

PROYECTO FINAL INTEGRADOR

Diseño e implementación de un robot biomimético
para el estudio de la actividad locomotora del
nematodo *C. elegans*

Autor: Campos Haedo, Julio
Director: Gleiser, Pablo Martín
Co-Director: Abbate, Santiago Andrés

Universidad Nacional de Río Negro
Sede Andina
Ingeniería Electrónica
San Carlos de Bariloche

Resumen

El objetivo de este Proyecto Final Integrador (PFI) es el diseño e implementación de un robot biomimético, cuya forma corporal y control del movimiento se asemeje a la del nematodo *C. elegans*. Se presentará el trabajo desde la construcción mecánica pasando por el diseño de la electrónica del circuito del control hasta la programación del sistema. Este robot será una nueva herramienta que permitirá avanzar con los estudios de la relación entre el sistema nervioso y la actividad locomotora del nematodo.

Este trabajo se encuadra dentro una licencia de código abierto del estilo de la “Open Source Hardware Association” por lo que todos los procedimientos y diseños estarán disponibles a la comunidad. Tanto el diseño mecánico como el electrónico se desarrollaron de una manera que permita que se replique fácilmente el prototipo, utilizando sensores y actuadores de bajo costo que se encuentran en espacios comerciales.

Contenido

Resumen	1
Introducción	4
Breve historia de los biorobots	4
Importancia de los modelos biomiméticos	4
¿Por qué el C. elegans?	6
¿Qué se puede obtener a partir de estudiar el C. elegans?	8
Mapa Neuronal	10
¿Por qué usar un diseño biomimético?	11
Diseño Mecánico	13
Estructura de C. elegans.....	13
Aspecto del prototipo	14
Vértebra activa	17
Vértebra pasiva	18
Eje central.....	18
Adaptadores para Servomotores	19
Módulo de comunicación.....	19
Prototipo Final.....	20
Modificaciones de diseño	22
Diseño Electrónico	23
Sistema	23
Elección de protocolo.....	23
Modo en el que trabaja.....	25
Características eléctricas del protocolo I ² C.....	26
Funcionamiento del Sistema	27
Interfaz con esclavo.....	28
Funcionamiento del Esclavo.....	30
Funcionamiento del Master	32
Diseño de PCB	34
Selección de componentes	34
Resistencias	37
Microcontrolador	37
Cable de conexión entre módulos	38

Pruebas, simulaciones, resultados, implementación	39
Conclusiones	45
Bibliografía:.....	48

Introducción

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño y armado de un robot biomimético para el estudio del gusano *Caenorhabditis elegans*. Este robot podrá utilizarse como herramienta interdisciplinaria para estudiar mejor la relación entre el sistema neuronal y el movimiento del gusano en un ambiente real.

Para tener una idea más clara del proyecto y la motivación detrás del mismo, es importante tener en cuenta de donde surge la iniciativa del armado de los robots biomiméticos como éste.

A continuación, presento una breve descripción de la historia de los estudios realizados con esta nueva herramienta, la relación entre la biología, la neurociencia y la robótica, y la decisión de realizar este trabajo específicamente sobre el nematodo *C. elegans*.

Breve historia de los biorobots

Se pueden encontrar ciertos trazos de los biorobots a fines del siglo 19 donde Nikola Tesla tuvo la idea de crear un sistema autónomo que tenga un comportamiento similar a un humano, pero obviamente de una manera más primitiva a influencias externas. También construyó un bote controlado remotamente en 1890 y propuso planes para uno que no requiera de un operador y solo se maneje por las afectaciones que tenga a influencias externas. El fisiólogo Jacques Loeb en 1918 comparó el comportamiento de animales simples con una máquina artificial heliotrópica que seguía la luz utilizando como sensor unas fotocélulas y como actuadores unos motores. Breder en 1926 construyó dos barcos, uno con una aleta que aleteaba y otro que ondulaba, para estudiar la propulsión de los peces (Consi & Webb, 2001).

Tal vez el estudio más famoso y directamente relevante con los biorobots sea la tortuga de W. Gray Walter creada en 1950. El robot poseía unas ruedas motorizadas, una luz, un sensor de luz y sensores de tacto. La idea era demostrar que comportamientos complejos como la exploración, fototropismo positivo y negativo, y evasión de obstáculos, pueden ser producidos por unos pocos circuitos electrónicos análogos a un circuito neuronal.

En la actualidad se utilizan mayoritariamente motores y actuadores electromecánicos para la construcción de los robots, pero siempre se están explorando nuevos materiales tales como músculos artificiales, materiales conformes y nuevas técnicas avanzadas de manufacturación. Estos avances permiten construir robots energéticamente más eficientes, multifuncionales y autónomos, siendo más parecidos a organismos biológicos.

Dentro de los desafíos que enfrenta la robótica se encuentran: algún tipo de batería que se compare a la conversión metabólica, actuadores de estilo muscular, materiales que se auto reparen, autonomía en cualquier ambiente, percepción que sea similar a la humana y computación y razonamiento. Han habido avances dentro de estos desafíos, pero aún en muchos de los casos no llega a compararse con el nivel biológico (Yang, 2018).

Importancia de los modelos biomiméticos

Una pregunta que se puede hacer es, ¿Por qué molestarse en construir un biorobot cuando se pueden hacer simulaciones que permiten una alta tasa de repetibilidad y extraer mucha información

de los sensores y actuadores? La desventaja de las simulaciones es que no permiten una interacción real con el ambiente, se puede simular un ambiente y las respuestas del robot, pero hay veces que la simulación no llega a compararse con el ambiente real y sus variables.

Un tema importante a tener en cuenta es que los biorobots al igual que las simulaciones son herramientas para la investigación, no permiten reemplazar a los animales estudiados; es el conjunto de los biorobots, las simulaciones y el contraste con las observaciones en el animal que permiten tener una mejor idea de lo que ocurre.

Hay dos enfoques principales cuando se trata de robots inspirados por la biología, por un lado, está la idea de intentar copiar a la biología con un robot. Esto presenta dificultades varias, lo cual lleva a la creación de nuevos sensores más precisos, de actuadores que sean más similares a músculos por ejemplo y de la invención de algoritmos complejos que intenten de emular los mecanismos biológicos. Esta rama es conocida como biomimética. El segundo abordaje se basa fundamentalmente en intentar comprender mejor la biología utilizando los robots o simulaciones de su comportamiento para analizar la biología desde otra perspectiva. Esta segunda rama es conocida como modelo/análisis biorrobótico.

Uno de los objetivos primordiales de la neurociencia es determinar cómo interacciones del sistema nervioso resultan en comportamientos, sin embargo, la conexión entre los circuitos neuronales y el movimiento no es directa. En ese sentido también debe considerarse el sistema mecánico, que incluye tanto la forma del cuerpo y sus músculos como su interacción física con el medio ambiente. Intentar determinar el comportamiento de un animal solo estudiando los circuitos neuronales o solo el movimiento, nos pone en riesgo de tomar conclusiones incorrectas. Los sistemas que integran estos elementos permiten crear lazos retroalimentados (**feedback loops**) distribuidos (Figura 1) que nos proporcionan una mejor idea de lo que realmente ocurre (Tytell, P.Holmes, & Cohen, 2011).

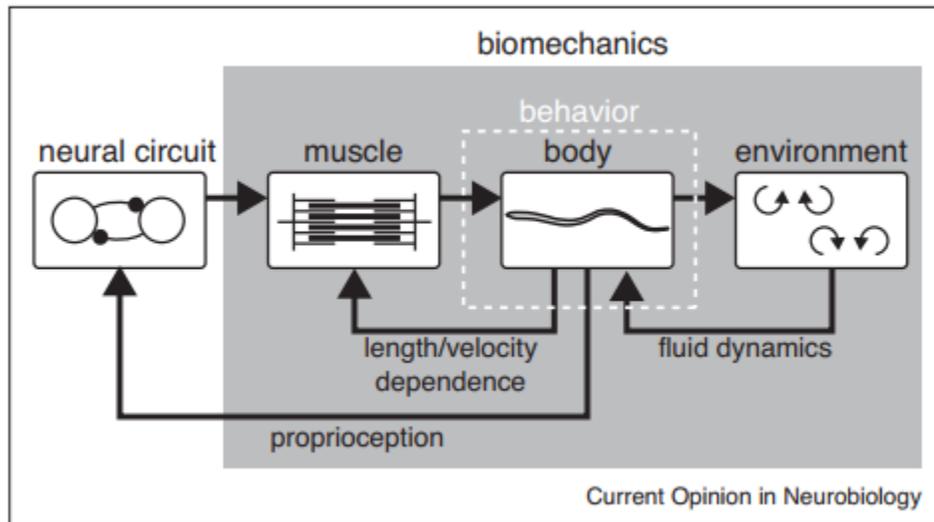


Figura 1 Lazos retroalimentados (feedback loop) creado por la interconexión entre los sistemas. Biomechanics (biomecánica); neural circuit (circuito neuronal); muscle (músculo); behavior (comportamiento); body (cuerpo); environment (ambiente); length/velocity dependence (dependencia de largo/velocidad); fluid dynamics (dinámica de fluido); proprioception (propiocepción) (Tytell, P.Holmes, & Cohen, 2011).

Varios estudios demuestran que la parte mecánica es de gran importancia al querer predecir el comportamiento de un animal, además de su relación con el ambiente. Cuando un animal nada, por ejemplo, si tiene músculos fuertes la onda de la conexión neuronal tiene velocidades similares con la onda de movimiento. Esto no ocurre cuando el animal tiene músculos débiles, la onda de la conexión neuronal es mucho más rápida en comparación a la del movimiento.

Ahora que tenemos una introducción sobre estos robots ¿Por qué elegir el trabajo sobre el nematodo *C. elegans* en particular? ¿Por qué es que un pequeño gusano de tan solo 1mm de largo atrae tanto la atención?

¿Por qué el *C. elegans*?

Como se menciona anteriormente, el comportamiento de un animal está dado no solo por su sistema nervioso, sino que es un producto del feedback entre la actividad neuronal, la biomecánica de su cuerpo, y la interacción con el ambiente que lo rodea. En ese sentido se puede argumentar que el *C. elegans* lidera el camino hacia un mejor entendimiento de los sistemas neuromotores de los animales y las interacciones entre el ambiente-cuerpo y mente de los mismos.

El *C. elegans* es el primer animal en tener todo su genoma secuenciado y al ser transparente facilitó que se conozca todo su desarrollo celular. Como tiene un sistema nervioso simple se puede observar toda su red neuronal, que se denomina conectoma. Además de su simplicidad se pueden observar varios comportamientos como, aprendizaje, memoria y toma de decisiones y a la vez otros como, por ejemplo, alejarse de estímulos negativos, nadar, poner huevos y alimentación social, entre otros. (Corsi, Wightman, & Chalfie, 2015)

Existen diversos modelos teóricos de *C. elegans*, los cuales se orientan en distintos aspectos. Algunos en el sistema nervioso, otros estudian más el biomecanismo del nematodo mientras que los demás integran la dinámica neuronal con la mecánica del cuerpo. Entre estos modelos se han enfocado en distintas partes de la locomoción del nematodo, tales como la neuroanatomía, la biofísica, biomecánica y algunos otros se han enfocado en las fuerzas ambientales. En el futuro se buscan modelos que integren varios de estos enfoques para explorar distintas hipótesis.

En la década del 60 Sydney Brenner pensó en utilizar en un principio al nematodo *Caenorhabditis briggsae* para los estudios de biología molecular, luego se dio cuenta que el *C. elegans* crecía mejor en su laboratorio. Durante su vida estos nematodos miden entre 0.25mm y 1mm de largo por lo que hay que utilizar microscopios de disección o compuestos que tienen una magnificación de 100X y 1000X respectivamente. Este último permite realizar experimentos que tienen que ver con el crecimiento y función celular ya que su resolución permite observar células individuales. Gracias a esto se conoce el desarrollo celular completo de este animal.

