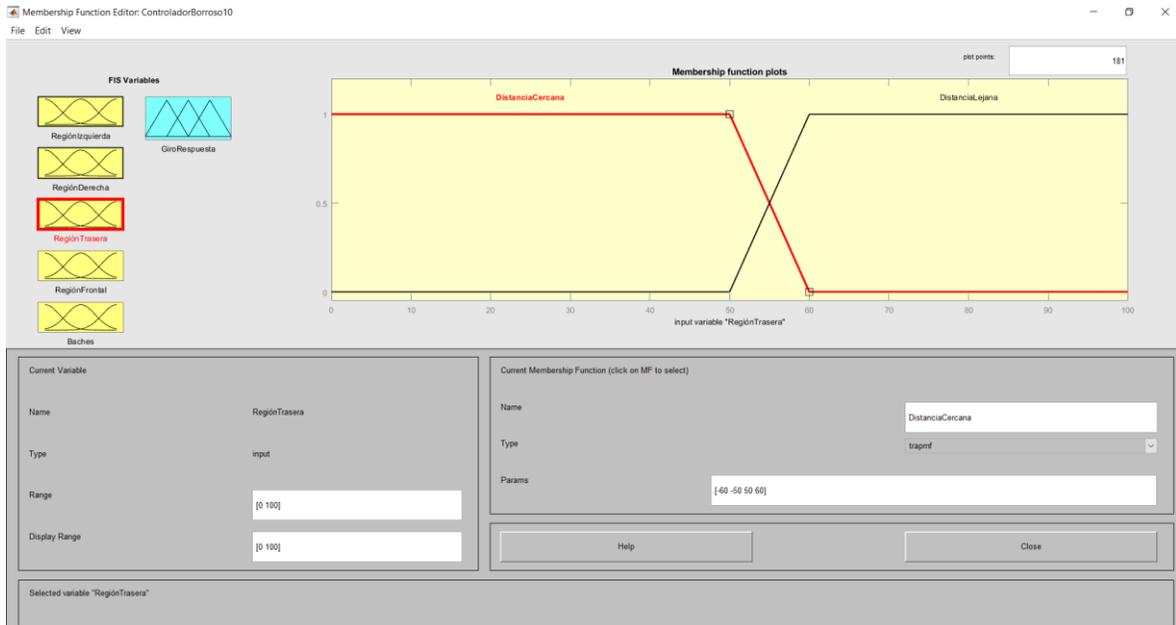


Figura A.9. Configuración de variable de entrada para región trasera.

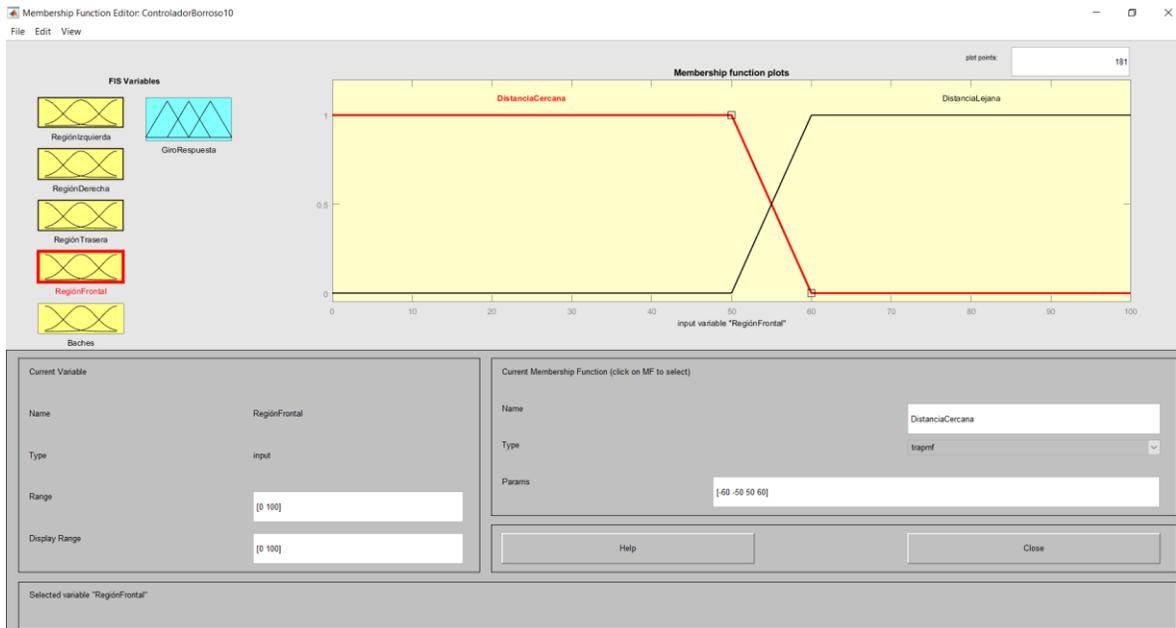


Figura A.10. Configuración de variable de entrada para región frontal.



Figura A.11. Configuración de variable de entrada para baches o escalones.

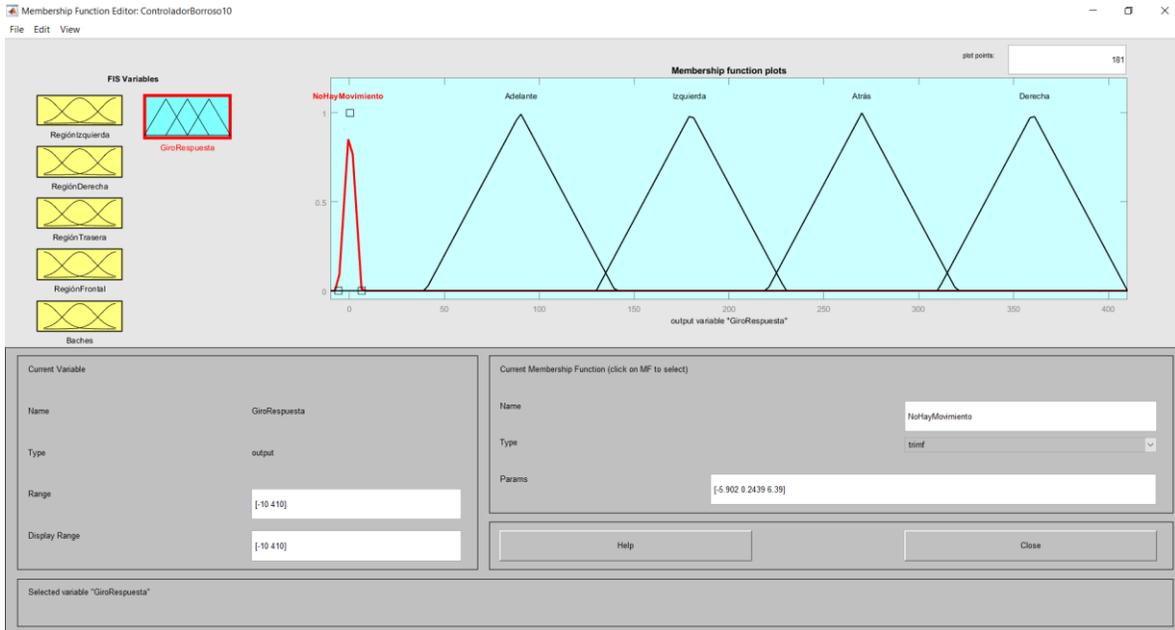


Figura A.12. Configuración de variable de salida correspondiente a los giros de la silla de ruedas.

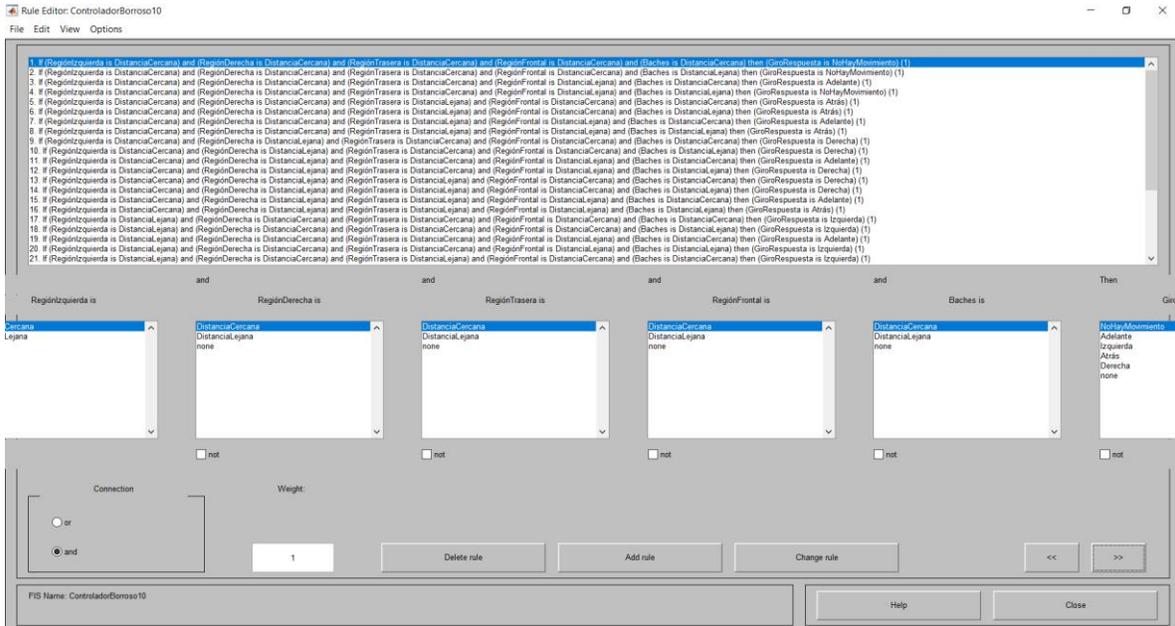


Figura A.13. Desarrollo de reglas borrosas desde 1-21.

