

# Desarrollo de Prótesis Inteligente Para Miembro Torácico en Perros

Eduardo de Jesús García Velázquez\*  
UNAM. Facultad de Estudios  
Superiores Cuautitlán, Edo. De Mex.  
México  
jesus.g.velazquez@gmail.com

**Abstract**— Dentro de la medicina veterinaria, la amputación de algún miembro derivado de problemáticas, ya sean fisiológicas o de índole ortopédico, es una opción que no siempre resulta del agrado para los dueños de las mascotas. En casos muy poco frecuentes, malformaciones genéticas en la gestación resultan en la falta de alguno de los miembros en los cachorros. En casos muy específicos, tales como la pérdida de una sola de sus extremidades, las mascotas pueden poseer movilidad y vivir relativamente una vida normal a pesar de ésta carencia. En los casos donde la pérdida es total (falta de los dos miembros ya sean delanteros o posteriores), el uso de sillas ortopédicas con ruedas, se ha presentado como la más común de las soluciones. Actualmente, y desde hace algunos años, la medicina veterinaria ha encontrado una nueva solución que ha agradado a los dueños de mascotas: la construcción de prótesis mecánicas que suplan el miembro perdido, construidas a partir de diversos materiales, tanto metálicos como plásticos. Sin embargo, éstas se especifican para amputaciones o pérdidas de miembros de manera parcial dada la naturaleza de rigidez con las que se construyen éstas prótesis; por lo que las mascotas que sufran de pérdidas totales derivadas de accidentes, enfermedades o por factores genéticos de nacimiento quedan excluidos de éstas soluciones dejándolos con sus tres miembros sanos o con sillas ortopédicas que en muchos casos les resta movilidad y a la larga, deteriora su estado fisiológico y anímico. El objetivo de éste proyecto es ayudar a las mascotas, específicamente perros, dadas sus características anatómicas simples en comparación con los gatos u otras especies de animales domésticos, que se encuentren en este grupo de pérdida total del miembro, a tener un prótesis que mejorará su calidad de vida.

Utilizando las características dinámicas presentes en los mamíferos cuadrúpedos, se pretende replicar el movimiento alternado en el andar del perro en una prótesis mecatrónica inteligente basada en un controlador difuso y un sistema embebido que procese éste movimiento a través de un sensor de posición colocado a manera de brazaletes en el miembro sano del animal, y lo reproduzca a través de un mecanismo de engranaje y un servomotor cuya función será el actuador mecánico. Dado que el sujeto de estudio del proyecto carece del miembro delantero (torácico) derecho, ésta señal será obtenida desde su miembro izquierdo y procesada por un control difuso a razón de la traslación y rotación presente en el movimiento de las extremidades delanteras de éstos animales. El estudio y diseño de un prototipo de prótesis específico para el sujeto de estudio (dadas sus características de peso y complexión) a través de la síntesis del mecanismo, estudios estáticos y de selección de un material en pro del bienestar del can, es otra parte importante de lo que se pretende obtener en éste proyecto.

**Keywords**— Interfaces Inteligentes, Lógica Difusa, Sistemas Embebido, Diseño CAD-CAE, Biomecánica, Bioestática, Miembro Torácico.

## I. INTRODUCCIÓN

Los animales dentro de la vida humana, han tomado más y más relevancia con el pasar de los años. Encontramos animales en rescates, en terapias tanto para personas bajo

cuadros graves de estrés y depresión [1], como terapia para niños con síndrome de espectro autista, y en la ayuda a personas discapacitadas. El bienestar en ellos es importante para desempeñar las diferentes ateadas que realizan; pero también se ha generado una cultura que ha hecho de las mascotas, en especial los perros, partes importantes de la familia actual.

En México actualmente, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, entre un 57 y un 70 por ciento de las familias tienen mascotas, y de éstas el 89 por ciento son dueños de perros [2]. Como se puede ver, la presencia de los perros en la vida del ser humano es importante y muchos de nosotros, en alguna ocasión hemos sido dueños o hemos tenido contacto con uno de éstos animales, generando relaciones afectuosas con ellos; por lo que no es de extrañar que nos preocupemos por su bienestar y sintamos pena por aquellos que, por un accidente o por un descuido o maltrato por parte de los dueño, la vida y la integridad de éstos se ha visto comprometida, pudiendo perder así, alguna extremidad corporal.