El *C. elegans* posee varias cualidades que facilitan el mantenimiento del animal. Tiene un ciclo de vida rápido de 3 días desde el huevo hasta adulto y existe principalmente como hermafrodita que se auto fertiliza, aunque en porcentajes muy bajos existen machos también. Al ser hermafrodita auto fertilizante, uno solo puede producir un poblado y estas poblaciones pueden ser congeladas por años y revividas cuando sean necesarias. (Corsi, Wightman, & Chalfie, 2015)

Posee también varias características que motivan al estudio. Tiene un número invariante de células somáticas. Las células somáticas son aquellas que conforman el crecimiento de los tejidos y órganos,

son las que representan la mayoría de las células del cuerpo excepto por las células germinales y células embrionarias. Tiene procesos celulares y moleculares similares a otros animales y hay muchos genes que están vinculados o tienen una relación con los genes humanos, por eso se puede utilizar como modelo para enfermedades humanas, como Alzheimer entre otras. (Link, 2006)

El *C. elegans* posee solamente 302 neuronas lo cual otorga muchas ventajas, como por ejemplo poder observar un mapeo completo de sus neuronas contribuyendo así al estudio de la relación entre ellas y su funcionalidad. Dada también su anatomía se pueden implementar técnicas que nos facilitan este trabajo que con especies más grandes no se pueden utilizar. Una de las técnicas que se puede utilizar es la microscopía diferencial de contraste de interferencia (DIC por sus siglas en inglés) la cual permite visualizar fácilmente células individuales y detalles subcelulares gracias a que el *C. elegans* es transparente (Figura 2.A). Se pueden utilizar también sobre el gusano proteínas fluorescentes (Figura 2.B) para etiquetar proteínas o compartimientos subcelulares. Estas proteínas fluorescentes también sirven para estudiar procesos de desarrollo y mutaciones entre otras cosas. Lo fascinante sobre este gusano es que se pueden utilizar varias herramientas como estas, incluso algunas al mismo tiempo, lo cual no se puede realizar con otros animales.

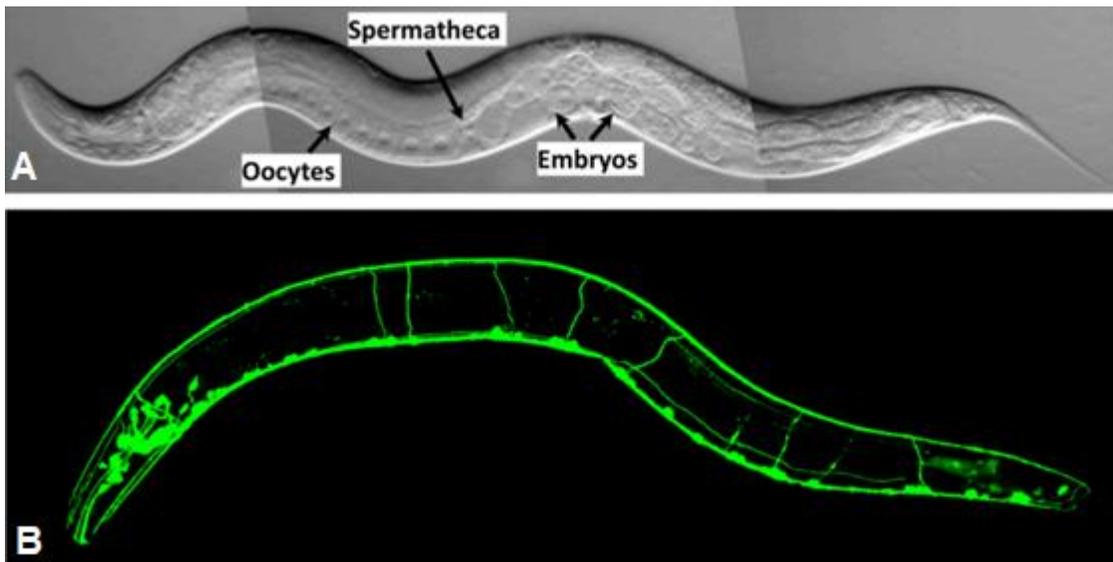


Figura 2 A) Adulto hermafrodita visto a través de un microscopio compuesto. B) Imagen Fluorescente mostrando el sistema nervioso. (Corsi, Wightman, & Chalfie, 2015)

Otra de las grandes ventajas que tiene el *C. elegans* es que hay una gran cantidad de bases de datos con formato abierto por lo que hay mucha información actualizada a disposición. Algunas de las bases de datos más grandes y utilizadas son:

- WormBase (Paul Sternberg, 2000)
- WormAtlas (Altun, 2002-2020)
- WormBook (Eisenmann, 2005)
- OpenWorm (OpenWorm, 2015)

¿Qué se puede obtener a partir de estudiar el *C. elegans*?

Aunque el sistema nervioso del *C. elegans* tiene solo 302 neuronas (Figura 3), sirve como punto de partida para comparar con otras especies con sistemas neuronales más complejos.

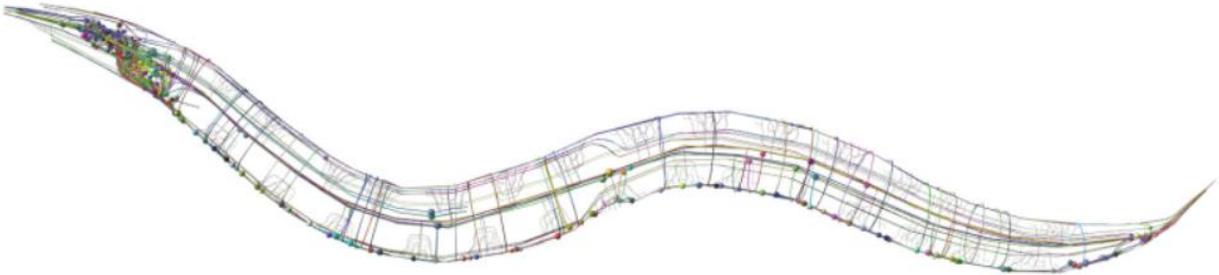


Figura 3 Conectoma completo del *C. elegans*. La Figura muestra una representación del cuerpo del gusano donde se detalla todo su sistema nervioso. Los diferentes colores indican la posición y las conexiones entre las neuronas.

Un objetivo primordial del estudio de la comparación de la arquitectura cerebral entre especies es la comprensión de la base neurobiológica de estructuras cerebrales complejas y la relación con sus funciones.

Podemos utilizar una clasificación que nos permite agrupar neuronas de acuerdo a su funcionalidad. Los tres grandes grupos son neuronas sensoriales, interneuronas y neuronas motoras. En la Figura 4 se presenta la matriz de adyacencia del sistema neuronal del *C. elegans* donde se observan puntos rojos y violetas indicando una relación eléctrica o química respectivamente. La matriz de adyacencia es la descripción sistemática cuantitativa de la presencia o ausencia de una conexión entre pares de nodos de una red.

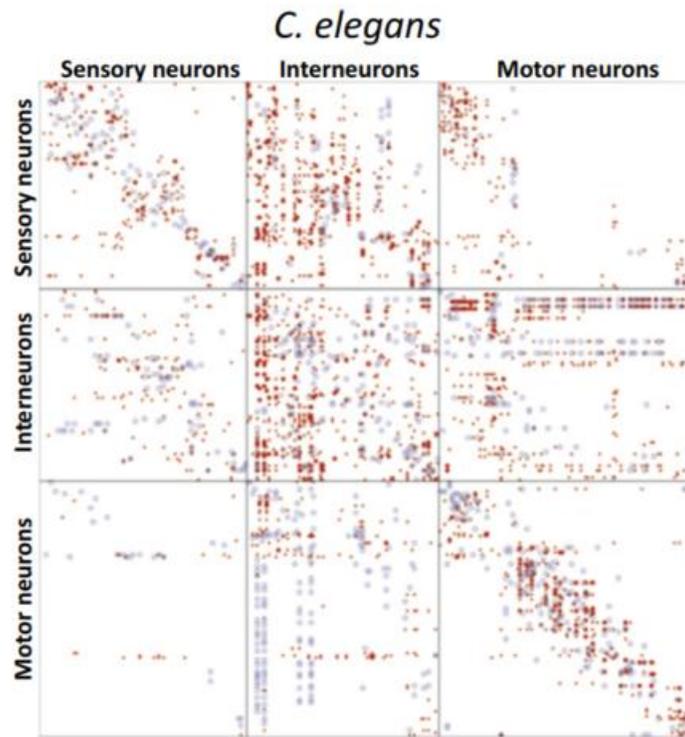


Figura 4 Matriz de adyacencia del conectoma del *C. elegans*. Los puntos en la matriz indican la presencia de conexiones entre neuronas. La matriz está ordenada en tres grandes grupos. Sensory neurons (neuronas sensoriales); Interneurons (interneuronas); Motor neurons (neuronas motoras) (Heuvel & Edward T. Bullmore, 2016)

En la Figura 5 se muestran los mapas de los conectomas de diferentes especies, solo para *C. elegans* se conoce el conectoma completo. Para las otras especies los nodos son grupos de neuronas y las conexiones representan la fracción de conexiones que hay entre estos grupos. Aún con estas aproximaciones se puede observar una clara correlación entre todas las reconstrucciones. Estas reconstrucciones se arman matricialmente colocando la clasificación de neuronas antes mencionadas en el eje horizontal y en el vertical y viendo la conectividad entre ellas, los colores están dadas por la intensidad de la conectividad siendo débil (azul), mediana (amarillo), o fuerte (naranja).

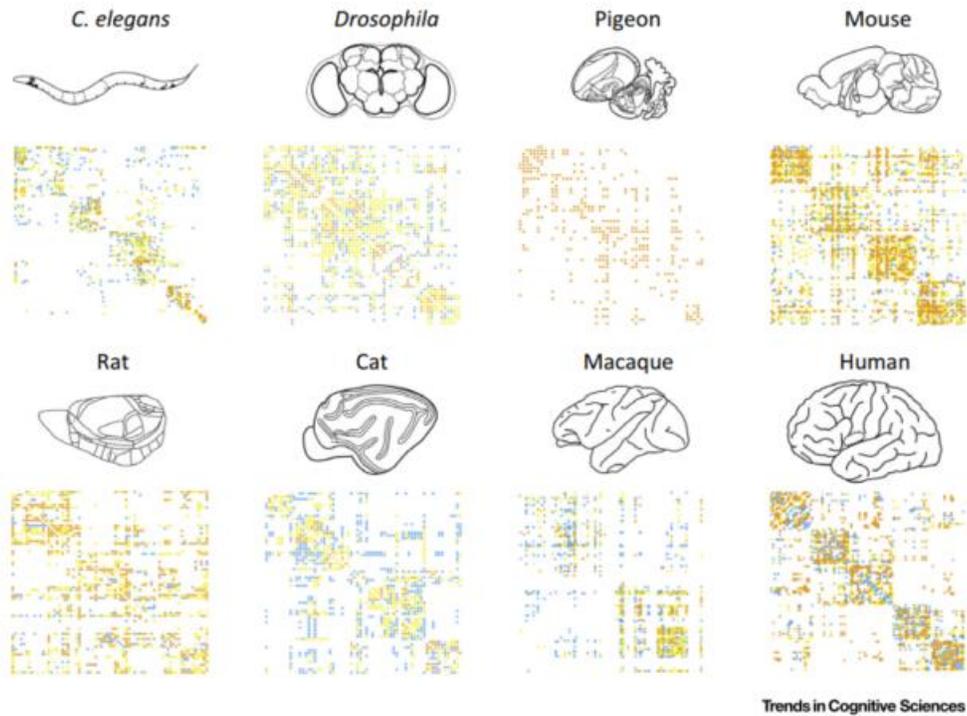


Figura 5 Mapas de conectomas de diversas especies: *C. elegans*; *Drosophila* (Mosca de fruta); *Pigeon*(Paloma); *Mouse*(Ratón); *Rat*(Rata); *Cat*(Gato); *Macaque*(Macaco); *Human*(Humano). Se destaca la presencia de grupos de neuronas densamente conectadas en todos los casos. (Heuvel & Edward T. Bullmore, 2016).

Observando la Figura 5, pueden surgir varias hipótesis con respecto a si el estudio de un conectoma permite inferir atributos de otro conectoma. Por ejemplo, un estudio demuestra la presencia de redes de mundo pequeño (small world) en redes sociales grandes, estos “small worlds” tienen muchas conexiones de corto alcance y pocas de largo alcance. La característica small world es tener alto índice de agrupamiento (clustering) y distancia media corta. Estos **clusters** o grupos de neuronas densamente conectados, tienen características particulares y se puede encontrar en varias redes neuronales de animales (Sporns, 2010).