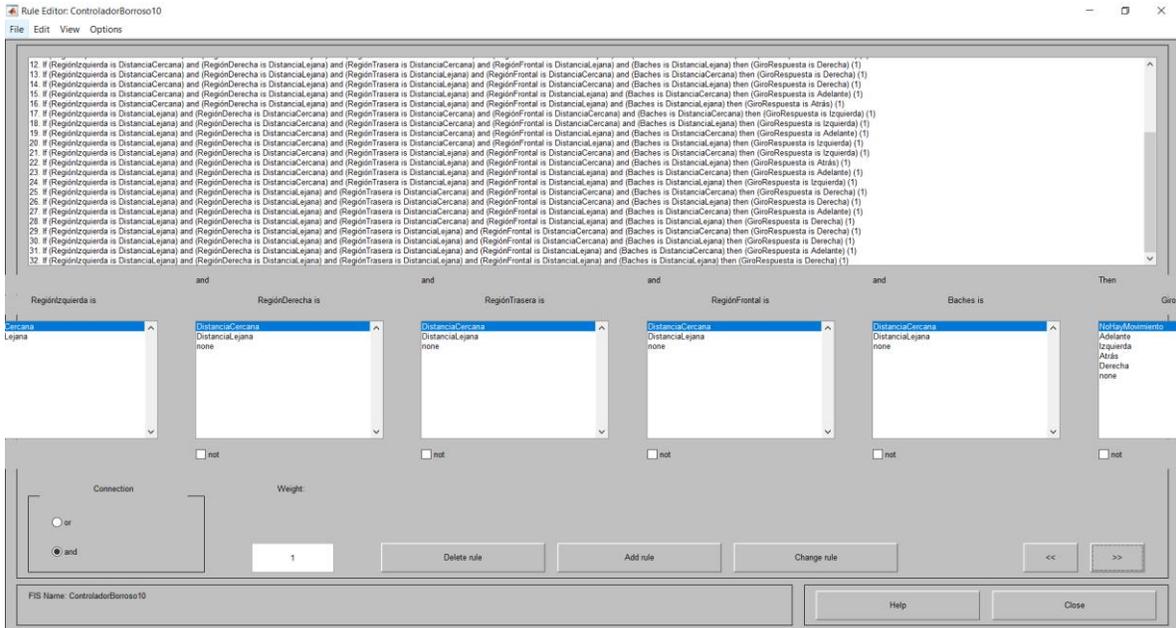


Figura A.14. Desarrollo de reglas borrosas desde 12-32.

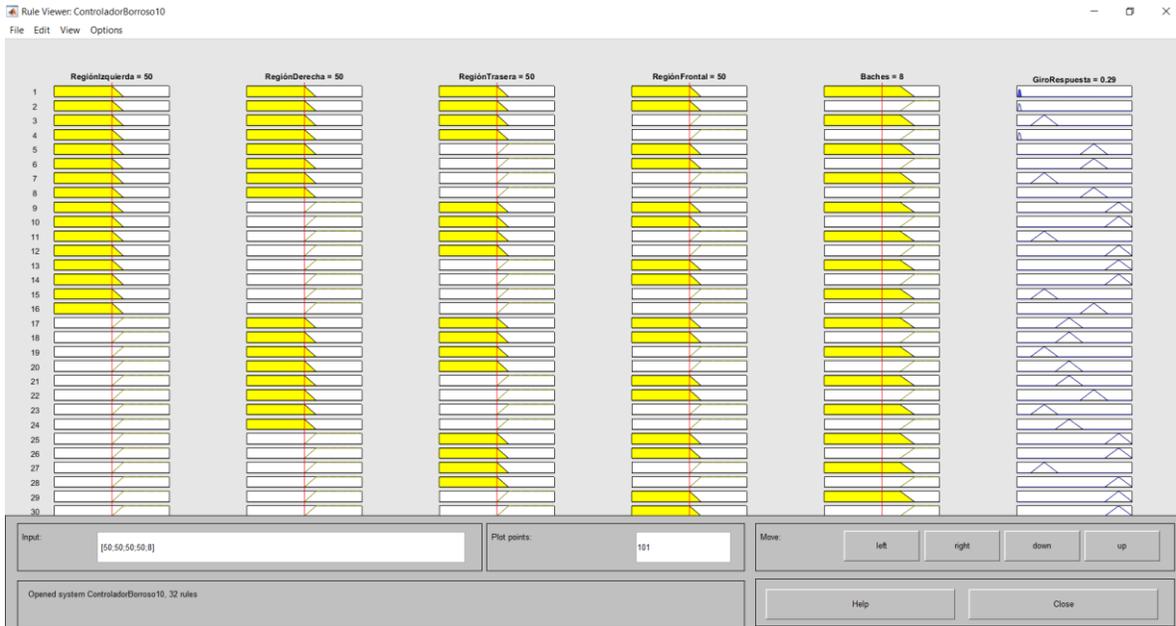


Figura A.15. Defuzificación por método del centroide del controlador borroso 1.

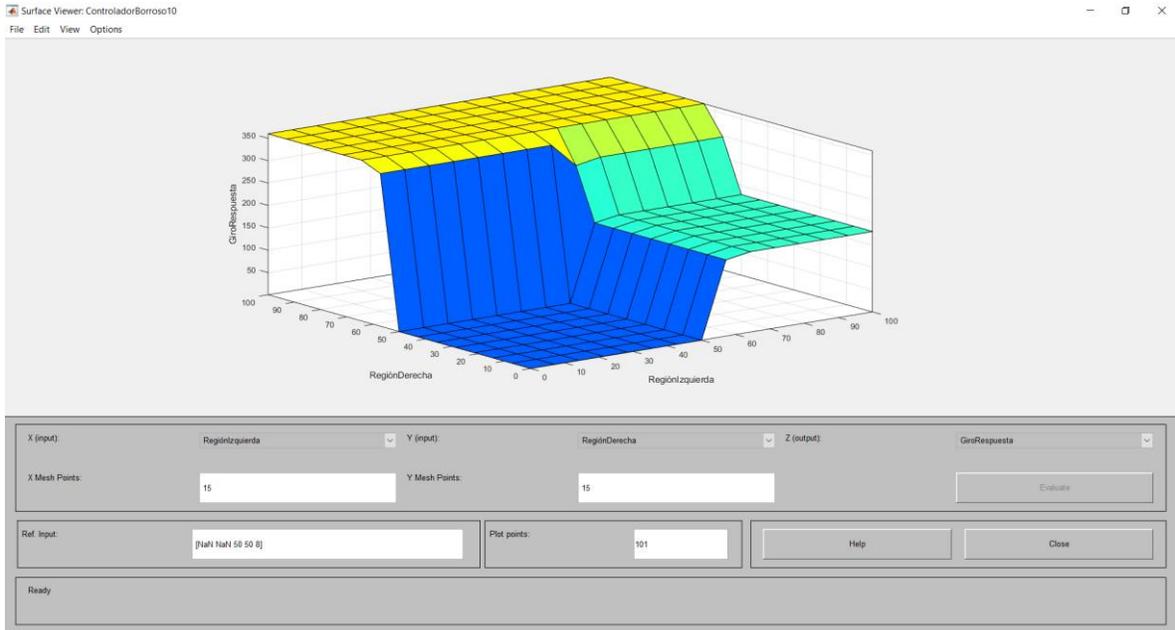


Figura A.16. Superficie generada del controlador borroso 1.

Controlador borroso 2

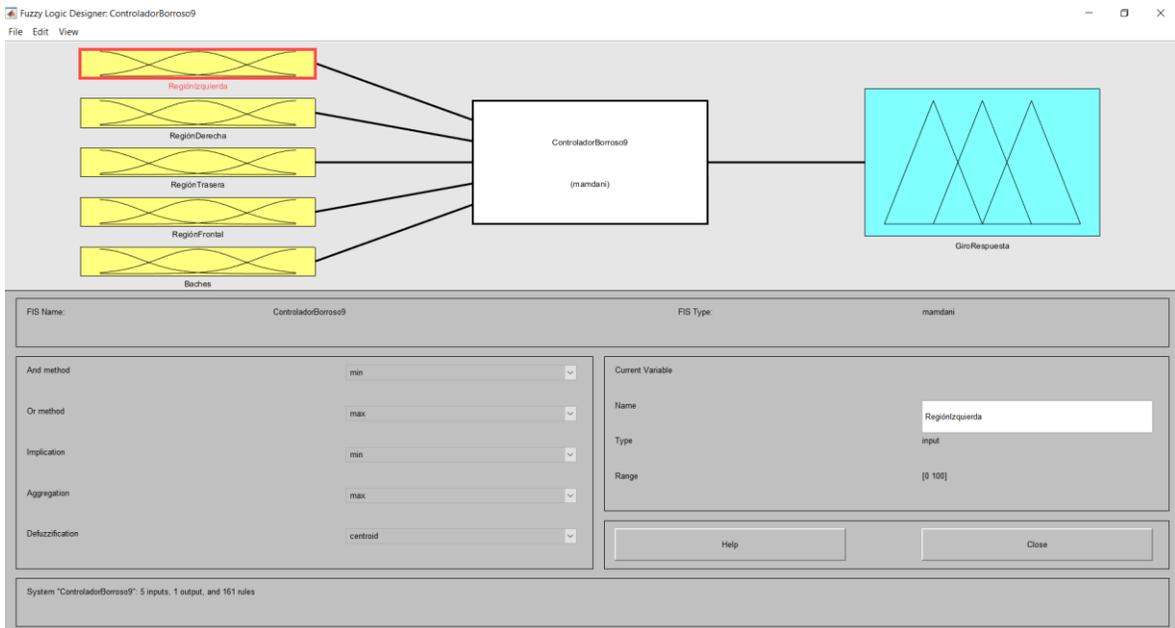


Figura A.17. Controlador borroso 2.

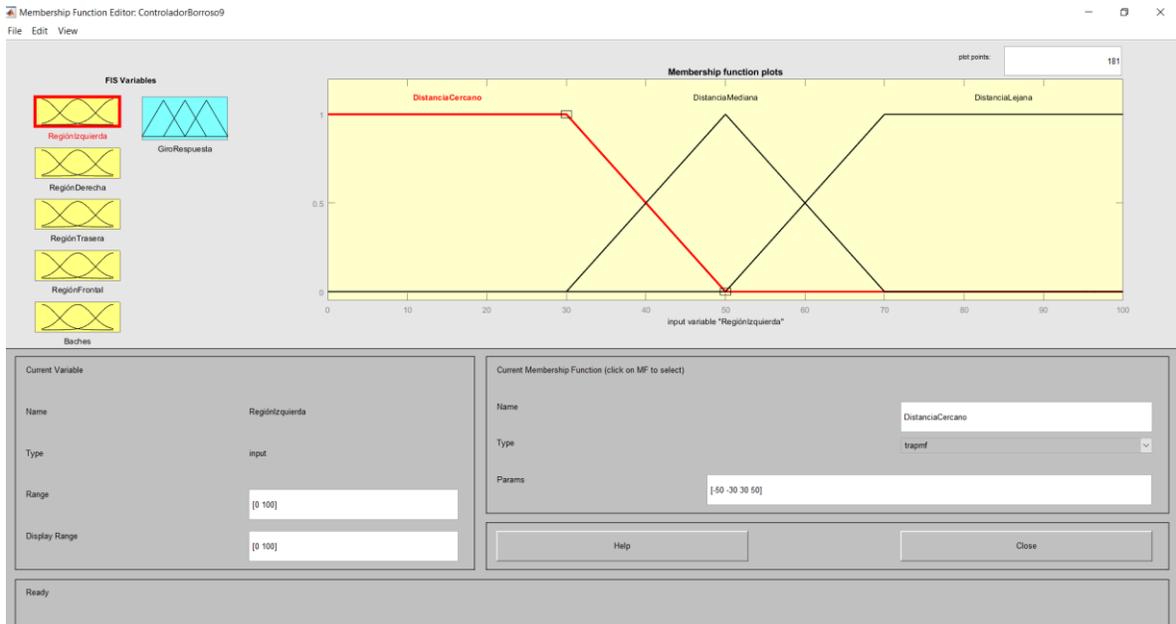


Figura A.18. Configuración de variable de entrada para región izquierda.