La pérdida de una extremidad es un evento médico difícil para los dueños de los perros e igualmente para ellos, tal como sucedería con un ser humano, podrían presentar cuadros importantes de depresión y a la larga una disminución en su esperanza de vida [3]; cualquiera que sea la razón, la medicina veterinaria considera la amputación si la vida del perro corre peligro y en algunos casos, para paliar dicha situación, se presenta a los dueños la posibilidad de adquirir un prótesis mecánico. Sin embargo, estos suelen ser bastante costosos, rondando éstos los tres mil dólares. Siendo también de importante consideración que dependiendo del tratamiento de amputación realizado en el can, se puede considerar si es o no un candidato óptimo para una de estos prótesis, requiriendo por lo menos el 30 o 40 por ciento del antebrazo o al menos el 50 por ciento de la tibia para colocar éstos dispositivos [4] que por lo general son de índole mecánica; de ahí la razón por la cual estos requerimientos son importantes pues necesitan una sujeción para realizar su función, que es meramente de soporte, en la figura 1 se puede observar una prótesis colocada sobre un can.



Figura 1. Perro con prótesis mecánica

Muchos de los que han perdido más de uno de sus miembros, solamente pueden optar por un cierre quirúrgico, con lo que corren los riesgos de un accidente mayor o la reducción de su prospecto de vida como ya se ha mencionado.

La necesidad de poder cubrir situaciones desafortunadas de estos sectores, genera métodos que sugieren el uso de nuevas tecnologías electrónicas y computacionales; en éste artículo, se ha considerado el uso de un control electrónico basado en sistemas difusos implementado sobre un sistema embebido, un actuador eléctrico y un elemento estructural construido de material plástico sustentable, para el desarrollo de una prótesis inteligente.

Para comprobar la viabilidad de éste proyecto se ha seleccionado un candidato de nombre Milo, visto en la figura 2, el cual es un perro mestizo de 58 cm hasta la cruz y una masa aproximada de 30Kg, el cual carece del miembro torácico derecho y fue sometido a una desarticulación desde el hombro por lo que es un candidato óptimo para la prótesis proyectada.



Figura 2. Milo, perro sin extremidad torácica derecha.

## II. PRELIMINARES

En esta sección se presentarán algunos conceptos necesarios para el desarrollo de la prótesis propuesta. Los conceptos serán presentados en forma general.

### A. Hipótesis de accionamiento

En la biomecánica veterinaria y en la sinología se han estudiado diversos tipos de movimientos en los perros. Como todo animal cuadrúpedo existe una relación mimética en las extremidades al desplazarse que generan a su vez un ciclo de desplazamiento de forma simétrica. Entre los principales movimientos simétricos que el andar del perro presenta se encuentran: caminada, trote y galope [5]. Gracias a éste tipo de movimiento plano en el espacio, se pretende en Milo, usar un sensor acelerómetro que ubicará en el mismo espacio el ángulo generado por la articulación del codo. Se colocará el sensor, previamente caracterizado, dentro de un pequeño brazalete en el miembro delantero sano para realizar dichas lecturas de posición y enviar esta señal a un sistema embebido con microcomputador.

### B. Los movimientos de avance en el perro

En la marcha visualizada en el perro en una velocidad lenta y moderada se puede analizar de la siguiente manera: en el primer tiempo se hace el avance del miembro torácico (puede

ser el derecho o el izquierdo), quedando específicamente los tres restantes tocando el suelo en cada momento del evento; seguido del miembro trasero opuesto (si se ha movido el izquierdo delantero, se moverá el derecho posterior) siempre dejando tres patas en contacto con el suelo, así en un movimiento repetido en un ciclo [6] que es parte importante para conocer la funcionalidad de la prótesis al ser éste mismo movimiento el fundamento principal para su comportamiento, ver figura 3.

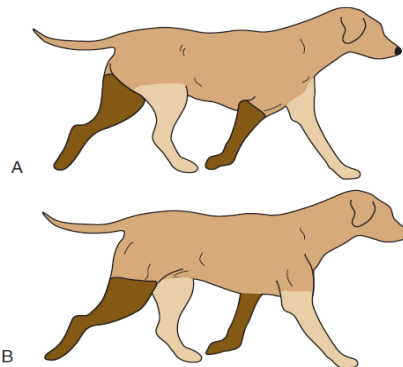


Figura 3. Desplazamiento simétrico del perro entre el estado A y el estado B.