Mapa Neuronal

Gracias a todas estas características del gusano y estudios disponibles en bases de datos abiertas que se hicieron sobre el nematodo, Timothy Busbice creó un programa utilizando el conectoma completo del *C. elegans*. Este programa está formado por 302 unidades dinámicas, que representan la dinámica individual de las 302 neuronas.

Los programas se comunican entre ellos simulando la unión sináptica (synaptic junction) y la unión en hendidura (gap junction) entre neuronas. La información biológica de la comunicación entre las

neuronas aparece codificada en el conectoma y los pesos que se le aplica para representar la importancia de cada conexión neuronal está dada por el tamaño que ocupa el espacio sináptico real.

Además, utilizó una estructura (**framework**) donde un grupo de neuronas sensoriales recibe información del ambiente a través de sensores de un robot. Esta información se la proporciona a los programas y como resultado ellos otorgan un valor que sería la respuesta muscular. Ésta a su vez es la información de las neuronas motoras que se le entrega a los motores del robot, creando así un loop de información entre los sensores y los actuadores del robot pudiendo estudiar el conectoma entero del *C. elegans*.

Con todo esto puesto en marcha, utilizó un robot de Lego (Lego Mindstorms EV3 Robot) (ver Figura 6) en donde implementó el framework y el programa que creó.



Figura 6 Robot Lego Mindstorms EV3. Touch Sensors (Sensores de tacto), Sound Sensor (sensor de sonido), Sonar Sensor (Sensor Sonar), Independent Motor (Motor Independiente), Drives = Left and Right (Maneja = Izquierda y Derecha), Wheels (Ruedas) (Busbice, May 22, 2014).

Los resultados fueron que el robot se comportara de una forma muy similar a lo observado en el *C. elegans*. Las estimulaciones de las neuronas sensoriales de comida causaban que el robot se moviera hacia adelante, al tocar los sensores de tacto posteriores y anteriores el robot se movía hacia atrás y hacia adelante respectivamente y otras reacciones propias del *C. elegans*. Una vez que el robot tenía suficiente estímulo, el conectoma se auto estimulaba creando loops de realimentación donde se podía observar que no hacía falta crear más estimulación y el robot podría moverse libremente explorando el ambiente y evadiendo obstáculos por sí solo.

¿Por qué usar un diseño biomimético?

Algunas de las ventajas que aporta el nuevo diseño son:

-Diseño biomimético:

- Mayor similitud al movimiento de un gusano real.
- Bilateralidad distribuida a lo largo del todo el cuerpo.

-Sensores de otros tipos (temperatura y luz) que están distribuidos espacialmente. El modelo de Timothy Busbice (Figura 6) simulaba distintos lugares físicos, en el nuevo diseño están separados realmente.

Esto permite que se puedan modificar más variables y observar qué sucede al respecto, pudiendo estudiar otras hipótesis planteadas que con el modelo anterior no era posible de analizar.

Los estudios no solo servirán para conocer más sobre el *C. elegans*. Como se mencionó en ítems anteriores se conoce que hay cierta relación genética entre el *C. elegans* y otras especies incluyendo al humano, por lo cual esto sería un puntapié para otras áreas. Los resultados obtenidos a partir de un nuevo modelo podrían en un futuro llenar algunos de los vacíos que tenemos sobre el cerebro humano y sus funcionalidades.

La idea del trabajo es que al armar este nuevo diseño de robot del *C. elegans* se pueda estudiar mejor el conectoma propuesto por Busbice. Al agregar más sensores se obtiene más información para alimentar la red neuronal, y al agregar más actuadores se puede subdividir mejor la señal de salida (output) para dar una mejor representación del movimiento del gusano.

Diseño Mecánico

Estructura de *C. elegans*

El trabajo del modelo de Busbice mostró que hay comportamientos emergentes que surgen a partir de la implementación del conectoma del *C. elegans* en un robot. Claramente en su diseño hay una aproximación de la forma del cuerpo en donde uno pasa de un gusano a un autito robot con dos ruedas. La idea en este nuevo diseño, es tener una aproximación más realista a nivel biológico donde no hay más ruedas, sino una forma de cuerpo y movimiento ondulatorio que se aproxima más al cuerpo y movimiento del gusano.



Figura 7 Estructura muscular del *C. elegans* donde se puede observar en verde oscuro las paredes musculares del nematodo. (OpenWorm, 2015)

Al tener un robot con una aproximación más similar al cuerpo del gusano (ver Figura 7), se pueden vincular diferentes neuronas a la activación de músculos a lo largo del cuerpo. Por esta razón se espera que el robot permita observar nuevos comportamientos emergentes como, por ejemplo, ondulaciones en el movimiento.

Como se ve en la Figura 8, la estructura muscular del *C. elegans* en el corte transversal es simétrica tanto en el eje vertical como en el eje horizontal. Estas paredes musculares (*body wall muscles*) permiten ondulaciones verticales, laterales y rotaciones ventrales-dorsales. Como una primera aproximación que aprovecha la simetría de las paredes musculares se optó por un diseño con simetría bilateral. Eventualmente este concepto puede ser extendido para representar cuatro u ocho paredes musculares.

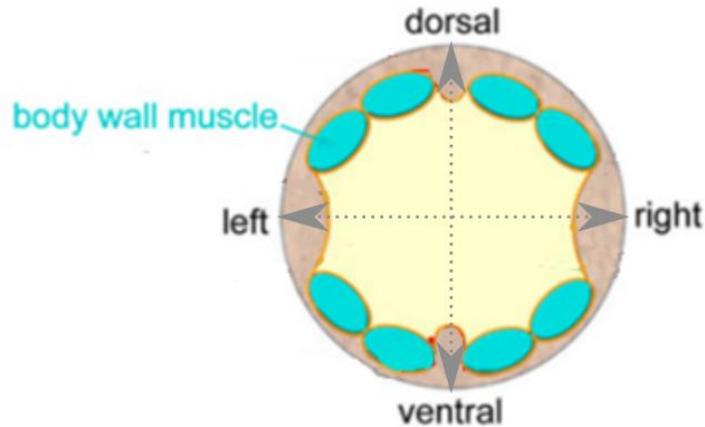


Figura 8 Corte transversal del *C. elegans* donde se puede observar la distribución de los músculos (*body wall muscles*) indicados en celeste y su simetría tanto vertical como horizontal marcadas con las líneas punteadas grises (Corsi, Wightman, & Chalfie, 2015).

El largo del gusano *C. elegans* es de aproximadamente 0.75mm o 1mm dependiendo si es macho o hermafrodita correspondientemente. Dado que con estas medidas no sería posible armar un robot con los materiales a disposición, se realizó un prototipo a una escala mayor. Las medidas estaban limitadas por distintos factores que se mencionan en la siguiente sección. Además de la simetría vertical y horizontal que se presentó anteriormente, el cuerpo del gusano presenta comisuras (Figura 9) que serán tomadas como referencia para el diseño.

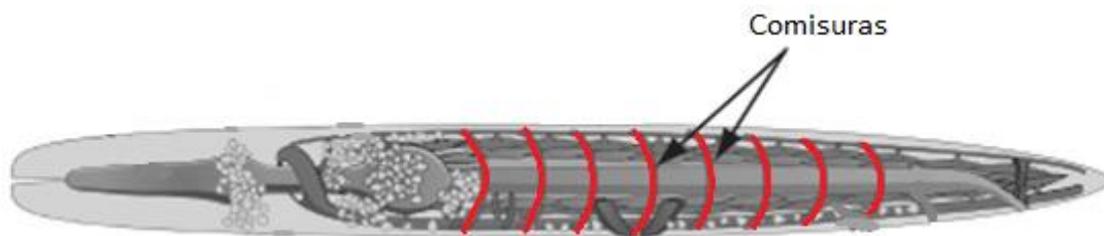


Figura 9 Cuerpo del *C. elegans* donde están marcadas con rojo las comisuras que serán tomadas como punto de partida para colocar los módulos que realizarán el movimiento del robot.

Aspecto del prototipo

La idea original de T. Busbice ha sido exitosa demostrando que es posible utilizar un robot para estudiar comportamientos emergentes de la dinámica neuronal. Sin embargo, ese robot es muy limitado para estudiar el movimiento de un gusano, ya que consta de un vehículo con dos ruedas.

A continuación se propone el diseño de un robot biomimético y se detallan sus características. A nivel general, se planteó la recreación del nematodo a través de la división en un conjunto de secciones que llamo módulos (Figura 10). Cada uno de ellos, actuando como partes de un sistema distribuido, se encarga de registrar las variables de interés del entorno y de proveer el movimiento.

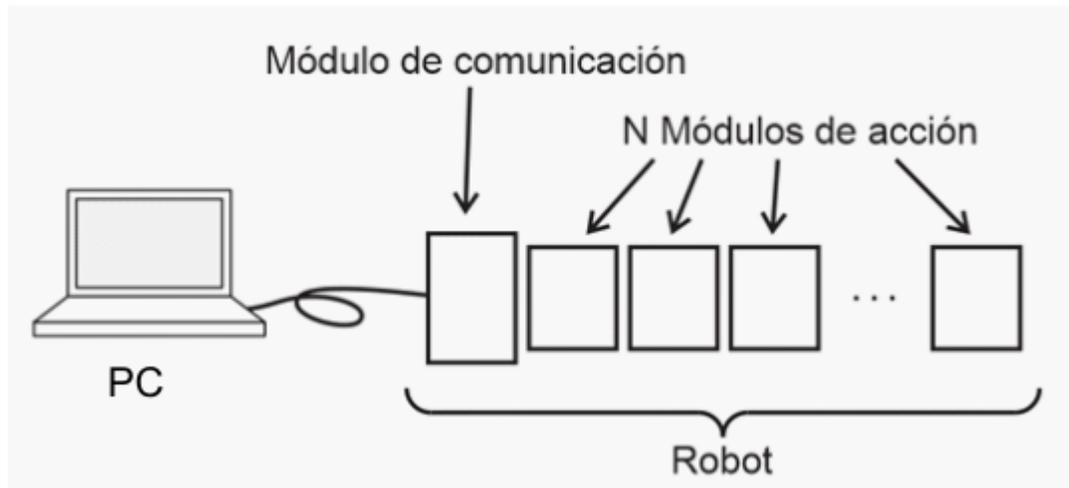


Figura 10 Esquema representativo del robot, formado por el módulo de comunicación y N módulos de acción. El módulo de comunicación permite recibir y transmitir los comandos de acción y también transferir información de sensores del robot al programa principal de control en la PC. El diseño modular permite que el número de módulos de acción pueda variar.

Como el desarrollo de esta plataforma tiene el objetivo a futuro de estudiar la actividad locomotora del *C. elegans* dado por sus circuitos neuronales, se propuso que el control y monitoreo de las señales esté centralizado en una computadora o dispositivo externo.

El prototipo posee un sistema similar a unas vértebras con discos separados cierta distancia mantenidas por un eje central, lo que genera una estructura estable a la vez que facilita el movimiento. De esta forma el diseño proporciona una configuración de módulos de acción similares al *C. elegans* que se puede apreciar en la Figura 9.

El prototipo posee dos estructuras características.

Módulo de acción: Consta de tres vértebras, una que llamaremos activa y dos pasivas. La activa tiene montados algunos sensores y los actuadores que generan el movimiento deseado. En la pasiva en cambio, solo se montan los sensores que se requieran dadas las variables a estudiar. Las vértebras pasivas están vinculadas a la vértebra activa por un conjunto de resortes y una tanza similar a tanza de pesca. Los movimientos que se observan en la Figura 11 se llevan a cabo mediante dos servomotores que contraen o expanden la tanza que une las vértebras, acercando o alejando cada uno de los extremos. Es importante que, como requerimiento dado por el sistema neuronal a estudiar, estos actuadores se comporten a través de señales de control independientes.

