

# Modelado, simulación y control inteligente del movimiento de una silla de ruedas

Ph. D Jorge Hurel Ezeta<sup>1</sup>, Ph. D Manuel Peralta Jaramillo<sup>2</sup>, ING. William Ávila Aguilar<sup>3</sup>, Mgs. Carlos Loor Loor<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador. Email: [jhurel@espol.edu.ec](mailto:jhurel@espol.edu.ec)

<sup>2</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador. Email: [jperal@espol.edu.ec](mailto:jperal@espol.edu.ec)

<sup>3</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador. Email: [wavila@espol.edu.ec](mailto:wavila@espol.edu.ec)

<sup>4</sup>Universidad Técnica de Machala, Ecuador. Email: [cloor@utmachala.edu.ec](mailto:cloor@utmachala.edu.ec)

## Resumen

Actualmente las personas que hacen uso de una silla de ruedas manual o eléctrica necesitan la ayuda de terceras personas para ejecutar sus actividades diarias. En este trabajo se usó la lógica difusa para desarrollar e implementar en una silla de ruedas eléctrica dos controladores borrosos que permitan evitar obstáculos y escalones con el fin de que las personas puedan disponer de plena autonomía e independencia. Por medio del enfoque lagrangiano y dinámica de sistemas multicuerpo se simuló su respuesta al movimiento sin la implementación del control borroso. Los tiempos de respuesta tanto por el enfoque lagrangiano, dinámica de sistemas multicuerpo y control borroso fueron 20, 27 y 24 segundos, respectivamente y el controlador más eficiente en recursos computacionales fue el controlador borroso 1 quien requirió el 60,4% de su capacidad de memoria interna de la tarjeta Arduino utilizada en comparación con el controlador borroso 2 quien usó el 80,4%.

**Palabras clave:** Lógica Borrosa; Simscape; Simulink; Eficiencia; Recursos computacionales.

## Abstract

At the moment, the people whom use an electric or manual wheelchair need help from a third person to develop their daily activities. In this work, two fuzzy logic controllers for the planning of an electric wheelchair increasing their mobility avoiding obstacles and stairs were developed. The lagrangian and multibody dynamic system approach were used to simulate the movement response from the wheelchair without using fuzzy control. The response times using the lagrangian, multibody dynamic system and fuzzy logic approach were 20, 27 and 24 seconds, respectively and the most effective controller saving up computational resources was the fuzzy controller 1, which required its 60,4% arduino board internal memory capacity compared with the second controller which used 80,4%.

**Keywords:** Fuzzy Logic; Simscape; Simulink; Efficiency; Computer resources.

## 1. Introducción

Actualmente, la vigencia de un modelo de inclusión y derechos humanos define a la discapacidad de acuerdo con la relación que existe entre el individuo y su entorno, así como la interacción entre las personas con deficiencias y 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 [1]. Con el paso del tiempo, 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 y mayores de edad para que puedan realizar sus actividades diarias [2]. En la parálisis que es el problema más grande, una persona

discapacitada requiere necesariamente el uso de una silla de ruedas [3]. Otro problema común son las patologías en el hombro de las personas que usan sillas de ruedas manuales debido a los movimientos restrictivos y prevalencia de dolor; aproximadamente ocurre entre el 33 al 62% de individuos [4], por lo cual es deseable el uso de una silla de ruedas eléctrica. En la actualidad, la brecha entre el campo de la robótica y la implementación de estas tecnologías en las sillas de ruedas cada vez se vuelve más pequeña, por lo que buscar soluciones que mejoren la calidad de vida de estas personas es un reto hoy en día. Una de las aplicaciones que se tienen en el control de la planeación en las sillas de ruedas es la implementación de algoritmos por redes neuronales los cuales tratan factores de incertidumbre en dichas trayectorias [5].

Escenarios dinámicos que cuentan con numerosos obstáculos son casos en los que una silla de ruedas eléctrica autónoma es necesaria con el fin de evitar colisiones y proteger al usuario [6]. Otra aplicación importante y gran deseada 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 [7]. Los ejemplos citados anteriormente corresponden al control no lineal de una silla de ruedas eléctrica [8]. Un método el cual brinda gran facilidad para resolver estos sistemas no lineales y altamente complejos es la lógica borrosa. 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 [9]. El presente trabajo muestra la implementación de un control inteligente aplicando lógica borrosa en una silla de ruedas eléctrica con el objetivo de que evite obstáculos de tal forma que el dispositivo sea completamente autónomo. Este trabajo está dividido en cuatro secciones: introducción, metodología, resultados y finalmente conclusiones.

## 2. Metodología

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 [10]. La importancia de este dispositivo es ayudar a la comunidad correspondiente a la tercera edad y discapacitada para poder moverse de un lugar a otro con el fin de desarrollar sus actividades rutinarias en el día a día independientemente [11]. Las consideraciones físicas corresponden a postura, fuerza, sensación, agudeza visual, percepción y eficiencia [12].