Este, como el más elemental de los pasos marcados en los perros, se propone como la base para generar el control dentro del sistema embebido; sin embargo, la naturaleza de los movimientos simétricos se puede representar a mayor velocidad.

### C. Disposición de las extremidades caninas

Las extremidades tanto traseras como delanteras poseen una disposición particular en el esqueleto canino. Como parte importante a considerar en el diseño del mecanismo, las extremidades delanteras, las cuales se dividen en cuatro secciones, deben mantener la estructura al momento de movilizarse el animal. Respecto a la espina dorsal del animal, el hombro como elemento inicial desde el plano ventral hacia abajo se encuentra generando un ángulo de  $45^\circ$  y  $90^\circ$  en la articulación del hombro, además de un ángulo de  $130^\circ$  en el codo [7], este comportamiento se puede observar en la figura 4. El movimiento oscilante en el caso del sujeto de prueba será dado por el hombro, sin embargo, en el caso de aquellos con pérdida total, éste movimiento será dado por un mecanismo prismático Grashoff el cual generará éste movimiento oscilatorio.

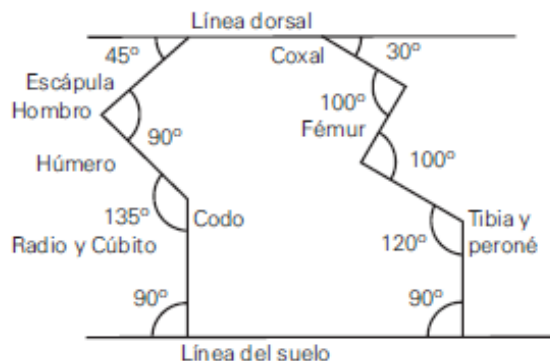


Figura 4. Distribución geométrica de las extremidades caninas.

La distribución de los elementos que componen las extremidades (escápula, humero, ulna y radio y los carpos) proporcionan estabilidad conjunta con las extremidades anteriores por lo que un análisis biomecánico plano es un

punto de partida ideal para el desarrollo de la prótesis con propósito de un prototipo funcional.

### III. DESARROLLO DEL PROYECTO

#### A. Estudio mecánico de la prótesis

Dado que el análisis del movimiento por parte de la extremidad delantera se analizó como un mecanismo plano en el que la cintura escapular, es decir, la unión que esta tiene con la columna del canino, se trató como la bancada del mecanismo, se proponen los movimientos más básicos en la biomecánica canina como punto de partida: extensión y flexión. Dentro de la biomecánica se encuentran estos movimientos impulsados por diversos músculos en cada una de las articulaciones; esto podemos traducirlo, como ingenieros, a movimientos traslacionales o rotacionales respecto a una articulación como punto de referencia. Se busca que como conjunto, exista un movimiento de traslación que desplace la extremidad en el plano y uno de rotación en sus centros instantáneos, en el caso particular del paciente estudiado, la articulación del codo, puesto que la acción de traslación puede compensarla con la movilidad de su hombro que mantiene los músculos generadores de éste movimiento intactos.

Mediante la ecuación de Gröbler (ecuación 1) de movilidad en el plano, se pueden identificar los cuatro elementos que componen el mecanismo básico del miembro torácico:

$$M = 3(n - 1) - 2P_{inf} - P_{sup} \quad (1)$$

Donde  $M$  es la movilidad, la cual también se puede entender como los grados de libertad que posee el mecanismo,  $n$  el número de elementos o eslabones,  $P_{inf}$  son los pares inferiores o de contacto por área y  $P_{sup}$  los pares superiores o de contacto puntual. En el caso de un mecanismo simple relacionado con el miembro torácico, la juntura de las articulaciones del hombro y el codo se pueden representar como pares inferiores binarios y los carpos como pares superiores, debido al contacto que estos tienen sobre la unión de la ulna y el radio. Por lo mencionado, la movilidad es de un mecanismo diferencial [8], puesto que existen cuatro elementos, tres pares inferiores (bancada respecto a escápula, articulación del hombro y articulación del codo) y un par superior en la mano, por lo que el mecanismo resultó con dos grados de libertad, los cuales en el plano son el de traslación y rotación sobre un centro instantáneo total. Esto es lo que se busca conocer, ya que el movimiento rotacional en la articulación del codo, aunque reducido por su naturaleza referente a la artrología, es el movimiento faltante en el esquema del proyecto.