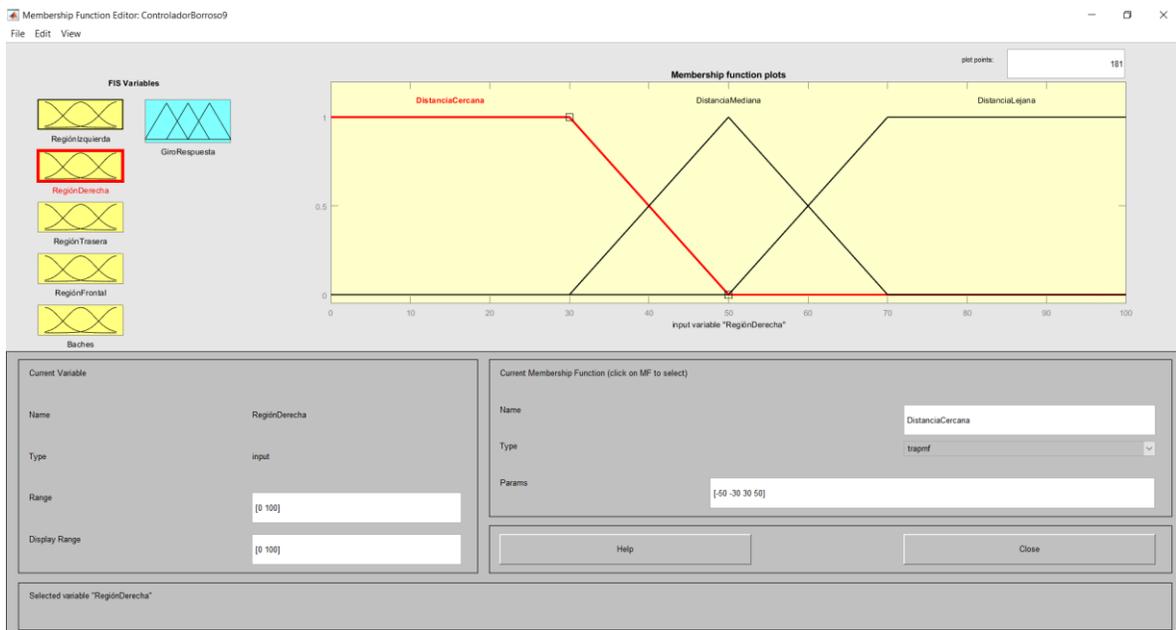


Figura A.19. Configuración de variable de entrada para región derecha.

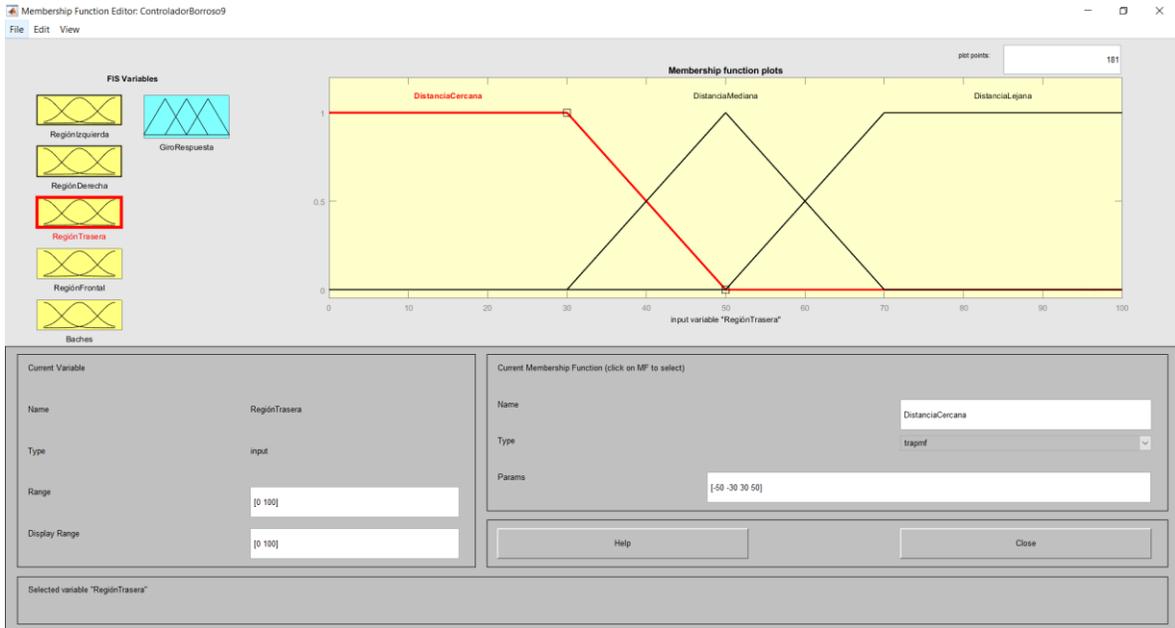


Figura A.20. Configuración de variable de entrada para región trasera.

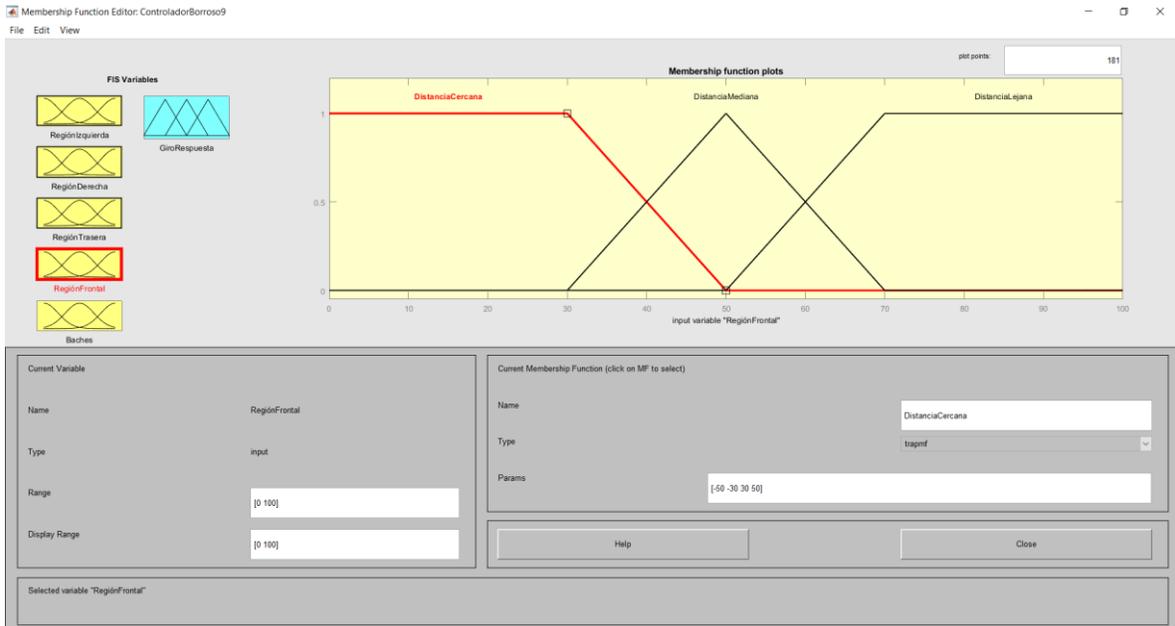


Figura A.21. Configuración de variable de entrada para región frontal.



Figura A.22. Configuración de variable de entrada para baches o escalones.

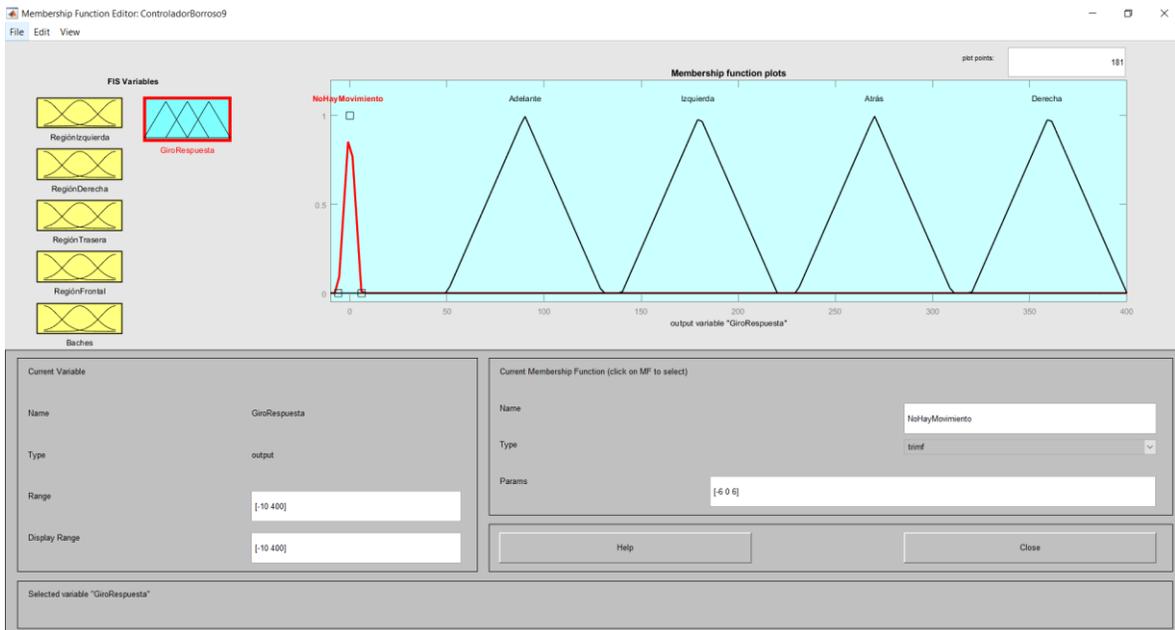


Figura A.23. Configuración para variable de salida correspondiente a los giros de la silla de ruedas.