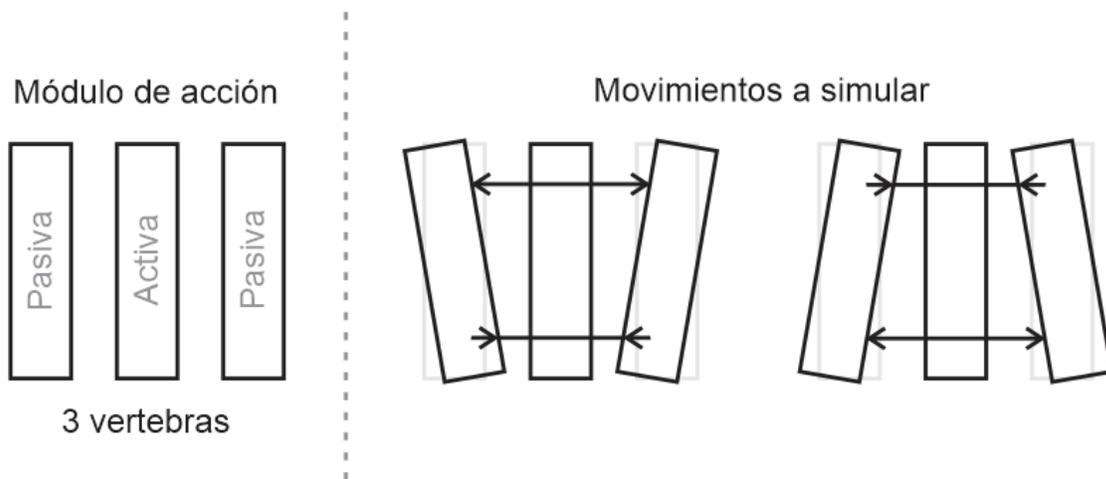


Figura 11 Representación del módulo de acción con sus dos vértebras pasivas y la vértebra activa en el centro encargada de realizar el movimiento. Este módulo permite simular movimientos correspondientes a contracciones y expansiones musculares.

Módulo de comunicación: Este módulo es el encargado de la recolección y distribución de la información correspondiente a cada uno de los N módulos de acción que conformen el robot biomimético. Es a su vez, la interfaz de comunicación entre la computadora y el robot y tiene como objetivo el encapsulamiento de los datos sensoriales y de acción registrados y la correcta transmisión de las señales de control a cada uno de los actuadores de las vértebras activas.

Para cumplir con el diseño biomimético se eligió una forma que posee un corte transversal elíptico y simétrico. La pieza es elíptica ya que se deseaba que tenga cierta estabilidad y los servomotores permanezcan perpendiculares al suelo. Se puede apreciar en la Figura 12 una simetría bilateral que se acerca a la fisonomía real.

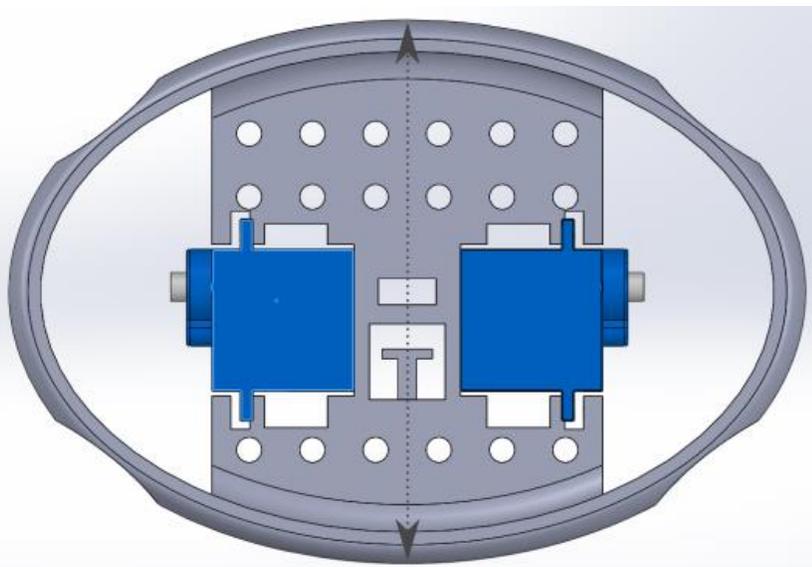


Figura 12 Aprovechando la simetría del cuerpo del *C. elegans* se simplificó el diseño para definir el control del robot. La figura muestra uno de los módulos de acción en gris con los servomotores que controlan los movimientos laterales en azul y marcado con línea punteada el eje de simetría (ver detalle en Figura 13).

Se utilizó una impresora 3D para realizar el modelo mecánico por las siguientes ventajas:

- Precisión en el diseño
- Facilidad de modificar prototipo
- Simplicidad de replicar

Éstas dos últimas son de vital importancia ya que la idea del proyecto es hacerlo abierto a la comunidad. Esto permitirá por un lado que la herramienta esté disponible para que se pueda estudiar y aprender más del C. elegans y por otro lado a que distintos grupos puedan implementar y/o modificar el diseño del robot.

Vértebra activa

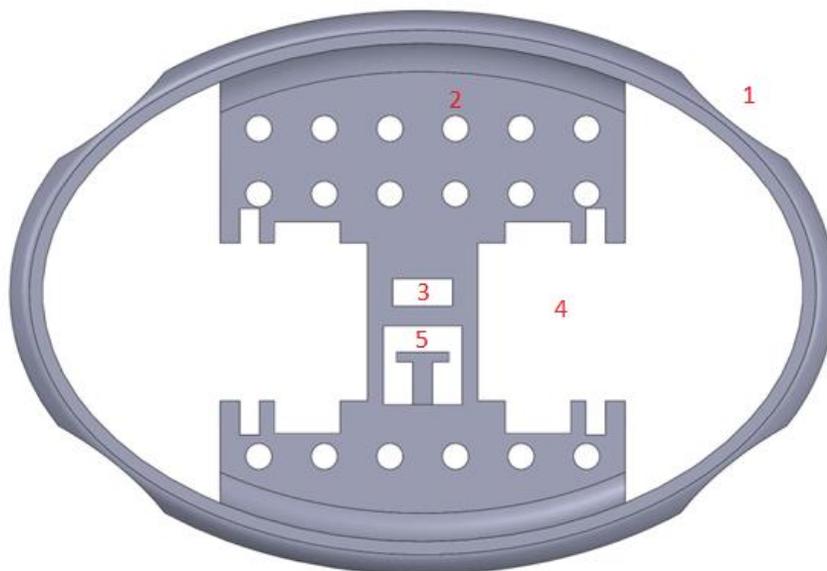


Figura 13 Vértebra activa señalando los recortes para la fijación de los sensores y actuadores. Las referencias en rojo 1-5 indican componentes funcionales del diseño (ver texto principal).

La vértebra activa posee varios recortes (marcados con números rojos en la Figura 13) que cumplen con distintas funciones.

- 1- Los cuatro cortes circulares que se encuentran en el exterior de la vértebra permiten colocar sensores piezoeléctricos o switches si se desea. Más adelante explicaré porque se piensan utilizar estos sensores.
- 2- Orificios que cumplen una funcionalidad dual: utilizar menos material de impresión lo cual lo hace más liviano y más económico y a la vez se utilizan para sujetar a los dispositivos electrónicos que estarán montados sobre las vértebras.
- 3- Orificio para el eje central el cual separa a las vértebras la distancia deseada y le otorga la estructura central al prototipo.
- 4- Montura donde se colocan los servomotores.
- 5- El soporte T utilizado en un principio para colocar cintas elásticas unidas a las vértebras pasivas, luego se optó por el uso de resortes. Se mantuvo este soporte ya que, si se desea, se pueden colocar tanto las cintas elásticas como los resortes para darle mayor rigidez al movimiento.

Vértebra pasiva

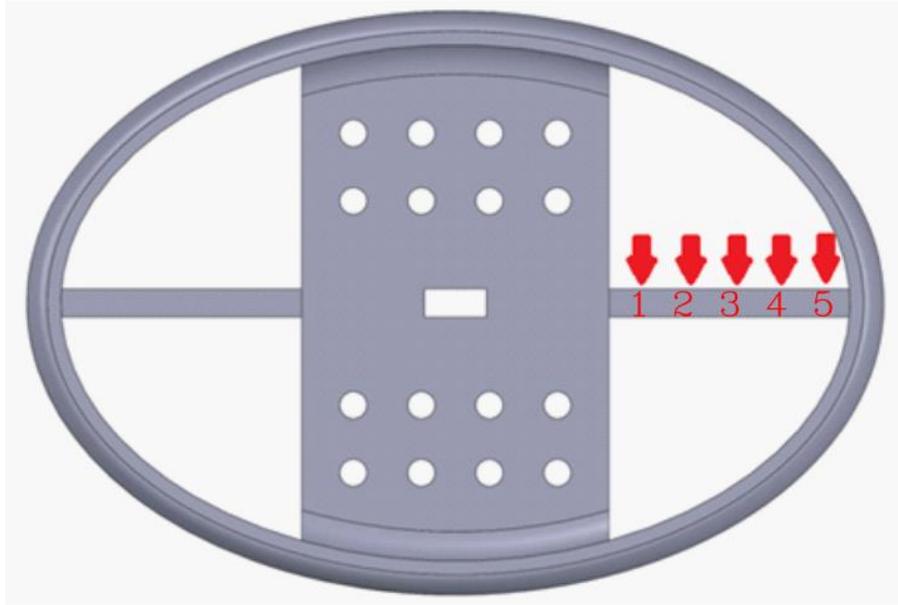


Figura 14 Vértebra pasiva donde se indican con números y flechas rojas las posiciones de fijación de los tornillos de ajuste del ángulo de rotación. Los huecos para los tornillos están perpendiculares a la figura.

La Figura 14 muestra la vértebra pasiva que tiene un diseño más simple ya que no requiere de servos o actuadores y solo tiene tres tipos de orificios. Al igual que la vértebra activa posee los orificios para sujetar dispositivos electrónicos y ahorrar en material y también el orificio central para el eje. La diferencia está en que poseen una barra transversal donde se pueden ver cinco flechas rojas del lado derecho que marcan agujeros perpendiculares a esta vista lateral, y también aparecen simétricamente en el lado izquierdo. Estos huecos cumplen dos funciones, primero y principal, amarrar mediante un tornillo el elemento de tracción, en nuestro caso la tanza de pesca. La segunda función de variar el ángulo de rotación del módulo (Ver: **Pruebas, simulaciones, resultados, implementación**)

Eje central

Las vértebras están sostenidas entre sí por unos ejes centrales (Figura 15) que están diseñados para permitir una fácil conexión entre ejes, lo cual ayuda a la implementación modular. Cerca del centro del eje hay un segmento desnivelado, que se utiliza para colocar la vértebra justo en el medio de eje.

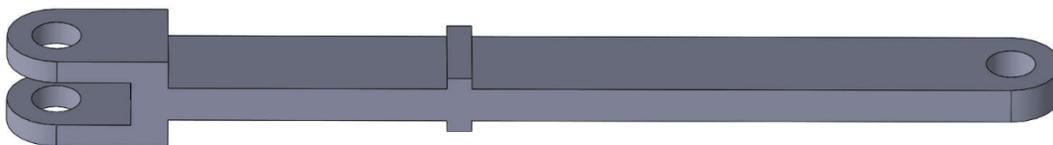


Figura 15 Eje Central. Los agujeros permiten la conexión entre módulos y el segmento central permite un fácil centrado de la vértebra.

Adaptadores para Servomotores

Para realizar un movimiento ondulatorio similar al del *C. elegans*, se diseñaron unos adaptadores para los servomotores circulares (Figura 16) que mediante una tanza están aferrados a las vértebras pasivas. Al activar los servomotores estos adaptadores giran y la tanza se enrosca sobre el adaptador circular acercando la vértebra pasiva a la activa.

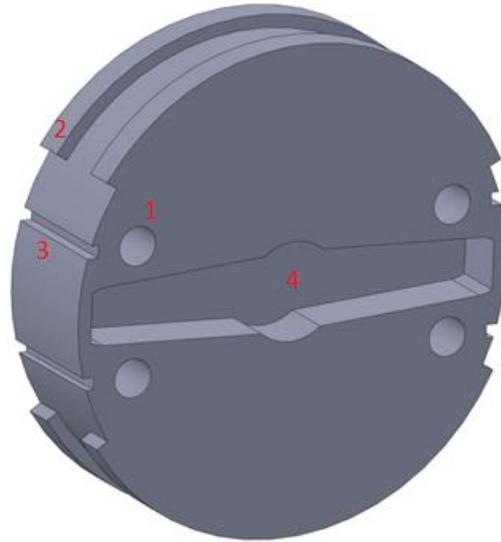


Figura 16 Adaptadores de servomotores con los orificios utilizados. Las referencias en rojo 1-4 indican componentes funcionales del diseño (ver texto principal).

Los adaptadores poseen algunas características (marcados con números rojos en la Figura 16) que cabe mencionar.