Con el propósito de economizar el proyecto y facilitar una adquisición en términos económicos por parte de los dueños de perros en ésta situación, se propone la utilización de un plástico resistente que manufacture la prótesis a partir de un modelo CAD hacia una impresión 3D. ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Poliácido Láctico) son los polímeros más usados en éste terreno y con base en ellos se ha propuesto un modelo mecánico del prostético, ver figura 5.

Seguido de esto, a través de un software CAD-CAM-CAE se realizaron los estudios correspondientes al Análisis por Elemento Finito (AEF) [9], con lo cual se visualiza que el diseño pueda, o no, ser estáticamente eficaz en el momento de colocarlo en el perro y reciba así la tensión del peso. Durante

la ejecución del mismo se encontraron algunos fallos respecto al modelo de diseño por lo que actualmente se está estudiando la posibilidad del cambio de dimensiones sobre el diseño mecánico propuesto en éste artículo.

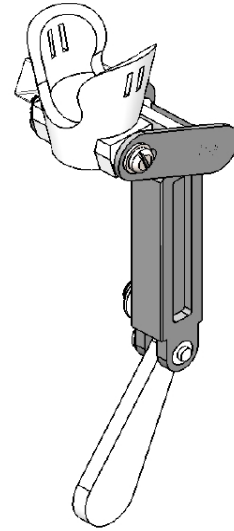


Figura 5. Modelo 3D de la prótesis propuesta como prototipo.

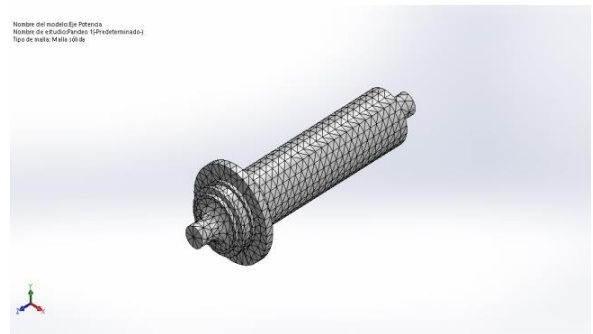


Figura 6. Simulación de Análisis de Elemento Finito en la articulación del codo de la prótesis.

Asimismo se sirve de realizar los estudios de pandeo, termofluencia (al ser un plástico el efecto térmico es de suma importancia por considerar) y estudios de movimiento para simular la naturaleza de los esfuerzos sobre el mecanismo, tal como se muestra en la figura 7. Estos estudios aún están en proceso pues deben ser lo más naturales posibles con el movimiento original del perro.

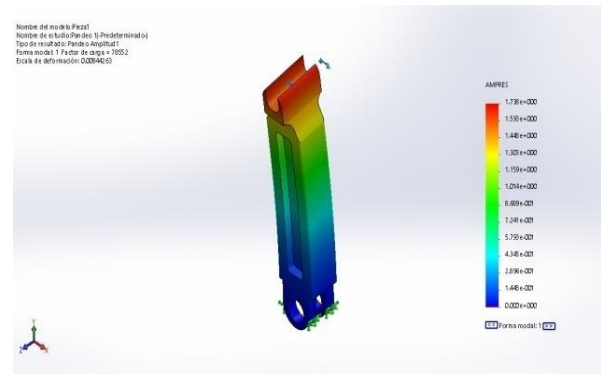


Figura 7. Simulación de análisis de pandeo en el antebrazo propuesto para la prótesis.

### B. Diseño de control inteligente

En esta sección se presenta el funcionamiento del controlador inteligente propuesto. En este caso se propone un controlador difuso en un sistema embebido en el que el controlador electrónico pueda analizar el desplazamiento de la extremidad sana en el plano de acción en el cual se realizó el estudio de movilidad a través de un sensor acelerómetro.