Figura 1. Silla de ruedas eléctrica Jazzy Jet 3.

En el presente trabajo, se utilizó como dispositivo de prueba una silla de ruedas eléctrica Jazzy Jet 3 la cual usa dos baterías de Litio – ion de 12 Voltios cada una

como se puede observar en la figura 1. Para que la silla de ruedas pueda ejecutar su movimiento se usa un controlador de velocidad y a su vez dos servos motores independientes que están acoplados a cada rueda. El objetivo principal de este trabajo es que la silla de ruedas eléctrica por medio del uso de un controlador borroso pueda evitar obstáculos y hacerlo de forma autónoma. Los fundamentos matemáticos utilizados para obtener la respuesta dinámica de una silla de ruedas eléctrica fueron por medio del enfoque lagrangiano, el cual usa las siguientes coordenadas generalizadas:

$$\vec{q} = [x \ y \ \theta \ \phi_1 \ \phi_2]^T \quad (1)$$

El vector  $\vec{q}$  está completamente definido por dichas variables en donde  $x, y$  representa la posición en dichas direcciones,  $\theta$  representa el cambio de posición angular con respecto a un marco de referencia inercial ubicado en el centro de masa de la silla de ruedas y  $\phi_1, \phi_2$  representan los cambios de posición angular de cada rueda como se puede observar en la figura 2.

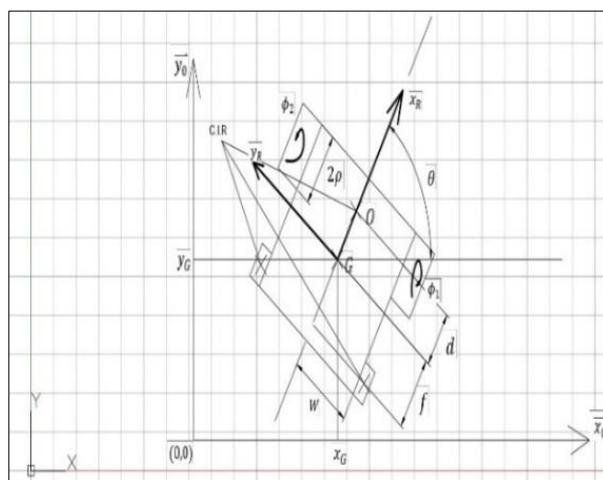


Figura 2. Coordenadas generalizadas involucradas en el análisis dinámico de la silla de ruedas eléctrica.

Tomando en cuenta condiciones de no deslizamiento, se expresa cuatro condiciones no holonómicas:

$$\dot{x} + W\dot{\theta} \cos \theta - \rho\dot{\phi}_1 \cos \theta = 0 \quad (2)$$

$$\dot{y} + W\dot{\theta} \sin \theta - \rho\dot{\phi}_1 \sin \theta = 0 \quad (3)$$

$$\dot{x} - W\dot{\theta} \cos \theta - \rho\dot{\phi}_2 \cos \theta = 0 \quad (4)$$

$$\dot{y} - W\dot{\theta} \sin \theta - \rho\dot{\phi}_2 \sin \theta = 0 \quad (5)$$

Con dichas restricciones, despejando las variables independientes  $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$  que representan los grados de libertad de la silla de ruedas eléctrica se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{\rho}{2} \begin{bmatrix} (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) \cos\theta \\ (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) \sin\theta \\ -(\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_1)/W \end{bmatrix} \quad (6)$$

En donde,  $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \rho, W$  representa la rapidez angular del centro de la rueda delantera derecha, la rapidez angular del centro de la rueda delantera izquierda, el radio de las llantas delanteras y el ancho de la silla de ruedas, respectivamente. Estas restricciones no holonómicas se pueden expresar en la forma:

$$C(\vec{q})\dot{\vec{q}} = 0 \quad (7)$$

En donde,

$$\dot{\vec{q}} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta} \ \dot{\phi}_1 \ \dot{\phi}_2]^T \quad (8)$$

$$C(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & \frac{\rho}{2} & -\frac{\rho}{2} \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\rho}{2W} & \frac{\rho}{2W} \end{bmatrix} \quad (9)$$

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

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial \dot{\vec{q}}} \right] - \frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial \vec{q}} - C(\vec{q})^T \vec{\lambda} = \vec{Q}_i \quad (10)$$

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,  $L$  representa el lagrangiano que indica la diferencia entre la energía cinética y potencial total del sistema y  $\vec{\lambda}$  representa los multiplicadores de lagrange correspondientes a las restricciones no holonómicas.

Aplicando las ecuaciones Euler – Lagrange con sus multiplicadores correspondientes debido a las restricciones no holonómicas y tomando en cuenta que la energía potencial se mantiene constante, se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\vec{q}}} \right] - \frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial \vec{q}} - C(\vec{q})^T \vec{\lambda} &= \vec{T} \\ &= [0 \ 0 \ 0 \ \tau_1 \ \tau_2]^T \quad (11) \end{aligned}$$

En donde,  $L$  y  $\tau_1, \tau_2$  se definen como el lagrangiano y los torques, respectivamente, que se deben aplicar a las llantas delanteras al accionar el joystick de la silla de ruedas eléctrica el cual regula el movimiento.