- 1- Orificios para enhebrar la tanza por el adaptador.
- 2- Desnivel lateral para mantener la tanza por el medio del adaptador y que no se desvíe y se salga del mismo.
- 3- Brecha para sujetar la tanza y si se desea se puede aplicar pegamento en esta y que quede fija.
- 4- Encastre para hélice plástica que posee el servomotor. Se decidió realizarlo de esta manera en vez de colocar directamente sobre el servo ya que la pieza impresa puede tener ciertas imperfecciones y no coincidir exactamente con el pequeño engranaje del servomotor. Esto permite que se replique con mayor facilidad ya que la hélice plástica es un adaptador común que trae el servomotor.

Módulo de comunicación

Solo hay un módulo de comunicación, éste logra la interfaz entre la PC donde se ejecuta el código principal de control del robot y los módulos de acción. Su forma puede variar, pero en el prototipo implementado es una sola vértebra donde se coloca el microcontrolador.

Prototipo Final

Para lograr que el prototipo sea modular, se formó un conjunto uniendo dos vértebras pasivas con una activa en el medio, formando un *módulo de acción* con las vértebras unidas entre sí por los ejes centrales. En la Figura 17 se presenta una representación del conjunto. En la vértebra activa se pueden observar los servomotores en azul con los correspondientes adaptadores ya presentados en la Figura 16.

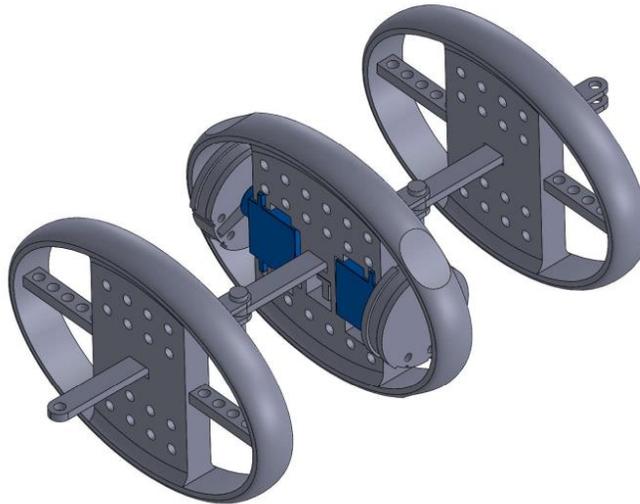


Figura 17 Módulo de acción compuesto por dos vértebras pasivas (en los extremos) y una vértebra activa (en el medio). En la vértebra activa se presentan los servomotores en azul y sus correspondientes adaptadores presentados en la Figura 16.

Una vez obtenido el modelo, se imprimieron las piezas y se puede observar en la Figura 18 cómo queda el módulo de acción armado. Al diseño se le agregaron unas chapas metálicas para sostener a los servomotores en el lugar y resortes en los laterales de las vértebras para proporcionarle mayor rigidez al movimiento.



Figura 18 Módulo de acción con las piezas impresas en 3D con los servomotores instalados asegurados por las chapas metálicas y con los resortes colocados en los laterales.

El modelo completo (Figura 19) se forma uniendo varios de estos módulos. Para formar el prototipo solo hay que unir el modelo completo con el maestro que se encarga de la interface de la red neuronal con el movimiento del robot.

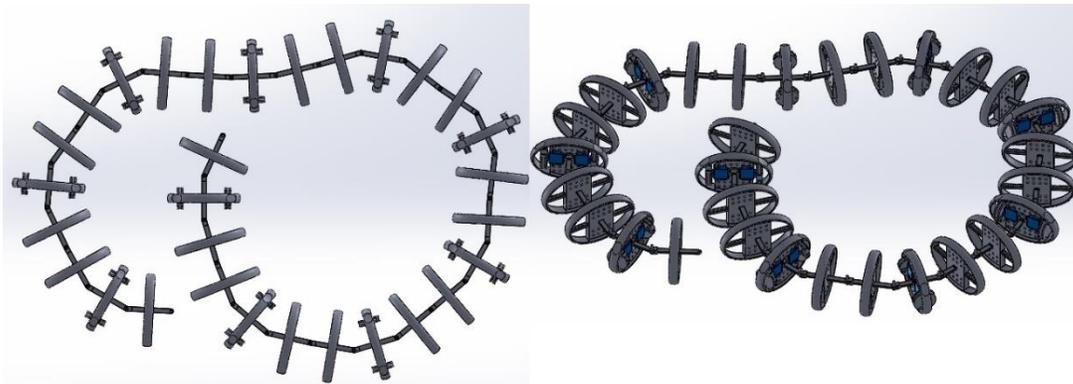


Figura 19 Ensamblaje virtual del robot comparado con "Vuelta Omega" de *C.elegans* (Gray, Hill, & Bargmann, 2005). El diseño permitiría obtener una rotación similar a la del gusano con 10 segmentos.



Modificaciones de diseño

En un principio se pensó en utilizar un método de desplazamiento de la vértebra distinto a la tanza, en donde el adaptador del servomotor fuera más parecido a un actuador lineal con un engranaje y un segmento rígido dentado del cual la vértebra pasiva estuviese fija. El problema con esta propuesta es dual, al ser piezas impresas hay que tener mucha precisión en los detalles del segmento rígido ya que de no ser así el engranaje del servo no encajaría en los dientes del segmento. El segundo problema es que, al tener un desplazamiento curvo, habría que calcular el radio de giro de las vértebras y para distintas separaciones entre vertebras este radio sería distinto. Por lo que cada vez que se varia el largo del eje central habría que crear nuevas piezas y no permite un nivel de adaptación tan grande como el sistema de tanza.

Como mencionamos durante el capítulo hay varias ventajas que posee este diseño comparado con el robot propuesto por Busbice, dentro de las cuales cabe mencionar las siguientes:

- Su diseño biomimético permite una distribución de las neuronas motoras con una aproximación a la posición corporal del *C. elegans*.
- Permite tener sensores espacialmente distribuidos a lo largo del cuerpo, por lo que se podrían obtener gradientes de una variable que se desea medir.
- Un diseño modular que permite una fácil construcción y modificación del largo del robot.

Diseño Electrónico

Sistema

El sistema fue diseñado pensando en el usuario final, actualmente el Dr. Pablo M. Gleiser, Investigador Independiente del CONICET en el Departamento de Física Médica del Centro Atómico Bariloche, y el becario doctoral del CONICET y Magister en Física Carlos Valencia Urbina. Los usuarios cuentan con nociones básicas de electrónica, y capacidad de replicar y/o modificar el diseño. Teniendo una visión más amplia, la utilización de este robot está orientada a todo aquel que desee tener una mejor herramienta en el estudio del nematodo *C. elegans*.

Uno de los requerimientos del sistema electrónico es que debe ser capaz de controlar y monitorear cada uno de los módulos de acción como un sistema distribuido y escalable, en el sentido de que debe aceptar la capacidad de agregar o quitar módulos.

Para cumplir con este requerimiento en donde se puedan agregar o quitar módulos, se propuso que cada módulo de acción sea independiente del otro y responsable de sus sensores y actuadores.

El primer paso para el diseño electrónico fue establecer qué protocolo de comunicación se utilizaría para la comunicación entre los módulos. Como vimos anteriormente, el módulo de acción es el que toma los datos de los sensores y actúa los motores. Esencialmente almacena datos, no tiene “inteligencia” propia porque no se encarga de hacer cálculos específicos. Este factor y el hecho de que haya varios módulos de acción permite inferir que este módulo podría ser un *esclavo (slave)*. En cambio, el módulo de comunicación se encarga de la recolección y distribución de la información de todos los módulos de acción, debe saber cómo interactuar con la PC y luego saber a qué módulo entregarle la información correspondiente. Como se encarga de leer y escribir sobre cada módulo podemos inferir que el módulo de comunicación se comporta como *maestro (master)*. Esto en resumen nos da la idea de que estamos trabajando con un sistema que posee un master y varios slaves.

Elección de protocolo

Algunos de los requerimientos del sistema son los siguientes:

- El sistema debe ser capaz de controlar y monitorear cada uno de los módulos de acción como un sistema distribuido y escalable. Debe aceptar la capacidad de agregar o quitar módulos.
- El sistema debe permitir carga de secuencias de movimientos preestablecidos para los módulos de acción.

Existen varios tipos de interfaces de comunicación, cada uno con sus ventajas y desventajas. Se detallan algunos de los más utilizados y las razones por las cuáles se utilizó el seleccionado.

UART/USART: Los protocolos UART (del inglés Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) y USART (de inglés Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter) son una interfaz serie asincrónica o sincrónica respectivamente. La mayoría de los controladores disponen de hardware UART por lo que lo hace uno de los protocolos más utilizados. No se decidió utilizarlo ya que emplea una línea para transmitir (Tx) y otra para recibir (Rx) para cada dispositivo con el que se quiera comunicar, esto no es viable en el proyecto ya que requeriríamos de un microcontrolador maestro con varios pins de Tx y Rx.

SPI: El bus SPI (del inglés Serial Peripheral Interface) es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos. Posee una desventaja similar al protocolo anterior ya que para cada dispositivo que se quiera agregar, el maestro debe tener un pin de selección de esclavo (SS) por lo que se decidió no optar por esta alternativa.

CAN: El bus CAN (del inglés Controller Area Network) es un protocolo de comunicación basado en una topología bus para la transmisión de mensajes en entornos distribuidos. Este protocolo se tuvo en cuenta, pero no presenta tanta sencillez como el protocolo seleccionado y la robustez que posee el bus CAN no se consideró necesaria en este diseño.

I2C: El protocolo Circuito Inter-Integrado (I²C) es una interfaz serial útil para comunicarse con otros periféricos o dispositivos microcontroladores. El módulo I2C puede operar de alguna de estas dos maneras dentro del sistema, como dispositivo esclavo o como dispositivo maestro. A su vez, el sistema puede ser multimaestro y/o multiesclavo. El módulo I2C contiene una lógica de maestro y una lógica de esclavo independientes que generan interrupciones basadas en sus eventos. (Microchip, 2019)

Al momento de decidir sobre la comunicación a utilizar, se tomó en cuenta el requerimiento que la lectura del registro de variable se realiza aproximadamente 5 veces por segundo. La comunicación I2C permite una velocidad de transmisión mínima de 100kb/s denominada Standard Mode. Para ver si esta velocidad es suficiente se realizaron algunas estimaciones en base a la cantidad de sensores a utilizar y la cantidad de información que provee cada uno.

Cantidad de bits por cada elemento previsto del módulo de acción:

- 8 bits por sensor piezoeléctrico (x4) (tomando esta como cantidad máxima de bits ya que se pueden cambiar por sensores micro-switch)
- 8 bits por servo (x2)
- 8 bits por LDR (x2)
- 8 bits del Termómetro Digital
- 8 bits del estado modulo

Esto da un total de 80 bits. El robot completo apunta a tener 10 módulos de acción por lo que el total de bits es igual a 800 bits y el requerimiento de lectura del registro es 5 veces por segundo. Esto da un total de 4kbits/s lo cual es mucho menor a los 100kb/s de la mínima velocidad de transmisión del bus I2C por lo cual aprueba el requisito con un gran margen. Considerando esto, optamos por su elección y observamos que posee varias ventajas más.

- Cumple con los requerimientos de velocidad estipulados en el proyecto
- Utiliza solo 2 pines en los microcontroladores lo cual permite usar micros más chicos y fácil conexión.
- Tiene la capacidad de añadir varios esclavos lo cual es una gran ventaja para un diseño modular.

Algunas funciones claves que utilizamos del módulo I2C son:

- Detecta direcciones (addresses) de 7-bits. Esto permite tener varios módulos conectados, con 7 bits se puede tener hasta 127 módulos comunicándose si se desea. En nuestro caso se apunta a tener unos 10 módulos.
- Soporta una velocidad de 100kb/s para el bus de comunicación. Con 10 módulos contamos aproximadamente con una tasa de transferencia de 4kb/s por lo que la velocidad del I2C es más que suficiente.
- Lógicas independientes para master y esclavo. Esta función permite que se pueda adaptar mejor a distintas funcionalidades que se le quieran dar al robot, donde los esclavos pueden mantenerse igual y solo cambiar la funcionalidad del master.