Éste sensor es del tipo MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*), el cual funciona gracias a un sistema masa-resorte con el cual, los elementos micro mecánicos causan una variación de tensión que se produce entre placas, emulando a la vez un efecto capacitivo, figura 8. Dada su construcción, es posible conocer una variación de voltaje respecto a la inclinación respecto a los tres ejes en el espacio. Sin embargo, la mayor parte de la gama de sensores acelerómetros comerciales son capaces de actuar en dos de los tres ejes en el espacio, solamente el giroscopio es capaz de trabajar en las tres [10]. Sin embargo, para este estudio, el instrumento que se propuso calibrar en tanto una variación del ángulo en un solo eje, con el propósito de registrar el posicionamiento en la articulación del codo sano respecto al húmero. Dada la naturaleza simétrica del movimiento antes mencionada, se planteó la premisa de adoptar un control difuso que analice hasta la mínima variación en el ángulo y lo reprodujera en su opuesto.

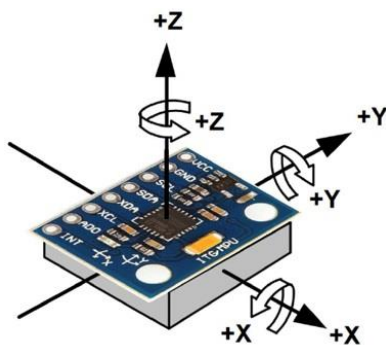


Figura 8. Sensor acelerómetro y los ejes en los que trabaja.

Para el diseño del controlador difuso se utilizó Matlab con él, la comunicación que presenta la placa de uso *Open Source*, Arduino, el cual posee un micro controlador que capta tanto la señal analógica enviada por el sensor acelerómetro así como también, puede definir la salida a un actuador electromecánico, tal es el caso de un servomotor, esto se puede ver en la figura 9.

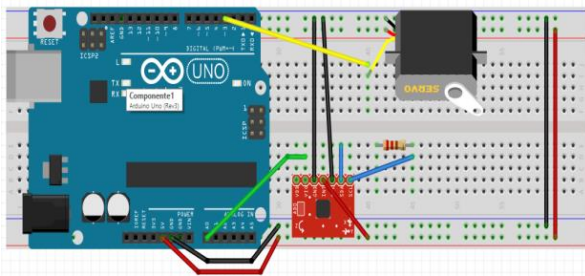


Figura 9. Sistema embebido de control inteligente de servomotor por acelerómetro.

Arduino controla el ángulo de la articulación del codo, otorgando a la prótesis la movilidad natural buscada. Para poder trabajar las *variables lingüísticas*, que son la parte fundamental de la creación de los conjuntos en la lógica difusa (éstas como representación difusa de los ángulos, los cuales

representan la junta correspondiente a la articulación del codo), se precisó de caracterizar el sensor a través de una aplicación de nivel en un teléfono móvil. Con la ayuda del micro controlador y de esta aplicación se obtuvieron los valores indicados por el IDE del mismo respecto a un ángulo dado; los datos se registraron en una tabulación en una hoja de cálculo y se sometieron a un ajuste de curva por medio de la toolbox de *Curve Fitting* de Matlab para conocer la curva característica del acelerómetro junto con el polinomio que describe, este se puede ver en la figura 10.

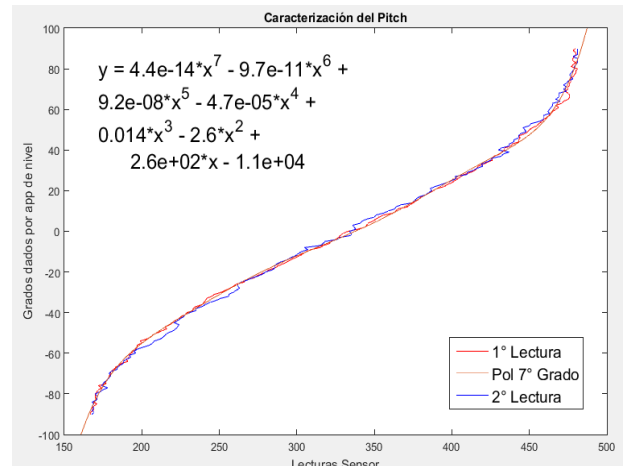


Figura 10. Curva característica y polinomio del sensor acelerómetro.

Se realizó la conexión entre la placa Arduino y Matlab para ejecutar el controlador difuso mostrado en la figura 11, en el cual, los datos obtenidos por el acelerómetro fueron evaluados en la ecuación característica de tal manera que los datos se traduzcan a ángulo. Éstos se evalúan dentro del controlador definido y arroja el ángulo que la prótesis debe de generar para que ejecute un movimiento de caminata natural, este movimiento es realizado por medio de un servomotor.