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. Con dichas restricciones, dicho sistema se puede expresar como:

$$M(\vec{q})\ddot{\vec{q}} + B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) - C^T(\vec{q})\vec{\lambda} = \vec{T} \quad (12)$$

En donde,

$$M(\vec{q}) = \begin{bmatrix} m_T & 0 & -m_B d \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & m_T & m_B d \cos\theta & 0 & 0 \\ -m_B d \sin\theta & m_B d \cos\theta & I_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{yy}^b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy}^b \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) = -m_B d \dot{\theta}^2 \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C(\vec{q}) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & \frac{\rho}{2} & -\frac{\rho}{2} \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\rho}{2W} & \frac{\rho}{2W} \end{bmatrix} \quad (15)$$

En donde  $m_T, m_B, d, I_{yy}^b, I_T$  representa la masa total de la silla de ruedas, la masa del chasis de la silla de ruedas, la distancia desde el centro de la línea que une las ruedas delanteras al centro de masa del chasis, la inercia del chasis de la silla de ruedas alrededor de un plano perpendicular al eje y la inercia total de la silla de ruedas. Este sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden conlleva a encontrar ocho incógnitas, estas son  $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\theta}, \ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ .

Teniendo como referencia sus ecuaciones gobernantes por medio del enfoque lagrangiano, se puede modelar la silla de ruedas eléctrica por medio de la dinámica de sistemas multicuerpo. En la figura 3 se puede observar la clasificación de los cuerpos principales que componen a la silla ruedas y son: chasis (1), dos juntas traseras (2), dos llantas delanteras (3) y dos llantas traseras (4).

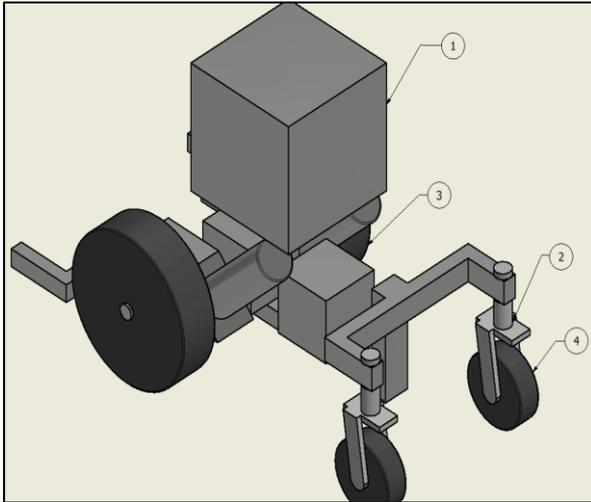


Figura 3. Sistema de cuerpos rígidos acoplados.

Teniendo en cuenta las propiedades físicas de los cuerpos rígidos que corresponden a la silla de ruedas eléctrica, se procedió a modelar los tipos de juntas que existe entre cada componente. El programa que se utilizó para modelar los tipos de juntas y acoplar cada componente con respecto a otro fue Simscape de matlab. Así mismo, matrices de rotación fueron necesarias para ubicar a la silla de ruedas eléctrica con respecto a un plano que sirvió como el escenario de trabajo.

Las condiciones impuestas anteriormente en el modelado por dinámica de sistemas multicuerpo corresponden al movimiento de la silla de ruedas eléctrica y sirvieron como comparativa en la eficacia con la aplicación del control borroso para evitar obstáculos. Para ello, el uso de la lógica borrosa permitió desarrollar un controlador que cumpla con dicho objetivo. El funcionamiento de este controlador borroso comprende en detectar por medio de sensores ultrasónicos las distancias que existe entre un objeto próximo a la silla de ruedas. El algoritmo implementado se puede observar en la figura 4.

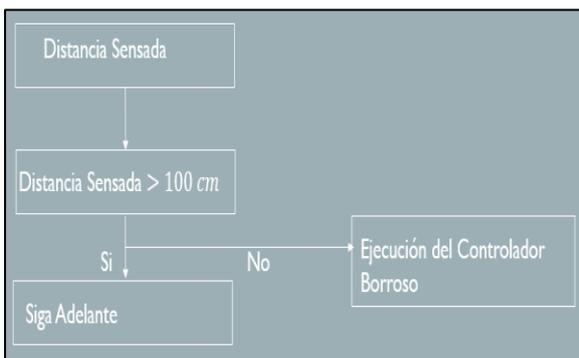


Figura 4. Algoritmo utilizado en la silla de ruedas eléctrica para evitar obstáculos.