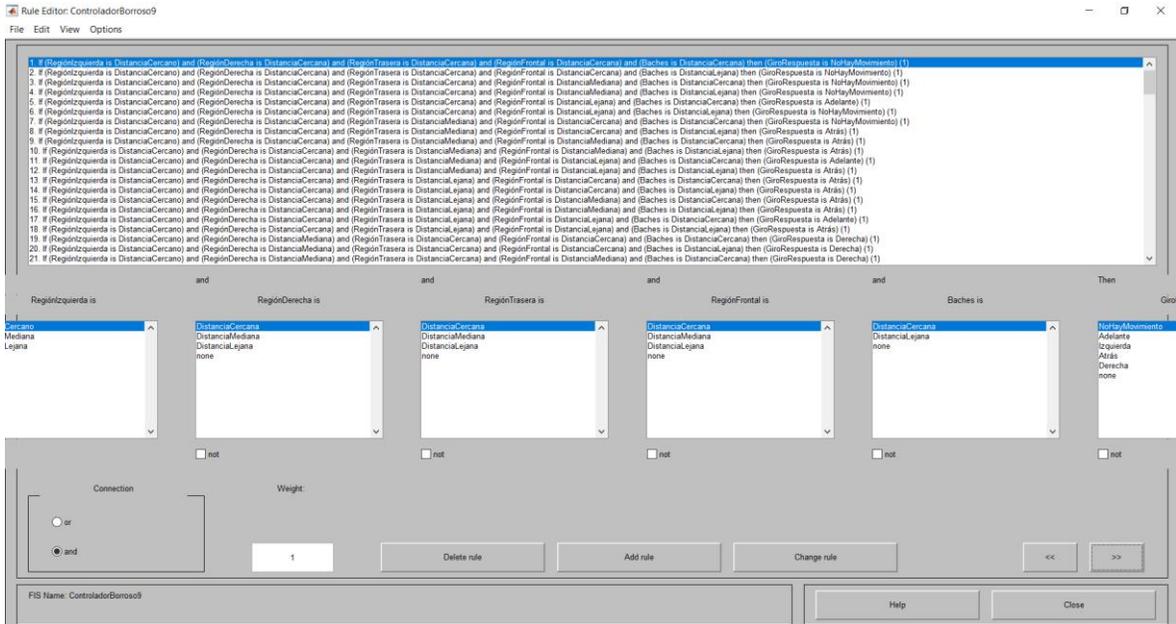


Figura A.24. Desarrollo de reglas borrosas desde 1-21.

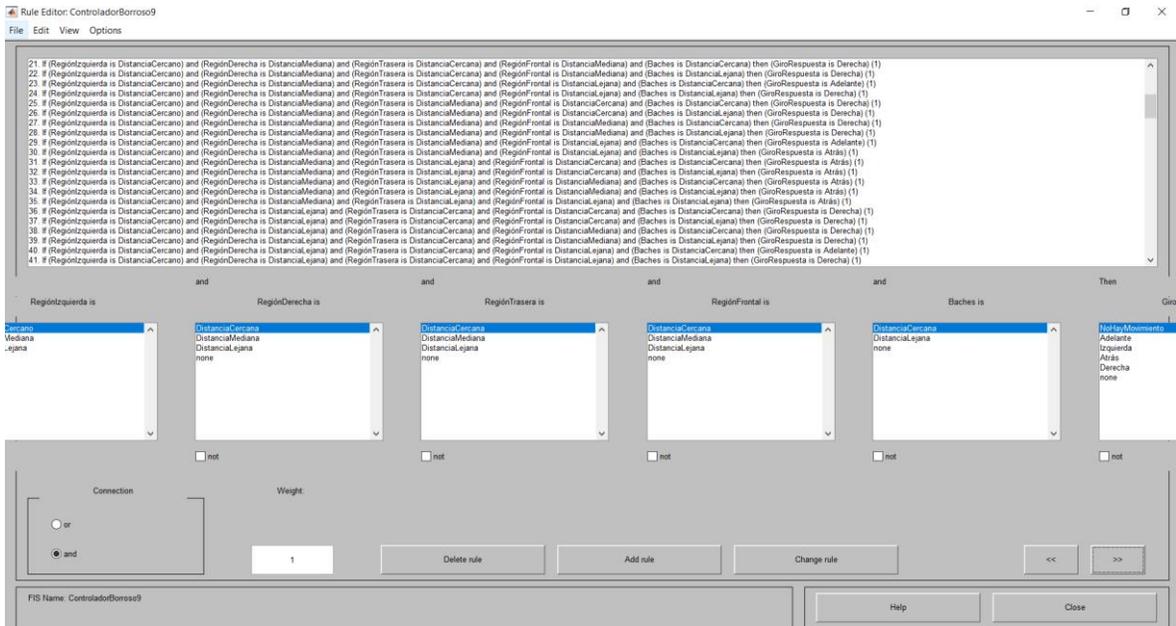


Figura A.25. Desarrollo de reglas borrosas desde 21-41.

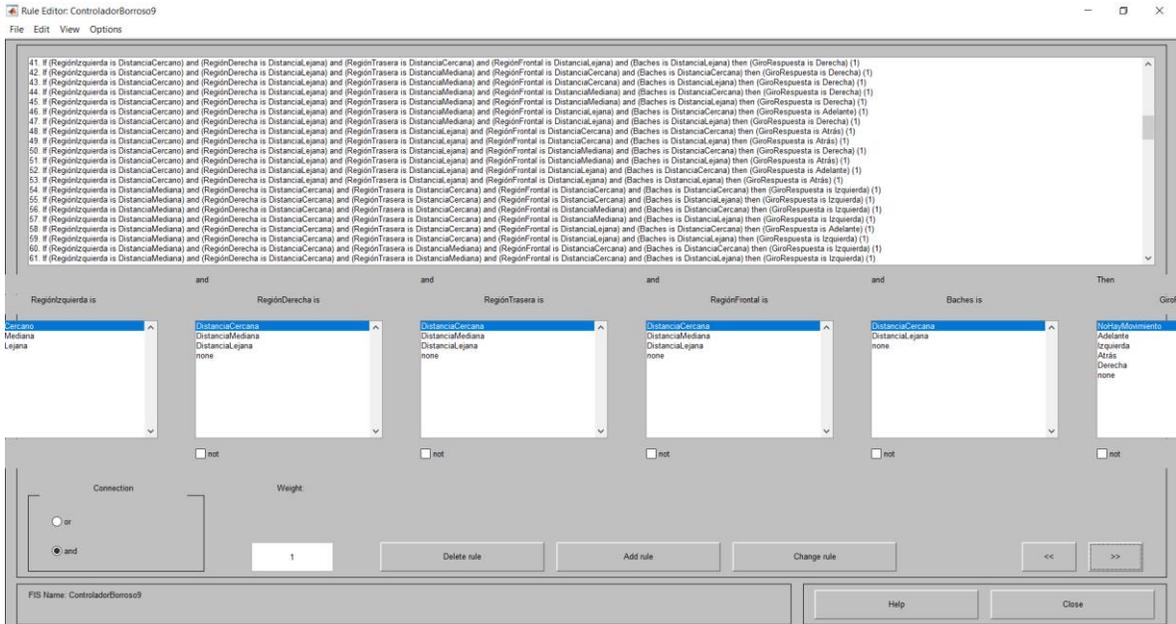


Figura A.26. Desarrollo de reglas borrosas desde 41-61.

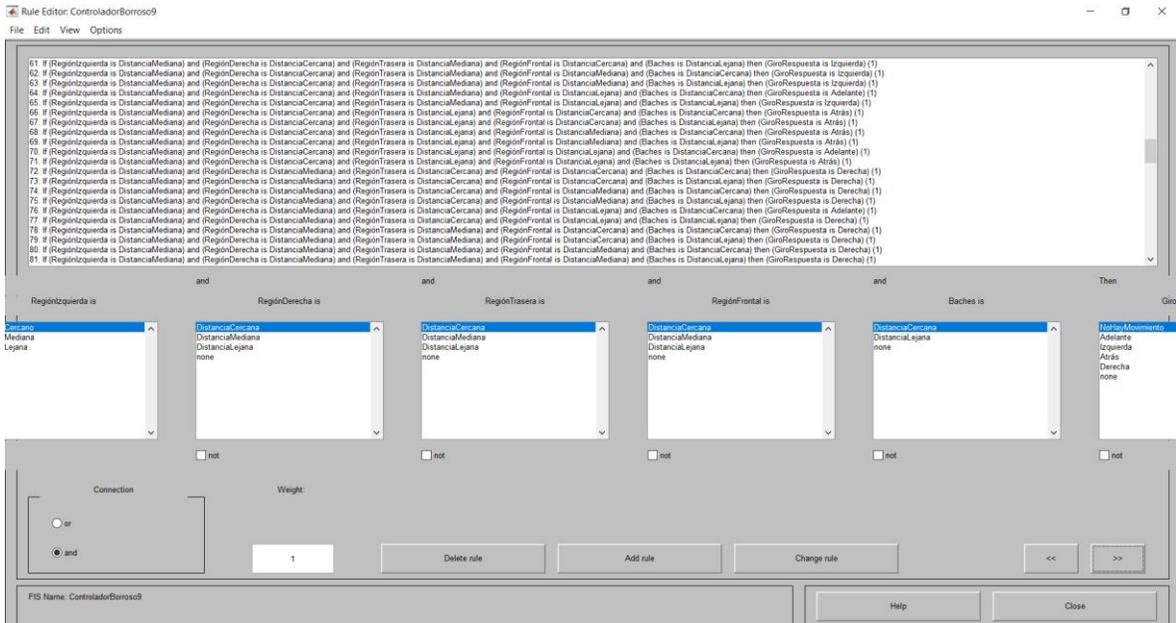


Figura A.27. Desarrollo de reglas borrosas desde 61-81.

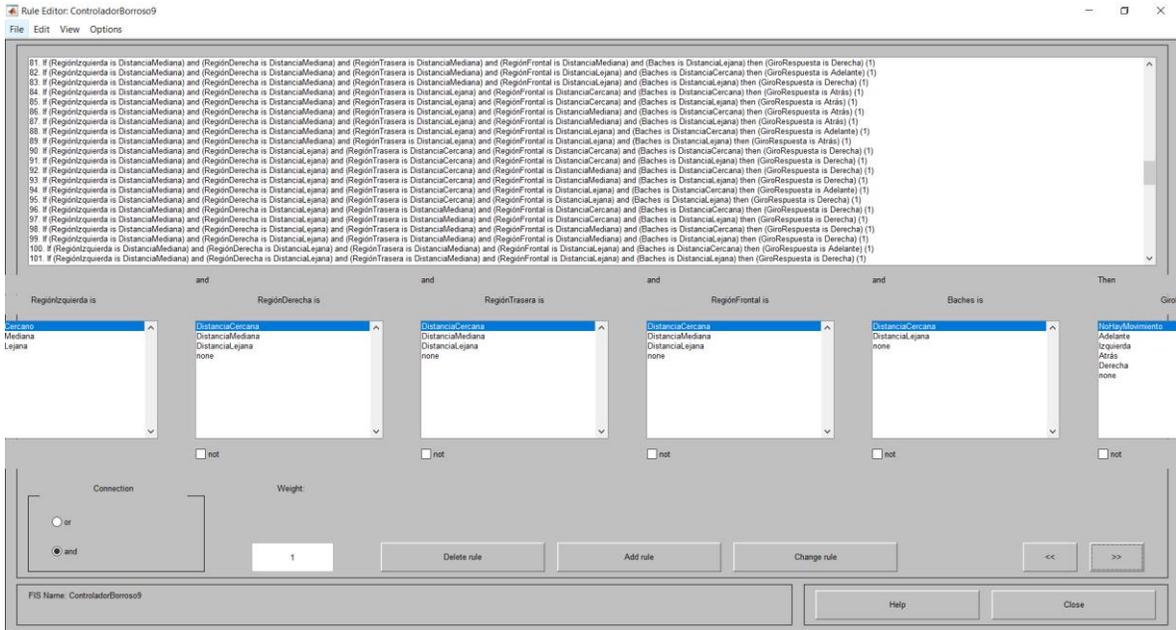


Figura A.28. Desarrollo de reglas borrosas desde 81-101.