Modo en el que trabaja

La interfaz I2C usa un protocolo comprensible para asegurar la transmisión y recepción de datos. Durante la comunicación, un dispositivo actúa de “maestro” (master). Inicia la transferencia en el bus y genera las señales de reloj (clock) para permitir la transferencia, mientras que los demás dispositivos actúan de “esclavo” (slave) respondiendo a la transferencia. La línea de clock, SCLx, es una salida del master y entrada al esclavo, aunque ocasionalmente el esclavo controla la línea SCLx. La línea de datos, SDAx, puede ser salida y entrada tanto del maestro como del esclavo. Las líneas SDAx y SCLx son bidireccionales (Microchip, 2019). Su conexión se puede apreciar en la Figura 20.

En el protocolo I2C, cada dispositivo tiene una dirección. Cuando un maestro necesita iniciar una transferencia de datos, primero transmite la dirección del dispositivo al cual se quiere “comunicar”. Todos los dispositivos “escuchan” para ver si ésta es su dirección. Dentro de la dirección, el bit 0 especifica si el maestro quiere leer del dispositivo esclavo, o escribir en él. El maestro y esclavo están siempre en modos opuestos de operación (transmisor o receptor) durante una transferencia de datos. Esto quiere decir que operan siguiendo una de las dos relaciones:

- Maestro-Transmisor y Esclavo Receptor
- Esclavo-Transmisor y Maestro Receptor

En ambos casos, el maestro origina la señal de clock SCLx.

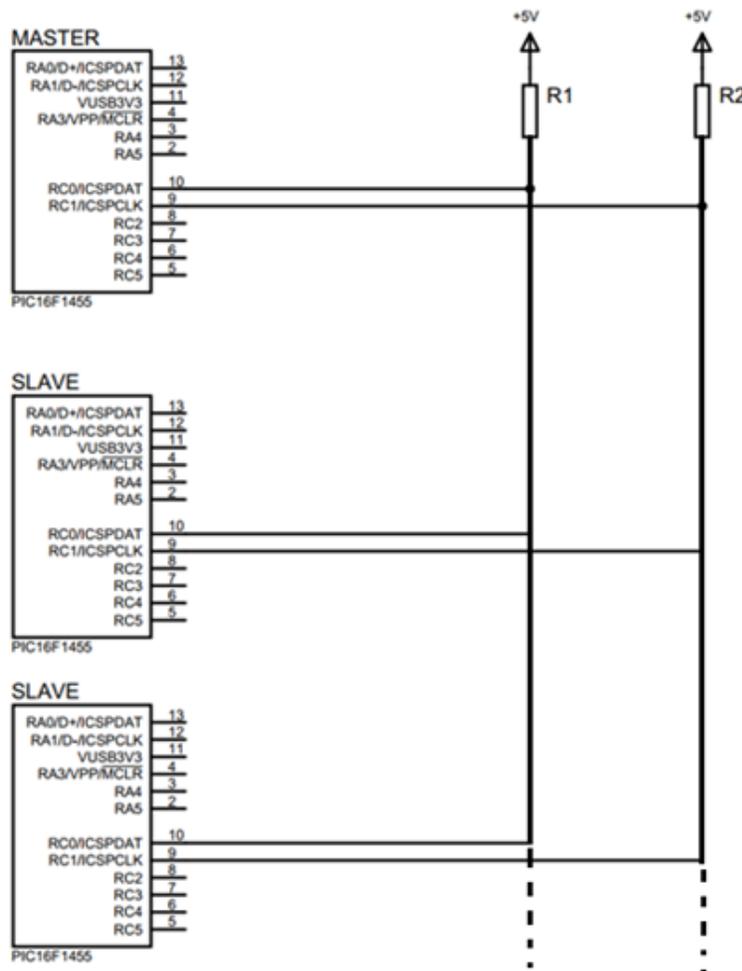


Figura 20 Circuito de conexión de comunicación I2C entre el maestro (master) y los esclavos (slaves). Las líneas conectadas a R1 y R2 (resistencias de pull-up) son SDAx y SCLx correspondientemente, todos los esclavos (slave) se conectan a estas líneas como se ve en la figura. Su conexión es fácil y solo necesita de esos dos pines para que la comunicación funcione.

Características eléctricas del protocolo I²C

En el diseño hay que contemplar las características eléctricas de este protocolo. En nuestro caso estaremos usando el Standard Mode ya que su velocidad de transmisión (100kbit/s) es más que suficiente como vimos anteriormente.

Las líneas SDAx y SCLx están conectadas a la fuente de voltaje a través de las resistencias pull-up. Estas resistencias cumplen la función de establecer un estado lógico HIGH (Alto) en el pin correspondiente para evitar falsos estados que se pueden producir por ruido. Para saber el valor de estas resistencias es necesario hacer unos cálculos que se pueden observar en la sección [Selección de componentes; Resistencias].

Algunas de las características eléctricas que cabe mencionar son los rangos máximos de las líneas de SCL y SDA.

- V_{IL} (Low-level input voltage): $0.3V_{DD}$. (En español es el voltaje bajo de entrada) Este valor nos determina el "0" lógico.

- V_{IH} (High-level input voltage): $V_{DD(max)} + 0.5V$ o $5.5V$, considerando el menor de estos. (En español es el voltaje alto de entrada) Este valor nos determina el "1" lógico.
- C_b (Bus capacitance): $400pF$. (En español es la carga capacitiva del bus) La capacitancia del bus limita la cantidad de interfaces o componentes conectados al bus, el largo del trazado sobre el PCB, el largo del cable por el que se conectan los módulos y el valor de las resistencias de pull-up.

Todos estos factores se tienen en cuenta al momento de diseñar y de la selección de componentes, y se verá más adelante en la sección [Selección de componentes]

Funcionamiento del Sistema

Para explicar el funcionamiento del sistema es importante considerar las dos partes de éste, el maestro y el esclavo. Como mencionamos, el maestro se comunica con los esclavos y los esclavos se comunican con los sensores y actuadores.

¿Por qué hacer esta cadena de comunicación cuando podría haber un solo dispositivo comunicándose con todos los sensores y actuadores directamente?

Además de las ventajas que se mencionaron anteriormente como la practicidad de tener un sistema modular, esta cadena provee cierta sencillez al momento de ensayar el código y replicarlo. No solo esto, si en algún momento se quiere agregar más sensores o cambiarlos, se puede actualizar el código de los esclavos y no sería necesario cambiar el microcontrolador que actúa de maestro.

La Figura 21 presenta una vista general de cómo se encuentra actualmente el sistema, donde las líneas punteadas indican que se pueden seguir conectando esclavos a las líneas SDA y SCL.

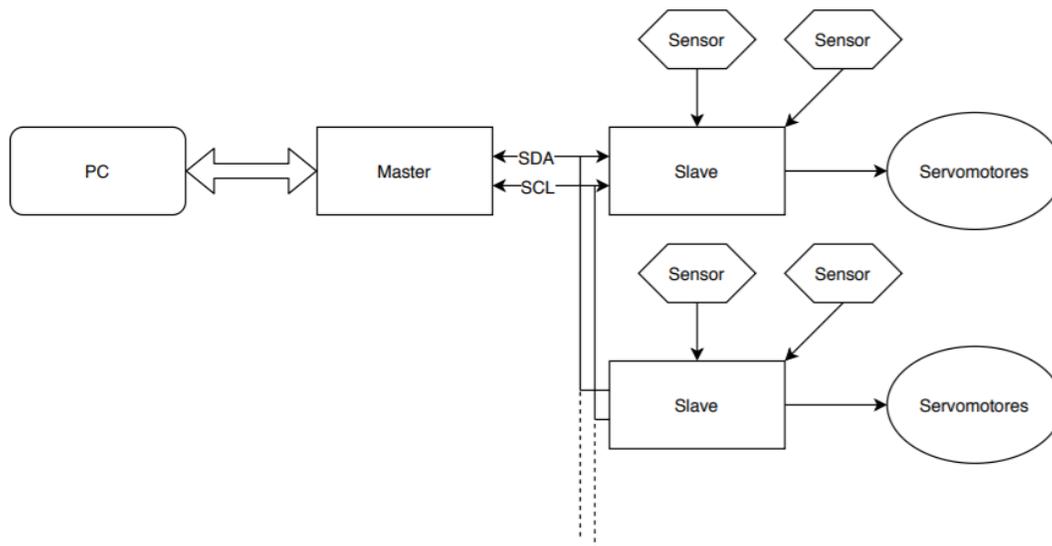


Figura 21 Diagrama general del sistema completo formado por la PC principal, el maestro (master) y los esclavos (slaves). La figura presenta solo dos esclavos, y en el diseño del robot completo se extenderá hasta diez (líneas punteadas). Se muestran solo dos sensores por esclavo, pero estos tienen la posibilidad de tener hasta siete sensores si se desea.

Sensores de interés para estudiar interacciones del gusano con el entorno:

- Sensor piezoeléctrico: Estos sensores sirven para cuantificar el contacto del robot con las distintas superficies. Con esto se podría llegar a estudiar la interacción social entre los gusanos donde surgen unos comportamientos interesantes.
- Sensor Microswitch: Estos sensores también se puede utilizar como sensor de contacto para registrar el contacto con otras superficies.
- Sensor de temperatura: El *C. elegans* posee ciertos comportamientos también cuando es sometido a distintas temperaturas por lo cual sería otra cualidad a estudiar.
- Sensor LDR: Estos se utilizaron en el prototipo actual para simular una variación lumínica en el entorno del gusano.
- Sensores que utilicen el protocolo de comunicación I2C. A estos sensores no hace falta conectarlos a los pines del esclavo, se conectan directamente al bus de comunicación por lo que el maestro podría comunicarse directamente con ellos.

El funcionamiento del sistema empieza cuando cada esclavo toma los datos de sus sensores, luego de almacenarlos el maestro se comunica con cada uno para obtener los valores de cada sensor. Cuando el maestro obtiene los datos se comunica con la PC que tiene cargada la simulación basada en el conectoma del *C. elegans*. Una vez procesados los datos ésta le devuelve al maestro los valores que le corresponden a cada servomotor. El maestro se encarga de comunicarle a cada esclavo a qué posición debe mover cada servomotor. Este ciclo se repite hasta que se desee parar.

Para realizar las pruebas en el robot, en vez de comunicarnos con la PC, el maestro tiene una tabla de valores donde dependiendo de los datos de los sensores, devuelve una posición para cada motor. Esto se realizó de esta manera para poder probar el movimiento del prototipo y caracterizar el robot.

Interfaz con esclavo

En la Figura 22 se puede observar el esclavo como un “dispositivo I2C independiente” donde solo se toman en cuenta las entradas y las salidas del sistema y no el comportamiento por dentro. Cada esclavo funciona del mismo modo, aunque si se desea se puede variar la programación individualmente. Cuando se añade un nuevo módulo esclavo al sistema, lo único que se tiene que modificar en el código del esclavo es la dirección (address) que tendrá el esclavo en el bus I2C. Todos los esclavos tienen direcciones incrementales de la dirección 31 a la dirección 40.



Figura 22 Flujo de información que maneja el esclavo. Recibe el desplazamiento de los motores del maestro y le devuelve al maestro el valor de los sensores.

Para interactuar con cada esclavo es necesario saber la dirección del mismo y la disposición de los registros a escribir o leer. En la Tabla 1 se presenta el mapa de memoria del esclavo donde se pueden observar los registros utilizados hasta el momento y sus respectivos detalles. Con esta información se puede lograr la transmisión y recepción de datos desde cualquier dispositivo que tome el rol de master conectado al bus de comunicación I2C.

Tabla 1 Mapa de memoria del esclavo con la información de los registros utilizados.