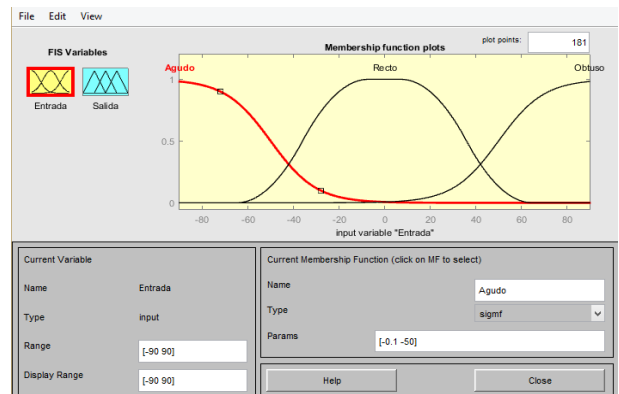


Figura 11. Funciones de membresía de entrada en el controlador difuso.

Dados los cambios abruptos que pueden presentarse en el movimiento del perro al no estar acostumbrado a una prótesis (pueda dar saltos o cojear) se propone el uso de conjuntos con forma sigmoideal con el objeto de suavizar el cambio de ángulo entre los conjuntos, en tanto se consideraron rangos amplios en la definición geométrica de los mismos. Se realizó el mismo razonamiento para la salida, invirtiendo el sentido de la salida, respecto a los 180° que otorga el servomotor, a través de las reglas del conjunto.

Cabe destacar que si se utilizaran algoritmos estructurados en la realización del análisis de posición al momento de

moverse el paciente estudiado, podría el programa entrar en un conflicto de datos y perjudicar la movilidad, ésta es la razón por la cual se optó por la introducción de un sistema inteligente basado en lógica difusa como elemento de control en el sistema embebido electromecánico.

El método para conocer la respuesta a cada dato entregado por el acelerómetro en cada evento y enviado al servomotor fue el Método Mamdani, el cual requiere conocer el centroide de la figura que genera la pertenencia de estos datos en los conjuntos difusos, lo cual se muestra en la Figura 12, donde la sección en amarillo, a la izquierda, representa el ángulo de entrada, mientras que en azul la respuesta obtenida por el control. Asimismo se presenta en forma gráfica ésta respuesta entre entrada y salida como superficie, representando la relación entre estas en el controlador, mostrado en la figura 13.

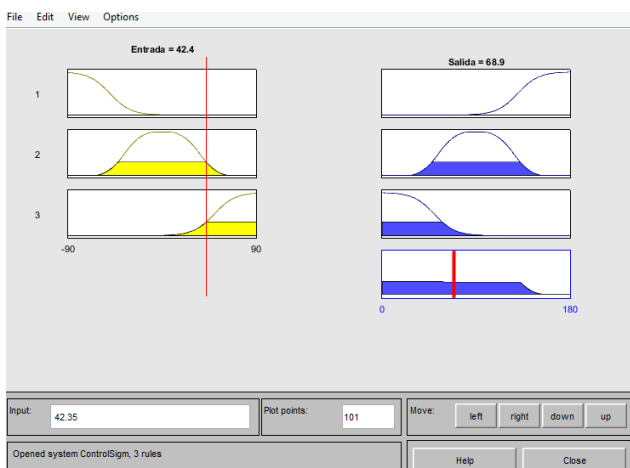


Figura 12. Reglas del control difuso.

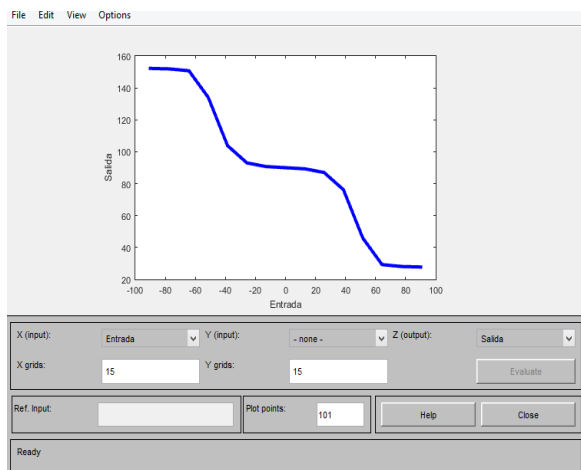


Figura 13. Superficie del controlador difuso.