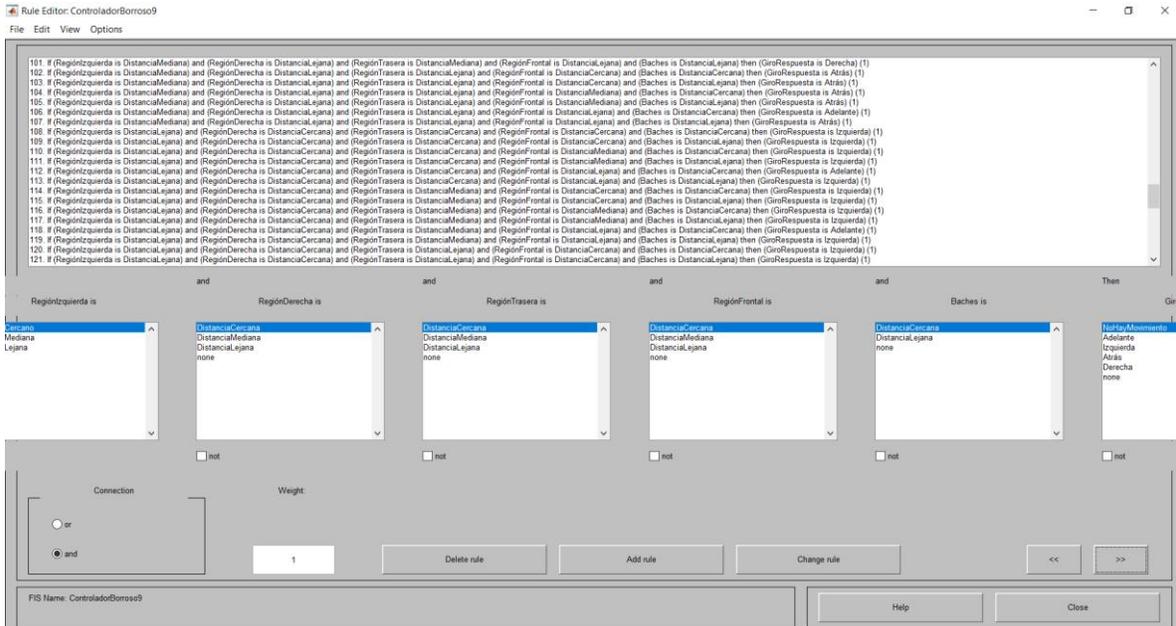


Figura A.29. Desarrollo de reglas borrosas desde 101-121.

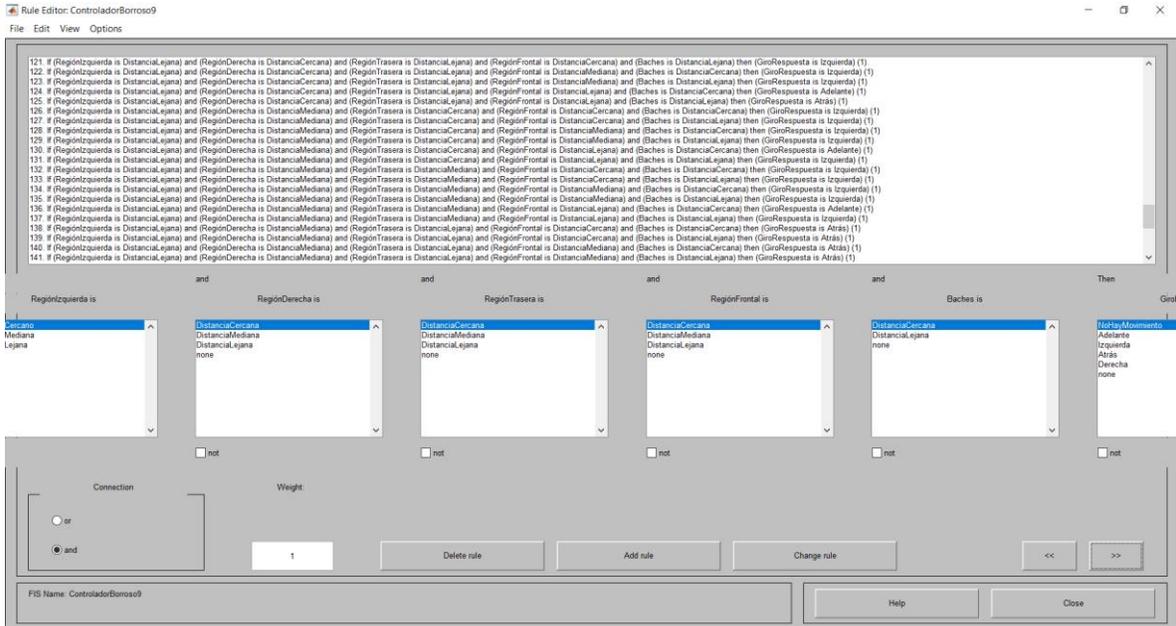


Figura A.30. Desarrollo de reglas borrosas desde 121-141.

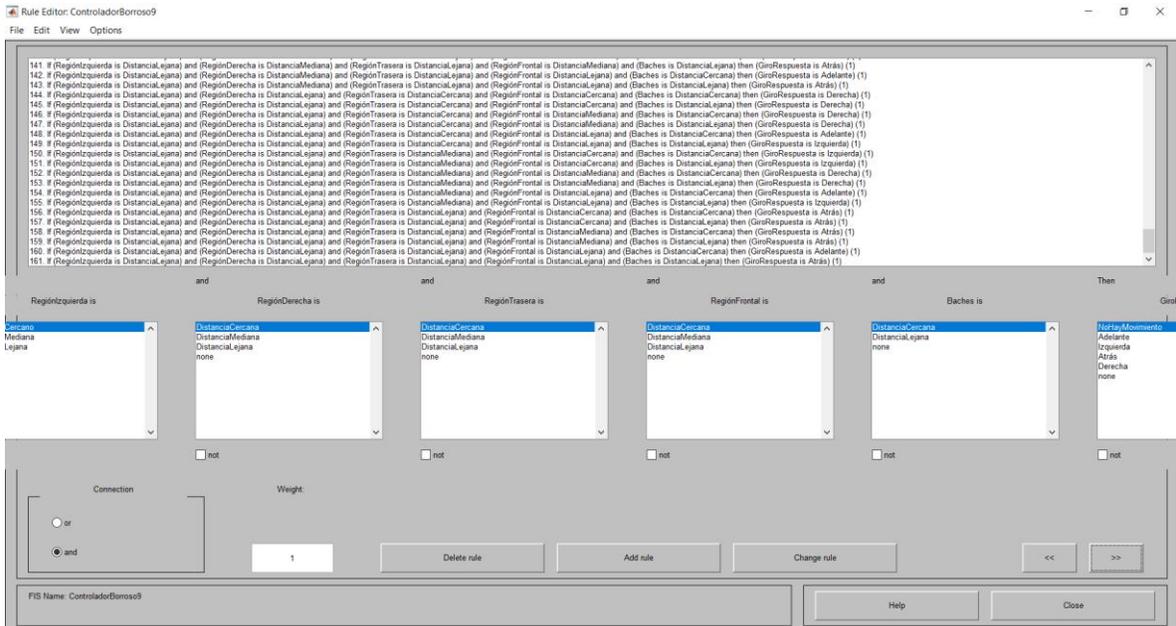


Figura A.31. Desarrollo de reglas borrosas desde 141-161.



Figura A.32. Defuzificación por el método del centroide del controlador borroso 2.

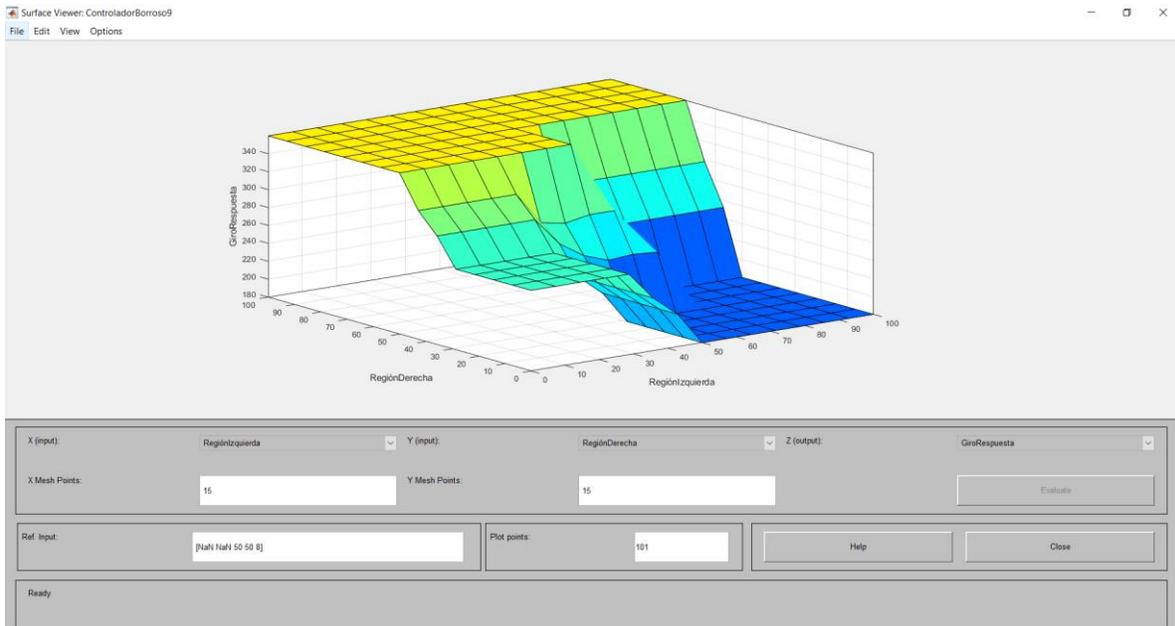


Figura A.33. Superficie generada del controlador borroso 2.