Registro	Tipo	Variable	Rango de valores	Descripción
1	Lectura	Valor1	0-255	Byte alto del sensor 1
2	Lectura	Valor2	0-255	Byte bajo del sensor 1
3	Lectura	Valor3	0-255	Byte alto del sensor 2
4	Lectura	Valor4	0-255	Byte bajo del sensor 2
5	Lectura	Valor5	0-255	Byte alto del sensor 3
6	Lectura	Valor6	0-255	Byte bajo del sensor 3
7	Lectura	Valor7	0-255	Byte alto del sensor 4
8	Lectura	Valor8	0-255	Byte bajo del sensor 4
9	Lectura	Valor9	0-255	Byte alto del sensor 5
10	Lectura	Valor10	0-255	Byte bajo del sensor 5
11	Lectura	Valor11	0-255	Byte alto del sensor 6
12	Lectura	Valor12	0-255	Byte bajo del sensor 6
13	Lectura	Valor13	0-255	Byte alto del sensor 7
14	Lectura	Valor14	0-255	Byte bajo del sensor 7
15	Escritura	Ciclo	15-75	Ciclo del PWM de los motores

En las siguientes secciones está explicado el actual sistema que está incorporado dentro del robot. Se implementó un código con el cual se puso a prueba el movimiento de los servomotores y la lectura de los sensores de forma simultánea. En particular se utilizaron sensores de luz LDR (en inglés Light Dependent Resistor) que son un componente pasivo cuya resistencia varía en función de la luz

que recibe. El código está pensando más como un banco de prueba donde el movimiento del robot está determinado únicamente por el valor de los sensores de luz. Esto permite fácilmente poner a prueba el funcionamiento del robot. Es importante notar que este modo no está conectado a la red neuronal que se encuentra en la PC y los valores que se les dan a los servomotores vienen desde el maestro.

En el futuro se le agregarían más sensores a los esclavos como los mencionados en la sección [Funcionamiento del Sistema] y el maestro se encargaría de enviarle los datos de los sensores a la PC, la cual devolvería los valores que entrega la red neuronal.

Funcionamiento del Esclavo

El módulo de acción (esclavo) es el responsable de obtener los valores de los sensores que posee, guardarlos en los registros correspondientes y aguardar la orden del maestro para entregárselo. El código del esclavo se puede encontrar en el repositorio del código¹ [Anexo I]. El módulo cuenta con dos temporizadores (timers), que rigen el comportamiento del módulo de acción. Éste opera en función de los eventos de interrupción que se generan con los temporizadores utilizados. El primero (Timer 1) tiene un tiempo de 100ms y al finalizar este tiempo, adquiere dentro de una rutina de interrupción el valor de los sensores y los guarda en un registro que será accesible a través del bus I2C. El funcionamiento de este timer se puede apreciar en la Figura 23.

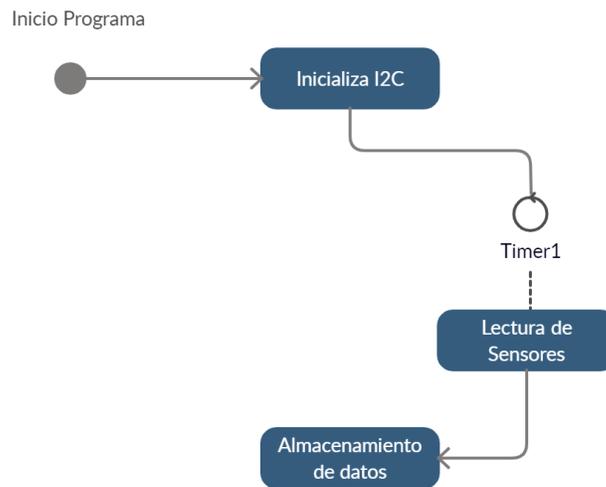


Figura 23 Funcionamiento del temporizador Timer 1. Cuando se activa la interrupción del Timer 1, el esclavo lee los datos de cada uno de los sensores que tiene y los almacena para luego ser leídos por el master.

El segundo temporizador (Timer 2) (ver Figura 24) cuenta con la función especial de marcar el periodo de la señal PWM (Pulse Width Modulation). La señal PWM es una señal a la cual se le modifica el ciclo de trabajo (duty cycle) y en este caso se utiliza como señal de control para los servomotores que accionan el movimiento sobre las vértebras. Cuando el maestro le escribe al esclavo, a través del bus I2C se activa una interrupción. El maestro le escribe el valor de posición de los servomotores al esclavo, éste toma la posición y la convierte en el duty cycle.

¹ https://github.com/JulioCamposHaedo/C_elegans_Robot

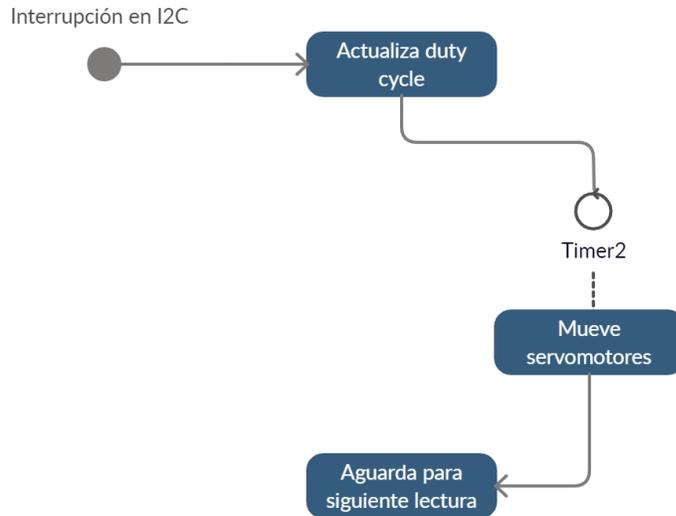


Figura 24 Funcionamiento del temporizador Timer 2. Cuando se activa la interrupción, se actualiza el valor del duty cycle de la señal PWM la cual tiene el periodo determinado por el Timer 2. Con la señal PWM se mueven los servomotores a la posición deseada.

Los servomotores trabajan con esta señal PWM que, de acuerdo a valores específicos de ciclos de trabajo, le corresponden distintas posiciones del servomotor (ver Figura 25). En nuestro caso, con una señal PWM de periodo 20ms, el servo se mueve a la posición “-90°” con un duty cycle de $\sim 0.5ms$, “0°” con un duty cycle de $\sim 1.5ms$ y “90°” con un duty cycle de $\sim 2.5ms$.

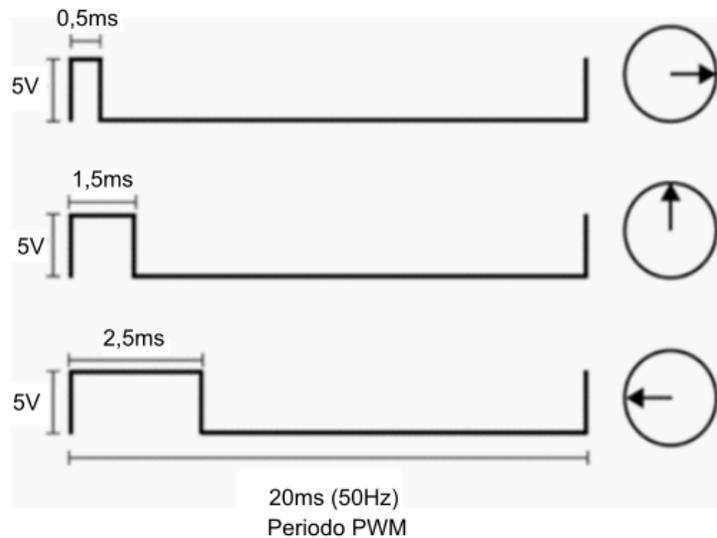


Figura 25 Señal PWM que se les envía a los servomotores, donde dependiendo del duty cycle varía el grado de rotación de cada servomotor. Se puede observar en la figura que con un duty cycle de 0.5ms (2.5%) el servomotor se posiciona a la derecha 90°, con 1,5ms (7.5%) se posiciona verticalmente y con 2.5ms (12,5%) se posiciona hacia la izquierda 90°.

Esta es la ventaja de usar servomotores a comparación con motores DC. El servomotor como elemento comercial ya tiene implementado el lazo de control cerrado, y al enviar el duty cycle se sabe a la posición que girará el servomotor. En cambio, para los motores DC comerciales, hace falta diseñar e implementar un lazo de control para establecer su posición.

Funcionamiento del Master

Una vez que el esclavo haya guardado los datos de los sensores, el maestro tomará los datos y se los entregará a la PC que los utilizará para activar el programa que controla el comportamiento del robot. Como, por ejemplo, una simulación basada en el conectoma del C. elegans, este programa envía los comandos que debe ejecutar el robot. Los valores correspondientes de estos comandos son enviados al maestro, que a su vez se encarga de entregarle a cada esclavo su valor correspondiente para que los mismos activen los servomotores.

El maestro implementado en este trabajo es un prototipo del módulo de comunicación, y no se comunica con la PC. Este prototipo nos permite usar al maestro como banco de pruebas para los módulos de acción.

Para lograr esto, el maestro trabaja con un temporizador. Este Timer 1 tiene un tiempo de 200ms lo cual es cinco veces por segundo cumpliendo el requerimiento de tiempo de lectura del proyecto. Cuando el Timer 1 se agota (Figura 26), el maestro lee de los esclavos los datos de los sensores, interrogando a cada esclavo a través del bus I2C. Dependiendo del valor del dato, el maestro le devuelve a cada esclavo un valor correspondiente para que le asignen a los servomotores.

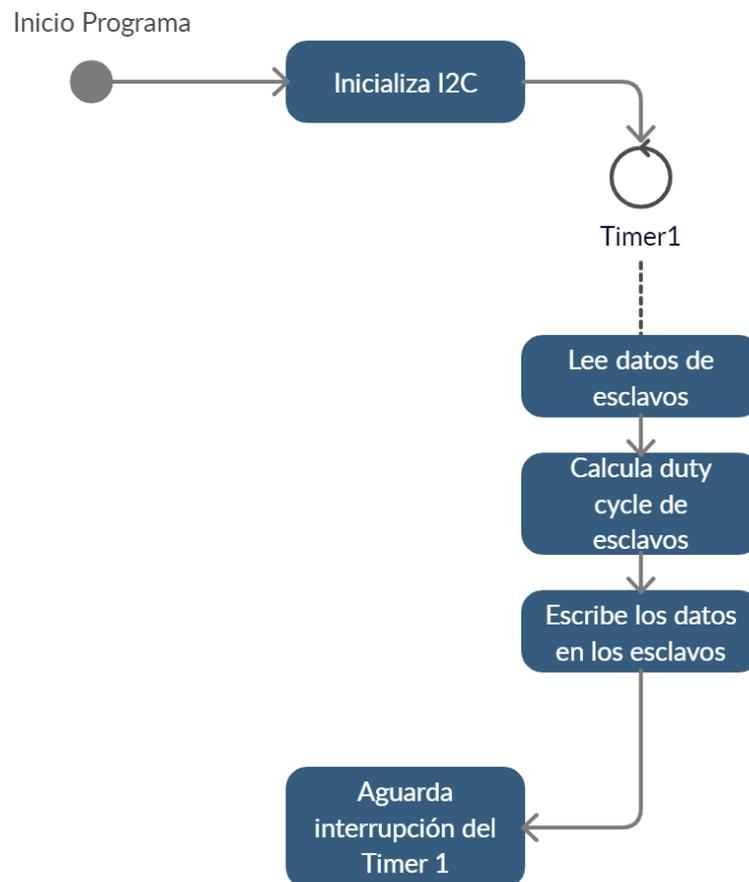


Figura 26 Funcionamiento del temporizador Timer 1 del master. Cuando se activa la interrupción del Timer 1 el master manda el comando de lectura hacia los esclavos, con estos valores calcula el ciclo de trabajo de los servomotores para el desplazamiento de las vértebras. Luego escribe este valor en cada esclavo según corresponda.

En el código actual del maestro² [Anexo I], la cantidad de esclavos añadidos al robot está presente como una variable, la cual se debe modificar cada vez que se añade un nuevo módulo de acción.

En este diseño el maestro está programado en el mismo microcontrolador utilizado para los módulos de acción (esclavos), sin embargo, el maestro puede ser cualquier otro dispositivo que cuente con un módulo I2C como por ejemplo un Arduino o Raspberry Pi.

Las ventajas de utilizar un microcontrolador son:

- Su tamaño: Al ser pequeño, permite reducir el tamaño de las vértebras.
- Precio: Es económico comparado con los otros dispositivos.
- Función: Es un dispositivo que permite el diseño de una función específica y no posee periféricos innecesarios para este objetivo.

Los demás dispositivos están pensados con una función de prototipado general por lo que suelen tener un tamaño mayor y diversos periféricos que no se utilizarían, sin embargo, una de las ventajas es que al utilizar plataformas de desarrollo más sencillas permiten un acceso a otras comunidades de usuarios.