El método para la elaboración del controlador borroso fue el de Mamdani cuyas variables de entrada fueron denominadas región izquierda, derecha, trasera, frontal y baches. La variable de salida corresponde al giro que realiza la silla de ruedas eléctrica dependiendo de las distancias obtenidas por los sensores. Las variables de entrada región derecha, izquierda, región frontal y trasera fueron evaluadas en dos rangos, una de ellas correspondió a ‘Distancia Cercana’ con un rango entre [0 - 50] cm y el otro rango correspondió a ‘Distancia Lejana’ el cual está comprendido entre [50 - 100] cm. La variable de entrada ‘Baches’ correspondió a la evasión de escalones comprendida entre [0 - 10] cm definido como ‘Distancia Cercana’ y [12.5 - 16] cm como ‘Distancia Lejana’. La variable de salida ‘Giro Respuesta’ correspondió a un intervalo de ángulos que dependen de la dirección hacia donde gira la silla de ruedas cuando detecta un obstáculo. Estos intervalos están definidos como ‘No Hay Movimiento’, ‘Adelante’, ‘Izquierda’, ‘Atrás’, ‘Derecha’. Finalmente, para que se pueda transformar los valores de los conjuntos borrosos a valores reales de la respuesta de salida se utilizó el método de defuzzificación del centroide. El diseño del controlador borroso 1 se puede observar en la figura 5.

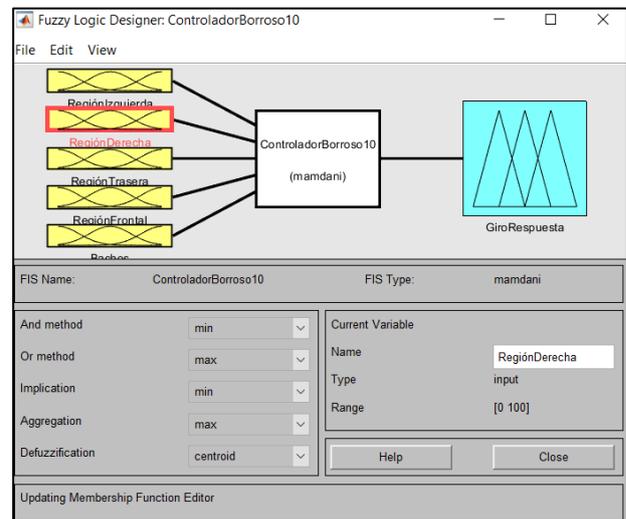


Figura 5. Controlador Borroso 1.

El controlador borroso 2 utilizado en este proyecto para verificar la eficiencia en la evasión de obstáculos tenía a diferencia del controlador borroso 1, tres rangos con respecto a las variables de entrada, ‘Región Izquierda’, ‘Región Derecha’, ‘Región Trasera’, ‘Región Frontal’ los cuales se los definió como ‘Distancia Cercana’, ‘Distancia Media’, ‘Distancia Lejana’ y cuyos rangos fueron [0 - 50] cm, [30 - 70] cm y [50 100] cm, respectivamente. Los rangos de salida con respecto a la variable de salida ‘Giro Respuesta’ fueron los mismos, así como también el método de defuzzificación. El diseño del controlador borroso 2 se puede observar en la figura 6.

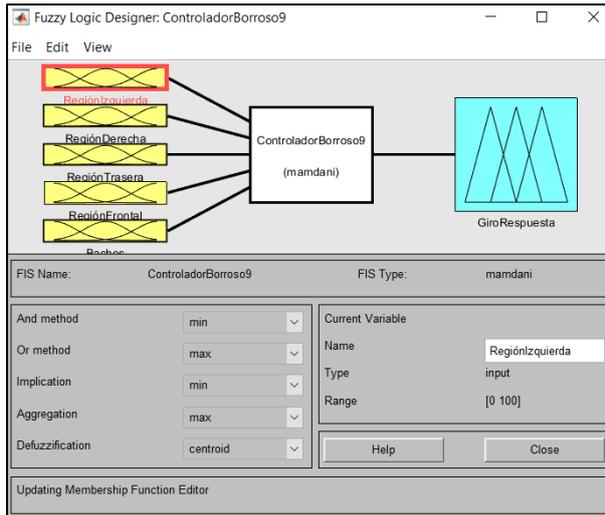


Figura 6. Controlador Borroso 2.

Para la implementación del control borroso se acoplaron dos sensores ultrasónicos en el lado derecho, izquierdo y trasero de la silla de ruedas eléctrica dando un total de 6 sensores en conjunto con una tarjeta Arduino y una extensión para puertos digitales con la utilización del programa Simulink. Así mismo se adaptó un solo sensor en la parte frontal de la silla de ruedas eléctrica con el fin de detectar distancias mayores o menores a 100 cm y un sensor en la parte inferior de la silla de ruedas eléctrica donde reposan los pies del usuario para detectar baches. Todas las conexiones de los sensores ultrasónicos se las realizó con 160 cables de conexión de 40 cm. El funcionamiento para detectar baches corresponde a que si sensa una distancia mayor a 16 cm, se activa el controlador borroso. Finalmente, para el movimiento de la palanca, se utilizaron dos servos motores MG995 en los que se acoplaron brazos mecánicos impresos en 3D de material ácido poliláctico. Todos los materiales y equipos utilizados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Materiales utilizados.