#### IV. CONCLUSIONES

Dada la gran extensión del proyecto en cuanto a la cantidad de conocimientos multidisciplinarios que se requieren para el completo desarrollo de éste, hasta el momento se encuentra inconcluso. Sin embargo los datos obtenidos en el transcurso del desarrollo han determinado que la viabilidad del proyecto es alta aunque aún se deben

considerar los factores etológicos del paciente y su respuesta al ser colocado en él la prótesis terminada.

#### TRABAJO FUTURO

Como se mencionó, se utilizó el conjunto sigmoideo para la realización del controlador difuso, sin embargo, no se ha realizado un estudio comparativo acerca de los diferentes tipos de conjuntos difusos para determinar cuál es realmente el más adecuado para resolver este problema, por lo que se busca realizar un análisis comparativo de los diferentes conjuntos difusos para definir el mejor conjunto para el problema estudiado.

Se espera poder obtener una prótesis funcional que pueda ser completamente adecuada para el paciente en cuestión.

#### AGRADECIMIENTOS

La realización hasta el momento de éste proyecto ha sido apoyada por el Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes (GISI) de la FES Cuautitlán, así como por la MVZ Eugenia López Miranda, en la asesoría veterinaria.

#### INFORMACIÓN ACADÉMICA:

**Eduardo de Jesús García Velázquez:** Actualmente alumno en la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista dentro de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM.

#### REFERENCIAS

- [1] Español, C. e. “Perros ayudan a sus dueos a superar la depresión y el estrés” (Agosto de 2012). [cnnespanol.cnn.com](https://cnnespanol.cnn.com/2012/08/20/perros-ayudan-a-sus-duenos-a-superar-la-depresion-y-el-estres/). Recuperado de <https://cnnespanol.cnn.com/2012/08/20/perros-ayudan-a-sus-duenos-a-superar-la-depresion-y-el-estres/>
- [2] Arreola, C. Á. “En México 57 de cada 100 hogares tienen alguna mascota” (30 de Enero de 2019). [lajornadamaya.mx](http://www.lajornadamaya.mx/2019-01-30/En-Mexico--57-de-cada-100-hogares-tienen-alguna-mascota). Recuperado de [www.lajornadamaya.mx/2019-01-30/En-Mexico--57-de-cada-100-hogares-tienen-alguna-mascota](http://www.lajornadamaya.mx/2019-01-30/En-Mexico--57-de-cada-100-hogares-tienen-alguna-mascota)
- [3] Rogers, Kara. “Surviving on human ingenuity and compassion” (Febrero de 2010) [advocacy.britannica.com/blog/advocacy](http://advocacy.britannica.com/blog/advocacy). Recuperado de <http://advocacy.britannica.com/blog/advocacy/2010/02/animal-prosthetics-surviving-on-human-ingenuity-and-compassion/>
- [4] Fleming, Ann-Marie “Prosthetics: Improving mobility on for dog amputees” (Agosto de 2015) [dogquality.com/blogs](https://dogquality.com/blogs). Recuperado de <https://dogquality.com/blogs/senior-dog-blog/59698627-prosthetics-improving-mobility-for-dog-amputees>
- [5] Carr, Jean B. y Dycus, David L. “Canine Analysis Gait” (Marzo de 2016). Today’s Veterinary Practice.
- [6] Gillette, Robert L. “Canine Locomotion Analysis” (Septiembre 2010) pp- 202-203.
- [7] König E.H. “Anatomie der Haussäugetiere. Teil 1” . Schattner-Verlag, Stuttgart, Deutschland. 2001
- [8] Hernández, Alfonso. “Cinemática de mecanismos: Análisis y diseño” Editorial SINTESIS, España. 2011.
- [9] Arkin, John. “A Finite Element Analysis Concepts via Solidworks” World Scientific. 2010
- [10] Nylamp Mechatronics “Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio” (Julio de 2016) [naylorlampechatronics.com](https://naylorlampechatronics.com) Recuperado de [https://naylorlampechatronics.com/blog/45\\_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html](https://naylorlampechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html)
- [11] MathWorks “Arduino con Matlab y Simulink” Recuperado de <https://la.mathworks.com/videos/series/arduino-with-matlab-and-simulink-99406.html>