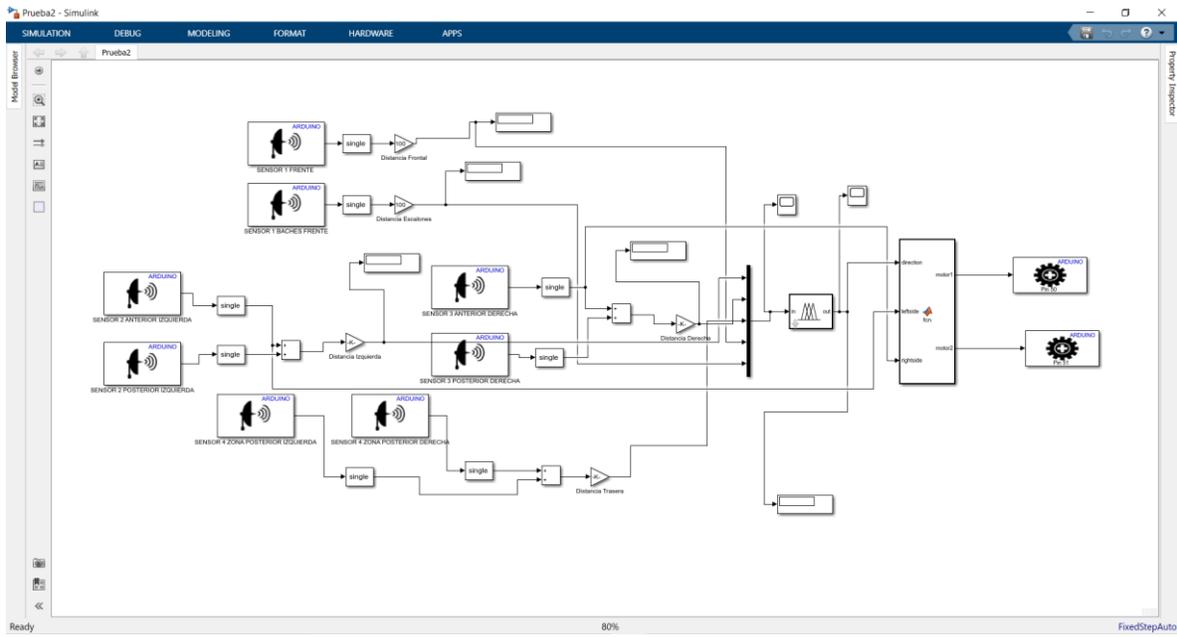
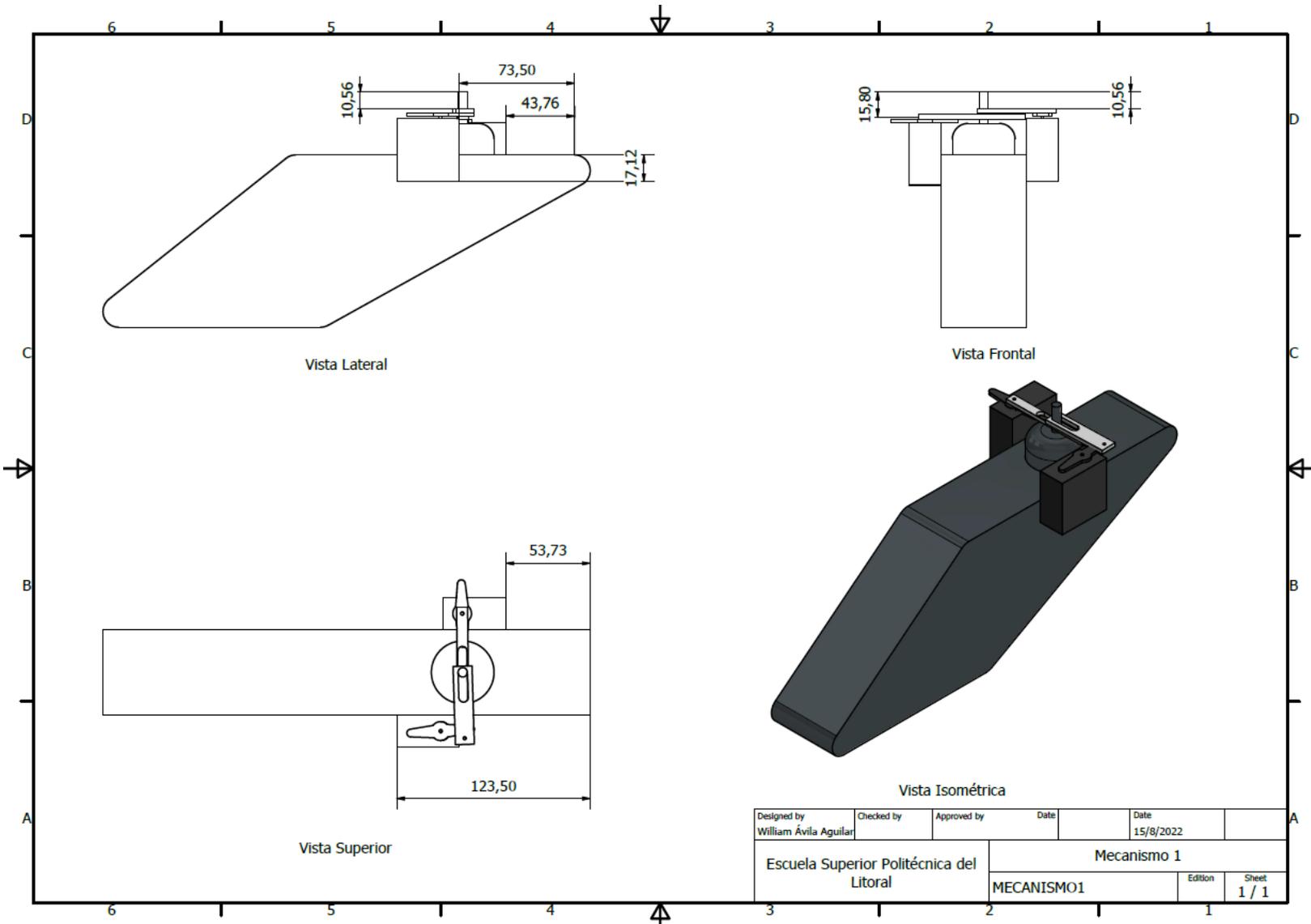
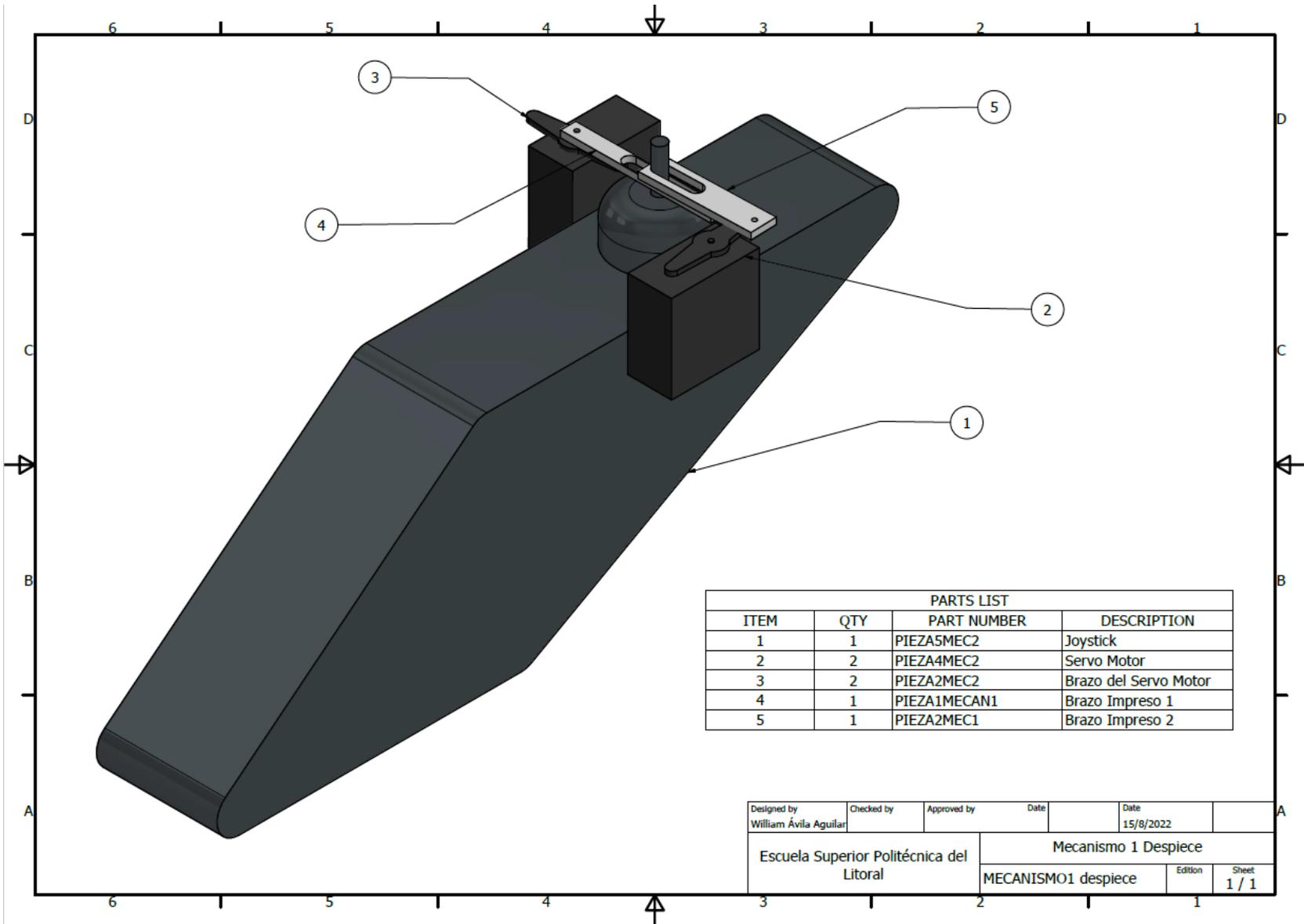


Figura A.34. Implementación del controlador borroso con la tarjeta arduino.