Cantidad	Artículo	Descripción
8	Sensor ultrasónico HC-SR04	Sensar distancias
1	Tarjeta arduino mega 2560	Interfaz digital
1	Extensión de tarjeta arduino mega 2560	Conexión entre la tarjeta arduino mega 2560
160	Cables de conexión de 40 cm	Cablería para conectar los

		sensores ultrasónicos
2	Brazos mecánicos impresos en 3D	Mecanismo para permitir el giro de la silla de ruedas eléctrica
2	Servo motores MG995	Se acoplan con los brazos mecánicos en conjunto con el variador de velocidad de la silla de ruedas

### 3. Resultados

Para poder validar el funcionamiento y eficacia de la silla de ruedas eléctrica utilizada en este trabajo, se tuvo que acoplar e instalar todos los materiales mencionados en la sección anterior como se puede observar en las figuras 7 y 8.



Figura 7. Jazzy Jet 3 con acoplamiento e instalación de materiales para funcionamiento del controlador borroso.

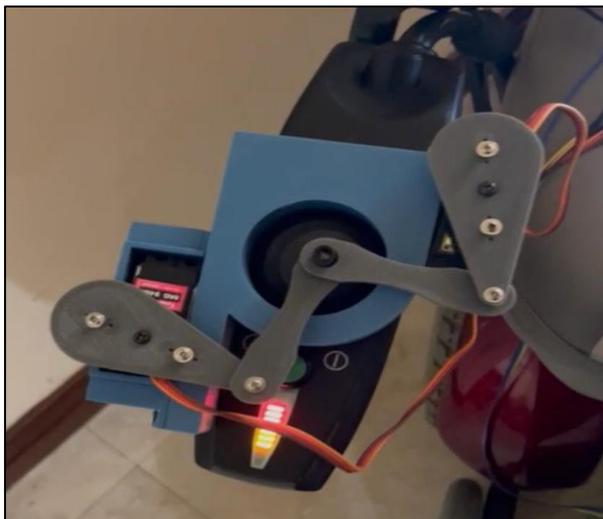


Figura 8. Mecanismo acoplado al variador de velocidad de la silla de ruedas Jazzy Jet 3.

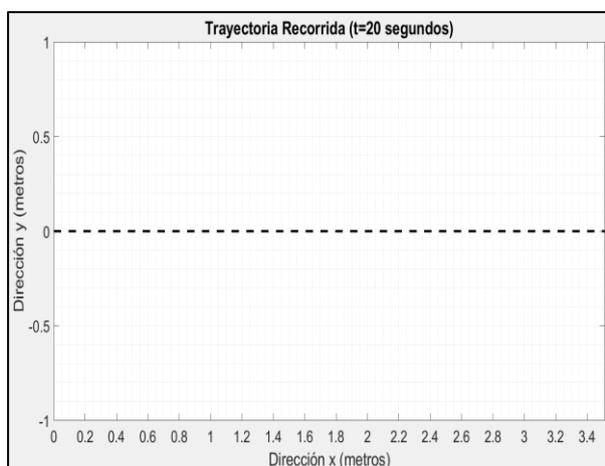


Figura 9. Simulación por enfoque lagrangiano de la silla de ruedas eléctrica.

En la figura 9 se puede observar el tiempo de respuesta obtenido por medio del enfoque lagrangiano sin el uso del control borroso, el cual fue de 20 segundos.

La simulación del movimiento de la silla de ruedas eléctrica sin el uso del control borroso se la realizó en el programa de Simscape mechanics teniendo en cuenta el mismo escenario y distancias que en la vida real como se puede observar en la figura 10.



Figura 10. Escenario real en comparación al escenario simulado en Simscape.

El tiempo de respuesta simulado sin tomar en consideración la fricción que existe entre los componentes fue de 27 segundos, sin embargo, para que se produzca el movimiento real de la silla de ruedas, se establecieron parámetros de rigidez y amortiguamiento entre las llantas y el piso. La rigidez entre el piso y las llantas se la definió con un valor de  $1 \times 10^5 \frac{N}{m}$  y el valor de amortiguamiento utilizado fue de  $\frac{1 \times 10^3 N}{s}$  y el porcentaje de rugosidad entre las llantas y el piso fue del 40%, es decir, 0.40 [13] como coeficiente de fricción estática, el cual corresponde a porcelana no pulida, como se puede apreciar en la figura 10 en la parte inferior. Finalmente, con la implementación de los dos controladores borrosos en la silla de ruedas eléctrica, el tiempo de respuesta para evadir el obstáculo mostrado en la figura 10, fue de 24 segundos y sus cambios de posición y distancias sensadas se ilustran en las figuras 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19.

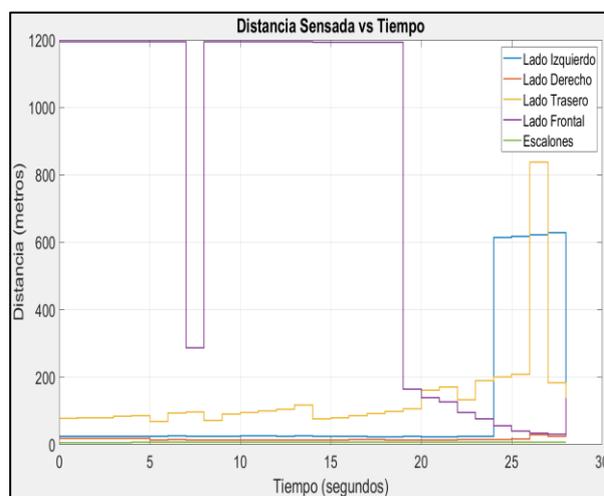


Figura 12. Distancia sensada vs Tiempo del controlador borroso 1 para evitar obstáculos. El escenario es el de la figura 10, en donde el obstáculo es la silla.

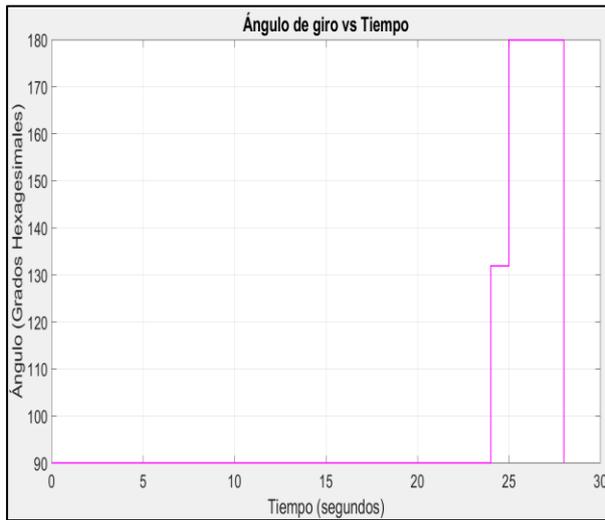


Figura 13. Giro vs Tiempo de la respuesta del controlador borroso 1. El escenario es el de la figura 10, en donde el obstáculo es la silla.

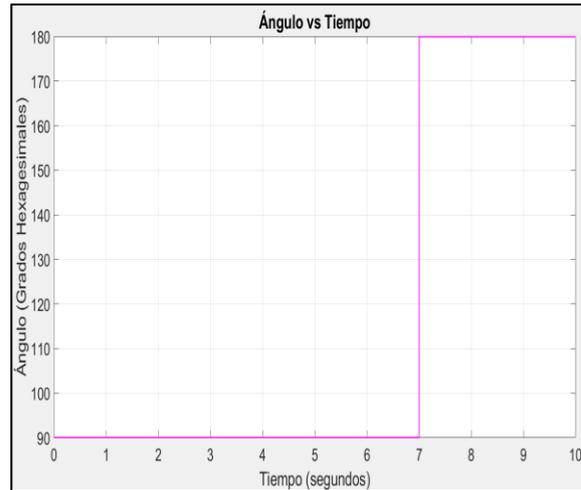


Figura 15. Giro vs Tiempo de la respuesta del controlador borroso 1 para evitar escalones. El escenario fue el de la figura 7.

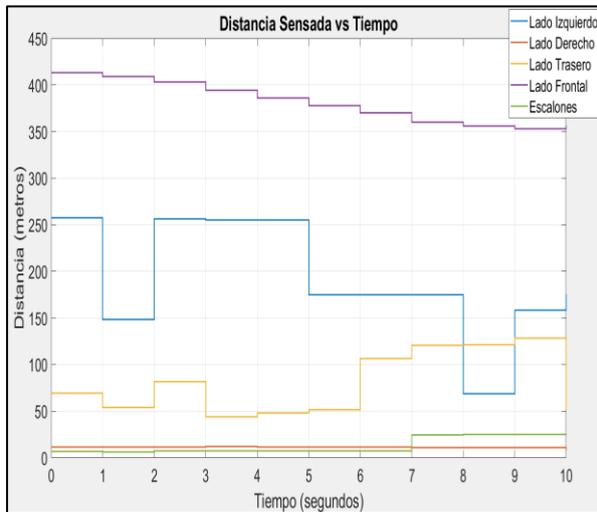


Figura 14. Distancia sensada vs Tiempo de la respuesta del controlador borroso 1 para evitar escalones. El escenario fue el de la figura 7.