ANEXO B

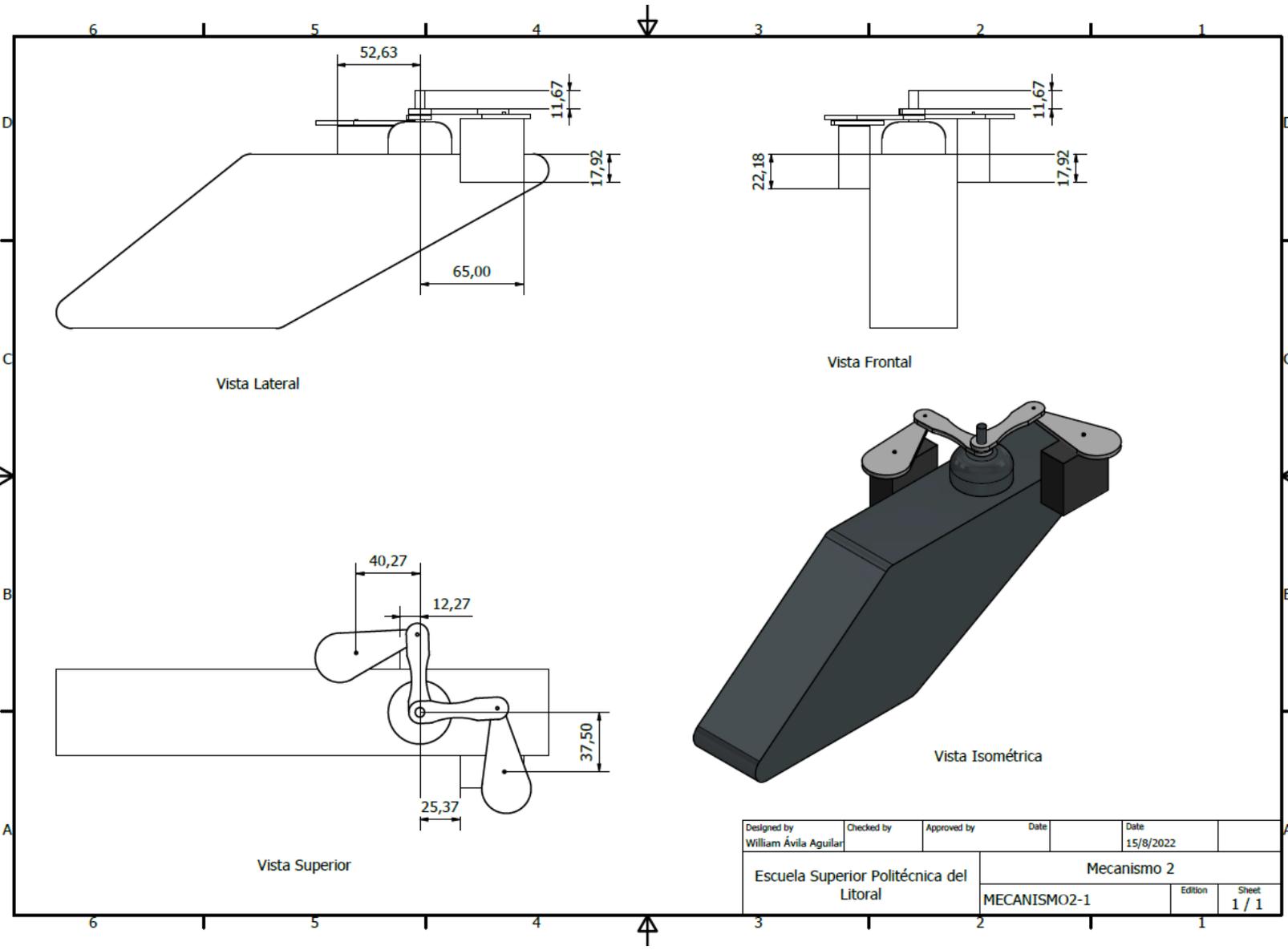
Planos



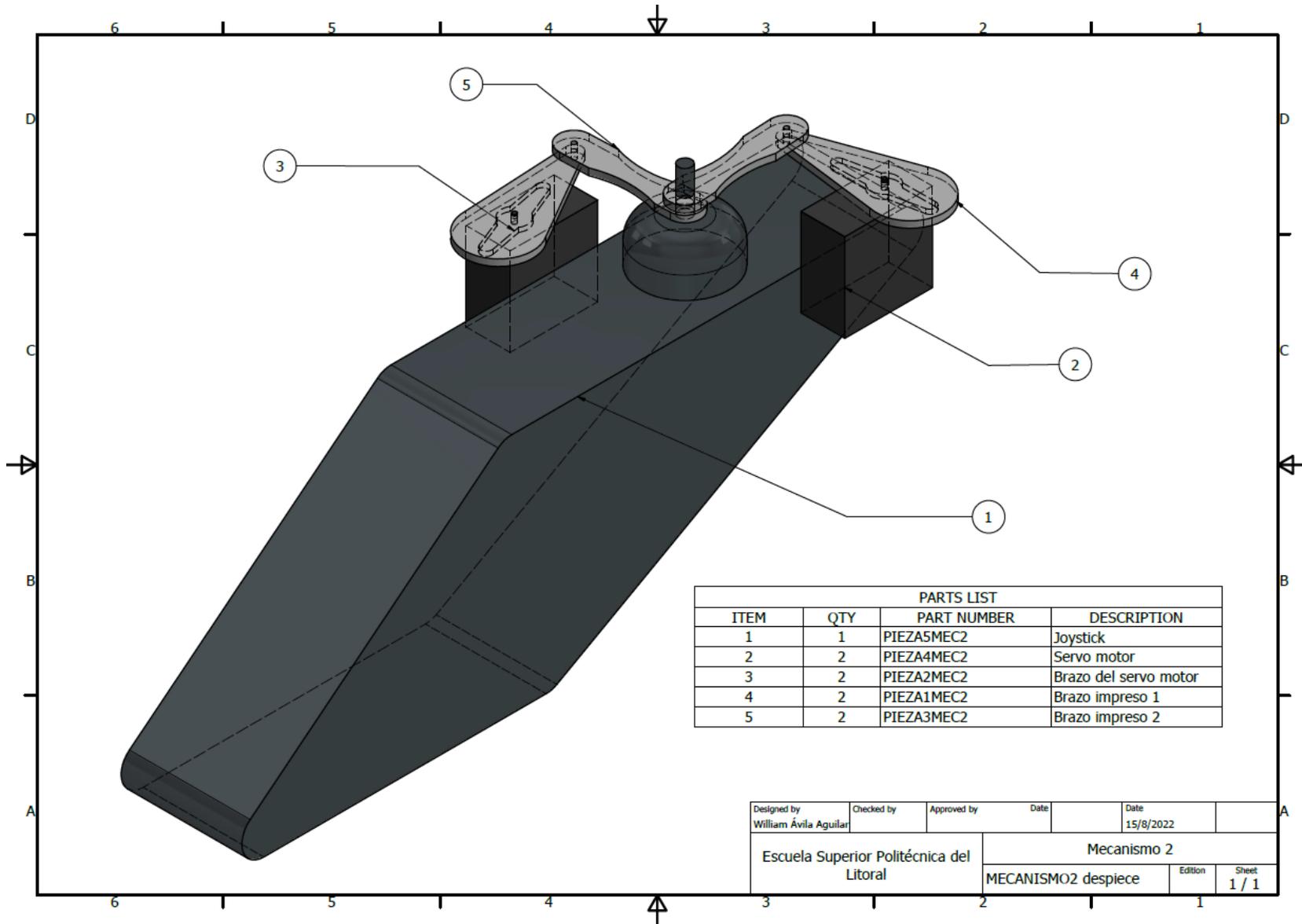


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	PIEZA5MEC2	Joystick
2	2	PIEZA4MEC2	Servo Motor
3	2	PIEZA2MEC2	Brazo del Servo Motor
4	1	PIEZA1MECAN1	Brazo Impreso 1
5	1	PIEZA2MEC1	Brazo Impreso 2

Designed by William Ávila Aguilar	Checked by	Approved by	Date	Date 15/8/2022
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Mecanismo 1 Despiece	
			MECANISMO1 despiece	Edition Sheet 1 / 1

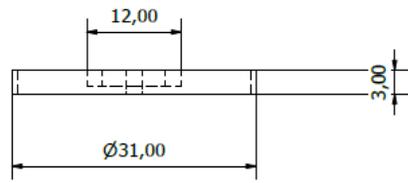


Designed by William Ávila Aguilar	Checked by	Approved by	Date	Date 15/8/2022	
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Mecanismo 2		
			MECANISMO2-1	Edition	Sheet 1 / 1

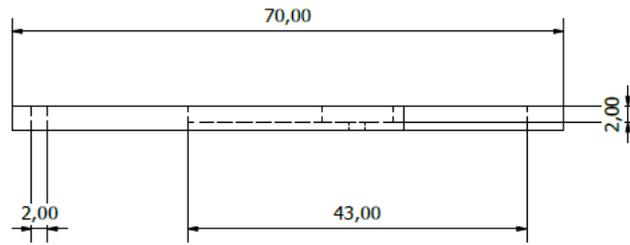


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	PIEZA5MEC2	Joystick
2	2	PIEZA4MEC2	Servo motor
3	2	PIEZA2MEC2	Brazo del servo motor
4	2	PIEZA1MEC2	Brazo impreso 1
5	2	PIEZA3MEC2	Brazo impreso 2

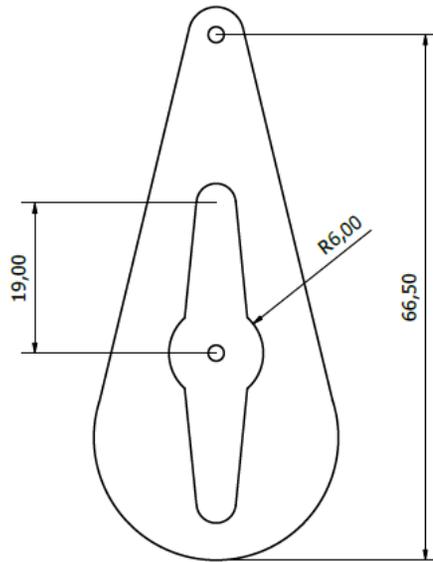
Designed by William Ávila Aguilar	Checked by	Approved by	Date	Date 15/8/2022	
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Mecanismo 2		
			MECANISMO2 despiece	Edition	Sheet 1 / 1