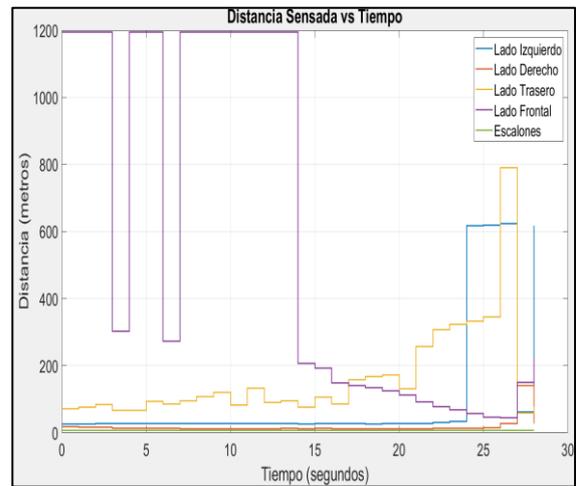


Figura 16. Distancia sensada vs Tiempo de la respuesta del controlador borroso 2. El escenario es el de la figura 10, en donde el obstáculo es la silla.

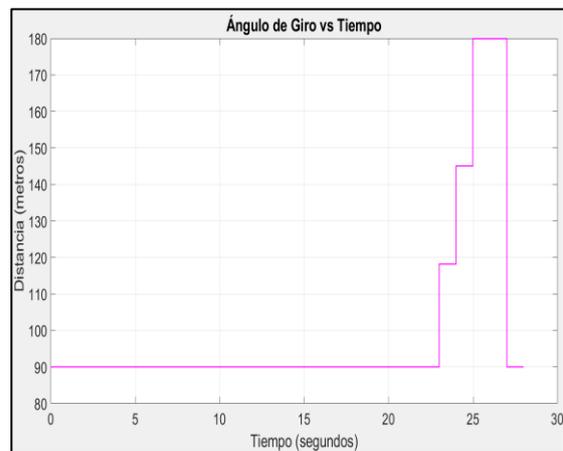


Figura 17. Giro vs Tiempo de la respuesta del controlador borroso 2. El escenario es el de la figura 10, en donde el obstáculo es la silla.

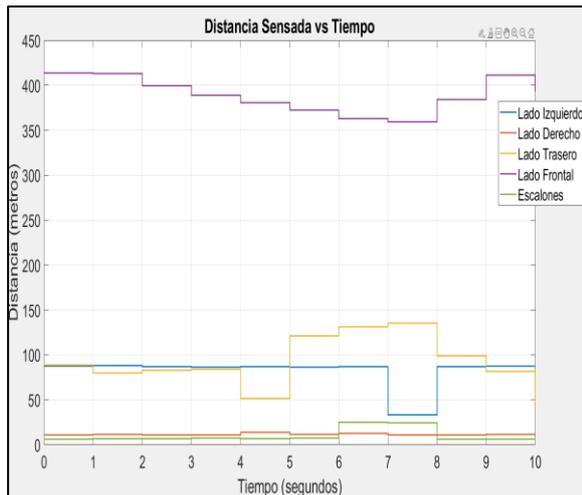


Figura 18. Distancia sensada vs Tiempo de la respuesta del controlador borroso 2 para evitar escalones. El escenario es el de la figura 7.

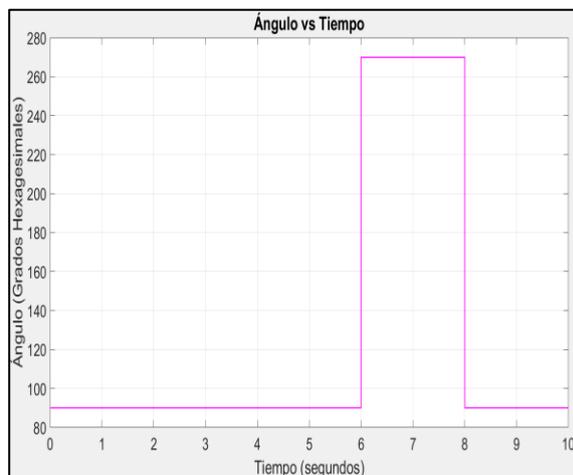


Figura 19. Giro vs Tiempo de la respuesta del controlador borroso 2 para evitar escalones. El escenario fue el de la figura 7.

La forma de medir el tiempo hasta llegar al objetivo deseado el cual era una silla se lo tomo por medio de videos realizados en pruebas experimentales con el uso de un cronómetro como se puede observar en la figura 20.



Figura 20. Pruebas experimentales realizada en la silla de ruedas eléctrica.