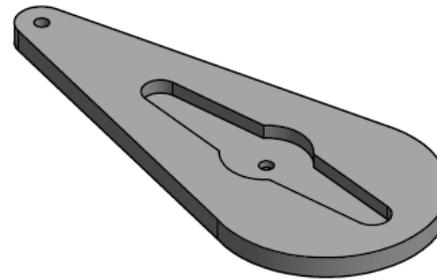
Vista Lateral



Vista Frontal

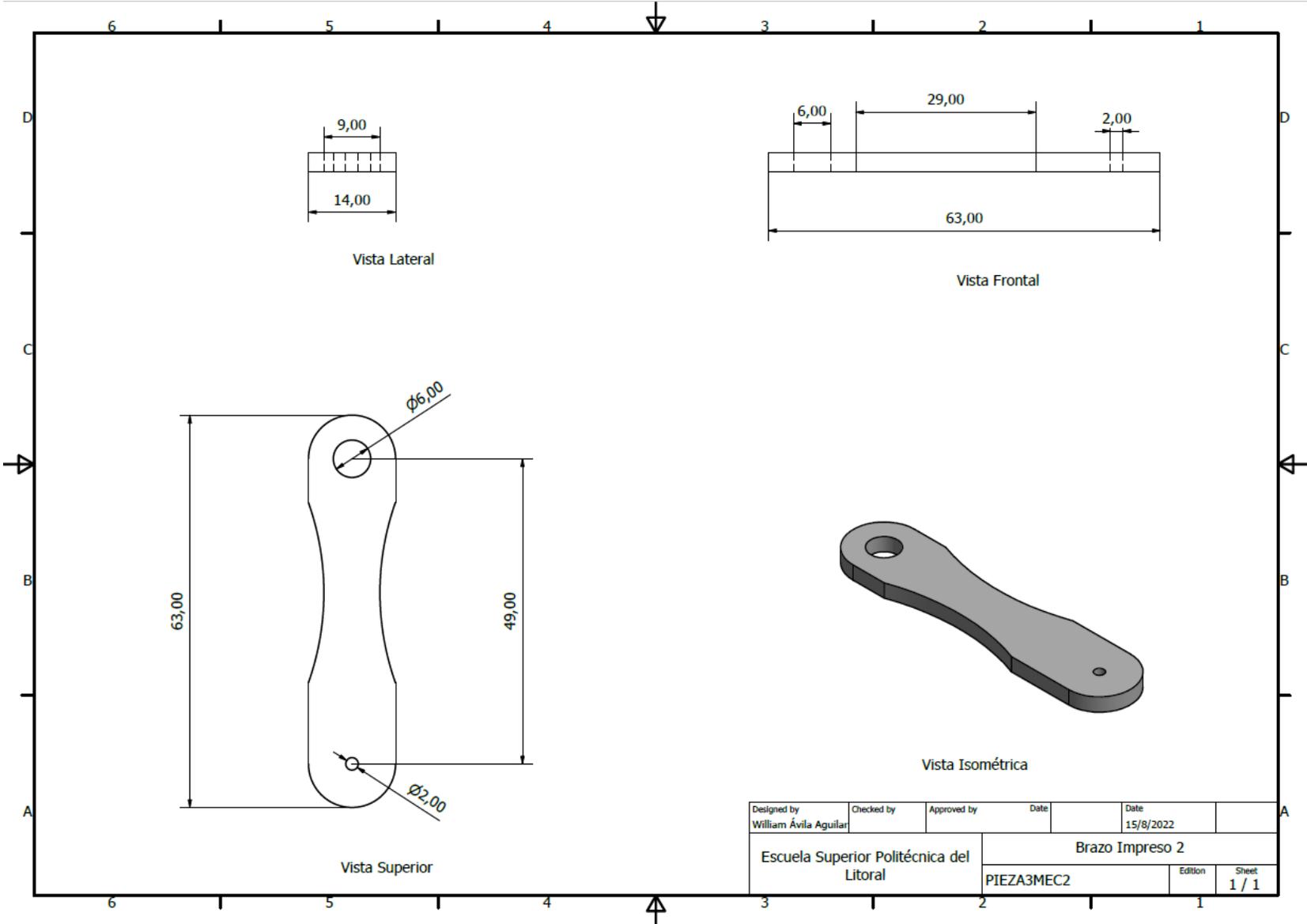


Vista Superior

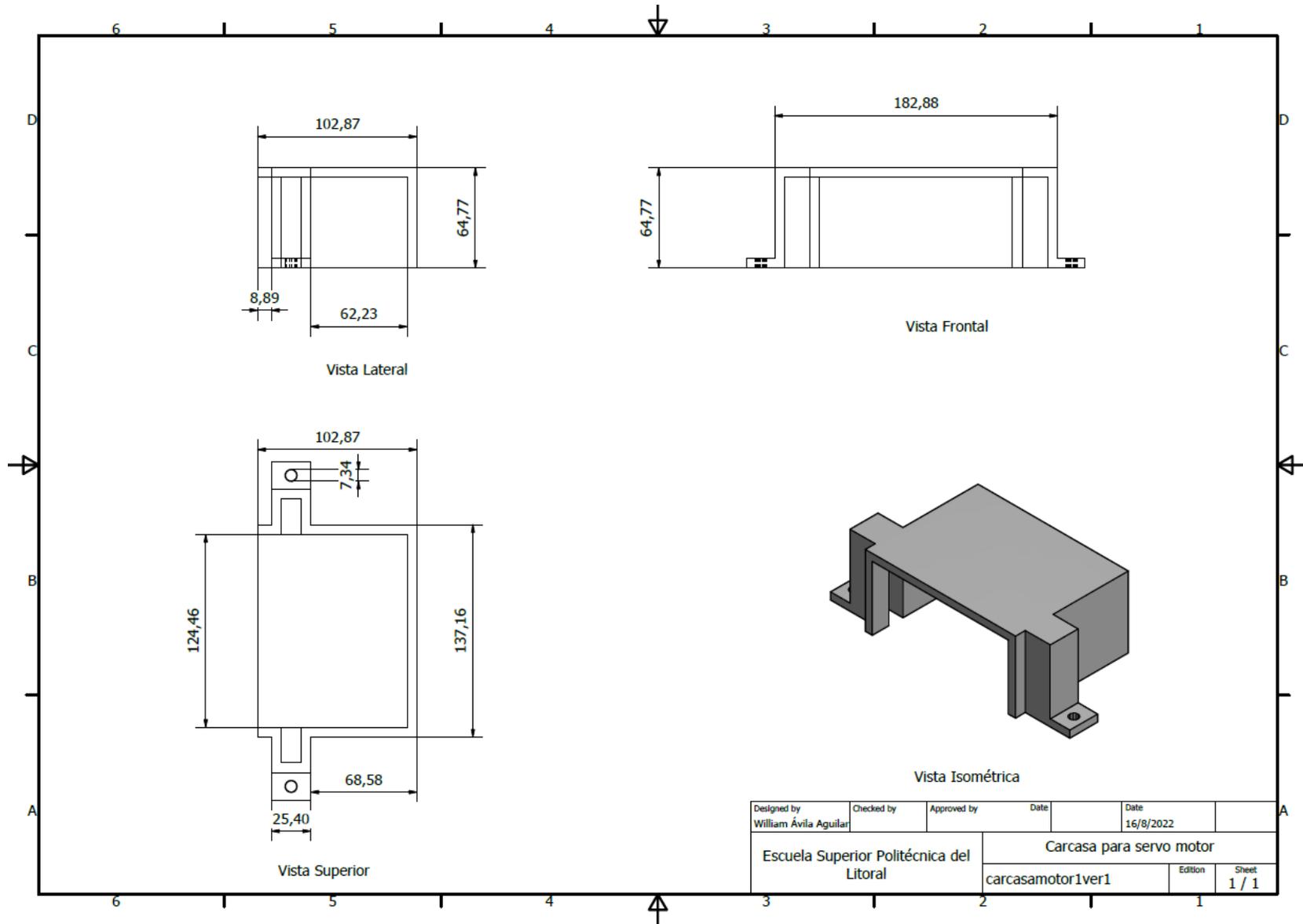


Vista Isométrica

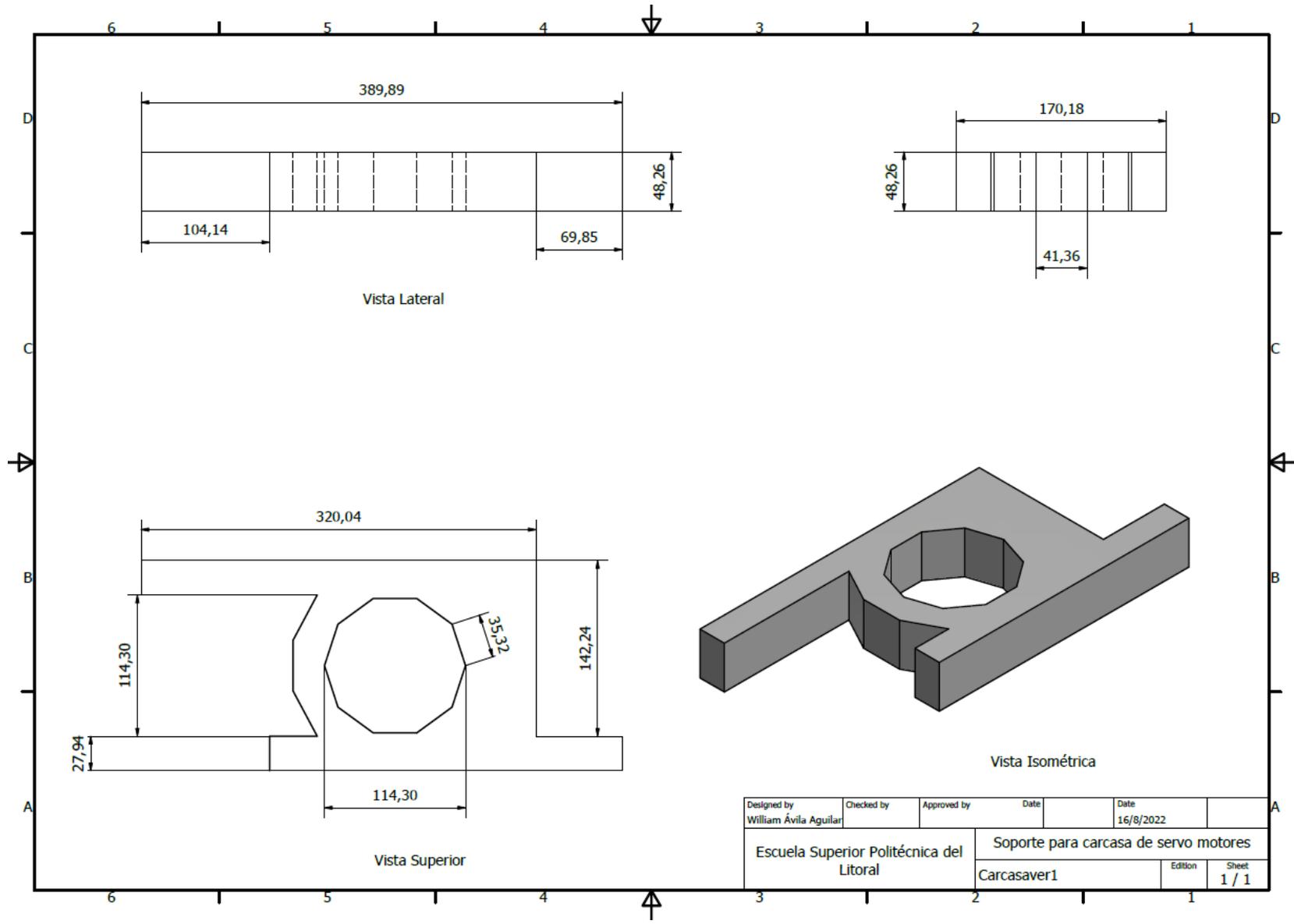
Designed by William Ávila Aguilar	Checked by	Approved by	Date	Date 15/8/2022
Escuela Superior Politécnica del Litoral		Brazo Impreso 1		
PIEZA1MEC2		Edition	Sheet 1 / 1	



Designed by William Ávila Aguilar	Checked by	Approved by	Date	Date 15/8/2022
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Brazo Impreso 2	
			PIEZA3MEC2	Edition Sheet 1 / 1



Designed by William Ávila Aguilar	Checked by	Approved by	Date	Date 16/8/2022	
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Carcasa para servo motor		
			carcasamotor1ver1	Edition	Sheet 1 / 1



Vista Lateral

Vista Superior

Vista Isométrica

Designed by William Ávila Aguilar	Checked by	Approved by	Date	Date 16/8/2022	
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Soporte para carcasa de servo motores		
			Carcasaver1	Edition	Sheet 1 / 1