#### 4. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los tiempos de respuesta en la aplicación de cada controlador borroso en comparación con la simulación en condiciones ideales sin el uso de ellos, es decir, por el enfoque lagrangiano y dinámica de sistemas multicuerpos, el que mejor dispuso tanto en recursos computacionales y en brindar el giro deseado para evitar obstáculos fue el controlador borroso 1. Esto se debió a que el controlador borroso 2 tenía en las variables de entrada tres funciones de pertenencia y provocaba que al defuzificarlas se obtengan más reglas borrosas y por ende, un rango más amplio en la toma de decisión del controlador borroso. Las funciones de pertenencia utilizadas en el controlador borroso 2 fueron dos trapezoidales y una intermedia triangular. En cambio, las funciones de pertenencia correspondientes al controlador borroso 1 tenían dos extremas y ambas fueron trapezoidales. Es así que el costo computacional para la interfaz entre arduino y simulink para el controlador borroso 2 fue la ocupación del 80.4% de la memoria interna del arduino mega 2560 con 6585 bytes de información, y el costo computacional para la interfaz entre Arduino y Simulink para el controlador borroso 1 fue la ocupación del 64.4% con 5279 bytes de información, sin embargo ambos controladores cumplieron con el objetivo de evadir obstáculos. Cabe recalcar que por el enfoque lagrangiano y dinámica de sistemas multicuerpo se obtuvo la respuesta al movimiento de la silla de ruedas en condiciones ideales, es decir, sin errores humanos al manipular el joystick, un coeficiente de fricción estática constante y rapidez angular constante de las ruedas de la silla durante todo el recorrido. Se tiene en cuenta que, como trabajo a futuro se puede realizar la comparativa de la respuesta al movimiento de la silla de ruedas eléctrica por en el enfoque de la lógica borrosa y entrenamiento por redes neuronales usando el método por retroalimentación de la red.

## 5. Agradecimientos

Le agradezco a mi tutor, PhD. Jorge Hurel por brindarme una guía muy directa y concreta en el desarrollo de este trabajo además de fortalecer y crear autonomía en las actividades, a Mgs Carlos Loor quien desde mi infancia me ha motivado a seguir en el ámbito de la investigación y PhD Juan Peralta por siempre brindar su punto de vista para las correcciones que ameriten.

## 6. Referencias

- [1] CONADIS, “MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA INCLUSIÓN LABORAL DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD,” 2013. [Online]. Available: [www.relacioneslaborales.gob.ec](http://www.relacioneslaborales.gob.ec)
- [2] S. Chatterjee and S. Roy, “A low-cost assistive wheelchair for handicapped & elderly people,” *Ain Shams Engineering Journal*, no. xxxx, pp. 1–7, 2021, doi: 10.1016/j.asej.2021.04.021.
- [3] P. Madona, H. K. Nisa, Y. P. Wijaya, and A. Akhyan, “The Design of Wheelchair Systems with Raspberry Pi 3-Based Joystick Analog and Voice Control,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 846, no. 1, pp. 0–9, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/846/1/012032.
- [4] R. W. Jordan, R. Sloan, and A. Saithna, “Should we avoid shoulder surgery in wheelchair users? A systematic review of outcomes and complications,” *Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research*, vol. 104, no. 6. Elsevier Masson SAS, pp. 839–846, Oct. 01, 2018. doi: 10.1016/j.otsr.2018.03.011.
- [5] J. Fan, S. Jia, and W. Lu, “Tracking Control Based on Improved Fuzzy Gauss Radial Basis Function Neural Network for Omni-Directional Intelligent Wheelchair,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1069, no. 1, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1069/1/012044.
- [6] E. Baklouti, N. ben Amor, and M. Jallouli, “Autonomna navigacija za invalidska kolica s detekcijom prepreka u stvarnom vremenu korištenjem 3D senzora,” *Automatika*, vol. 57, no. 3, pp. 761–773, 2017, doi: 10.7305/automatika.2017.02.1421.
- [7] B. F. Wu, Y. S. Chen, C. W. Huang, and P. J. Chang, “An Uphill Safety Controller with Deep Learning-Based Ramp Detection for Intelligent Wheelchairs,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28356–28371, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2839729.
- [8] M. Mohammed, B. Abdelmadjid, and B. Djamila, “A Fuzzy Logic Controller for Electric Powered Wheelchair based on Lagrange Model,” *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering, ICAEE 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ICAEE47123.2019.9014838.
- [9] M. Rojas, P. Ponce, and A. Molina, “A fuzzy logic navigation controller implemented in hardware for an electric wheelchair,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1177/1729881418755768.
- [10] S. Temich and D. Grzechca, “A fuzzy logic controller to seat comfort correction for manually propelled wheelchair - a case study,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 25, pp. 55–60, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.12.010.
- [11] N. F. Jamin, N. M. A. Ghani, Z. Ibrahim, M. F. Masrom, N. A. A. Razali, and A. M. Almeshal, “Two - Wheeled Wheelchair Stabilization Using Interval Type - 2 Fuzzy Logic Controller,” *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 3.1-3.8, 2019, doi: 10.5013/IJSSST.a.19.03.03.
- [12] S. Chatterjee and S. Roy, “A low-cost assistive wheelchair for handicapped & elderly people,” *Ain Shams Engineering Journal*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.asej.2021.04.021.
- [13] A. Demarch, A. Waterkemper, D. Pasini, S. Ruzza, O. R. K. Montedo, and E. Angioletto, “Effects of roughness parameters on slip resistance for different methods used to determine the coefficient of friction for ceramic floor tiles,” *Ceramics International*, vol. 47, no. 17, pp. 24281–24286, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.05.139.