² https://github.com/JulioCamposHaedo/C_elegans_Robot

Diseño de PCB

Selección de componentes

Los componentes electrónicos que se usan para el armado del robot (ver Tabla 2) son componentes comerciales de fácil adquisición y bajo costo. Este es un requerimiento que impusimos ya que una de las ideas primordiales de este proyecto es que sea fácil de replicar y que todo aquel que quiera usar el robot como herramienta en sus estudios pueda armarlo. Esto nos lleva al segundo punto importante teniendo en cuenta el requerimiento anterior. Como quisimos que sea fácil de replicar, la placa fue realizada de una manera sencilla con componentes de tecnología de agujero pasante más conocida por las siglas THT (del inglés Through-Hole Technology). Esta tecnología permite que el soldado de los componentes sea mucho más sencillo. Incluso podrían usarse placas experimentales perforadas para construir un prototipo. Las placas experimentales son muy económicas en comparación a los PCB que se diseñan con un ruteo específico lo cual es importante para que sea de fácil acceso.

En lo que respecta a la alimentación de la placa, se tomó en cuenta que el robot puede tener 10 módulos y para no tener que alimentar cada uno por separado se decidió utilizar una sola fuente de alimentación de 12V y 6A. Los servomotores activos consumen aproximadamente 220mA cada uno, por lo que con 20 motores todos activos al mismo tiempo habría un consumo de 4.8A. Como los microcontroladores trabajan en un rango de 2.3V a 5.5V, se le agregó al circuito un regulador de tensión a 5V para poder alimentarlos.

Tabla 2 Información sobre los componentes utilizados en la placa diseñada. La placa se puede ver en la Figura 26.

Descripción	Footprint	Comentario	Designador	Cantidad
Sensor Piezoeléctrico o switch	2-pin Header	7BB-12-9	H3,H4,H6,H7	4
Sensor de luz	2-pin Header	LDR	H1, H5	2
Sensor de temperatura	2-pin Header	LM35	H2	1
Microcontrolador	14 pin Dip Socket	PIC16F1455-I/P	U1	1
Regulador de Voltaje	TO-220	LM7805	VR1	1
Alimentación	2-pin Terminal	Alim	J2	1
Comunicación I2C	2-pin Terminal	I2C	J1	1
Servomotores	3-pin Header	Servo	H8, H9	2
Resistencias Pull-up	Axial-0.4	2.2k	R1, R2	2
Resistencias LDR	Axial-0.4	1k	R3, R4	2
Resistencias Piezoeléctrico	Axial-0.4	10M	R5, R6, R8, R9	4
Capacitores de desacople	Radial 0805	0.1uF	C1, C2	2

En la Figura 27 se puede ver el esquemático y la vista 2D del PCB diseñado, en la Figura 28 se puede observar la vista 3D de la placa. Se incluyó la interfaz para los sensores de luz utilizados para las pruebas y conectores para el conjunto de sensores detallados en la sección [Funcionamiento del Sistema]. El montaje de la placa sobre la vértebra activa se puede observar en la Figura 29

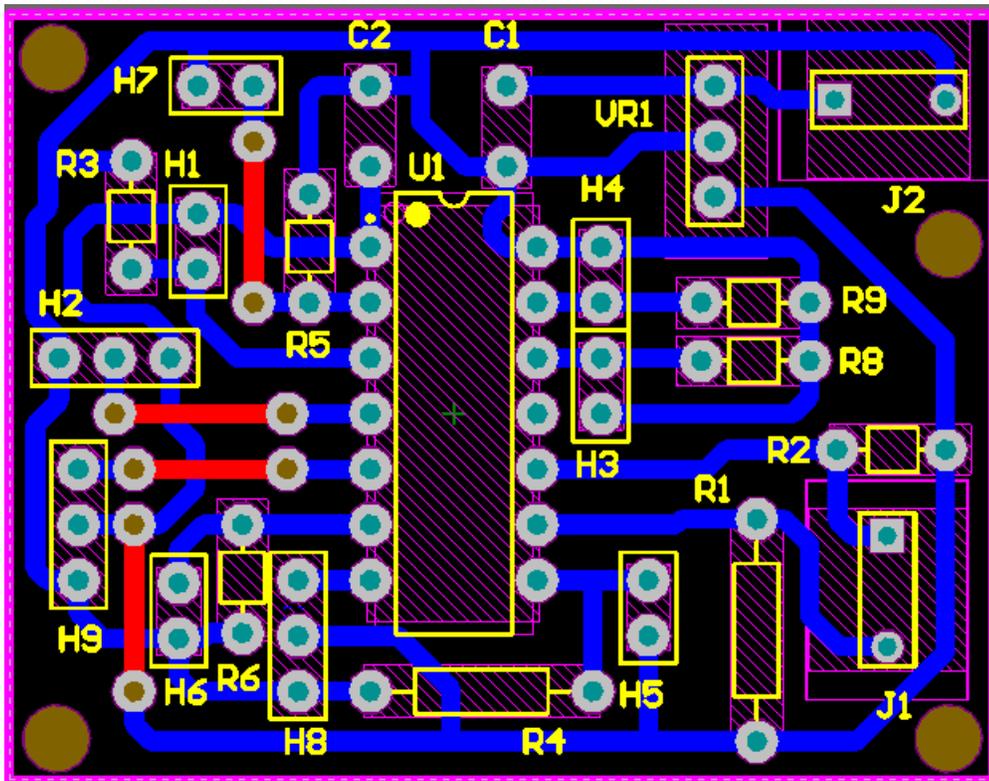
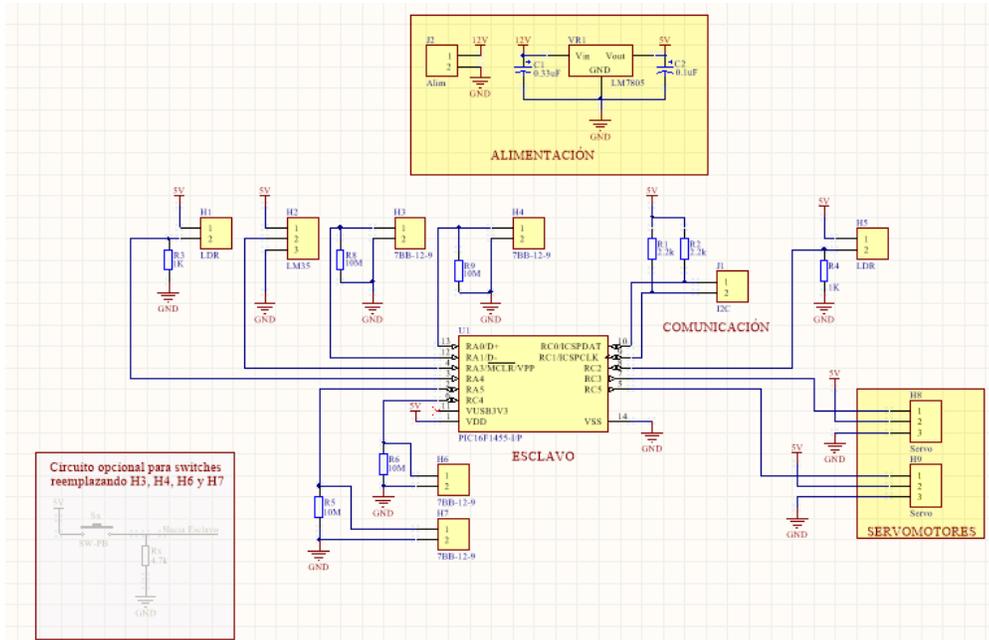


Figura 27 Presentación del esquemático y layout 2D de la placa diseñada. Los detalles se encuentran en el [Anexo II y Anexo III]

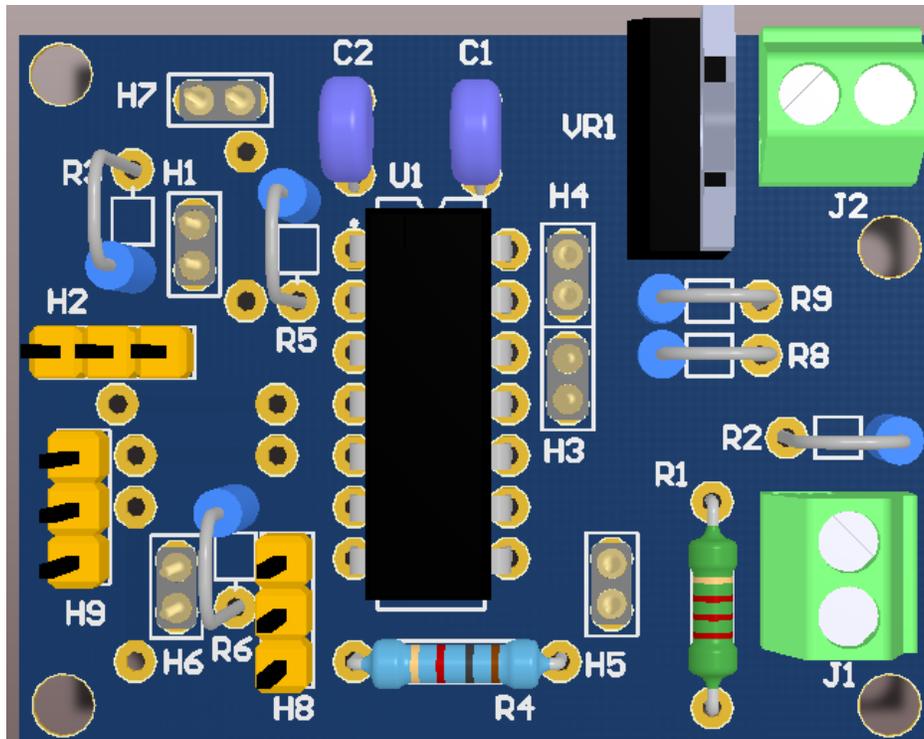


Figura 28 Vista 3D de la placa diseñada, la referencia a cada componente se puede observar en la Tabla 2. El esquemático y vista 2D de la placa se encuentran en [Anexo II y Anexo III]

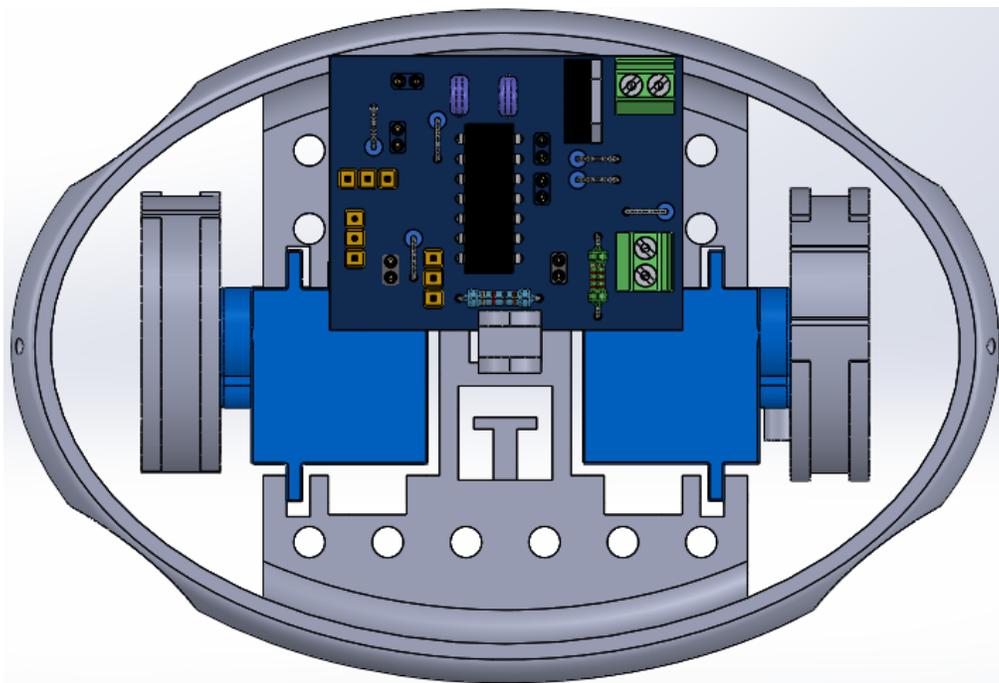


Figura 29 Placa diseñada montada sobre la vértebra activa, se sujetará a la vértebra con los agujeros de montajes que se pueden observar en los extremos de la placa (Figura 27).

Resistencias

El valor de las resistencias de pull-up (R_p) es una consideración importante en la implementación de un bus I2C. Estas resistencias sirven para establecer un estado lógico HIGH (Alto) en el pin correspondiente para evitar falsos estados que se pueden producir por ruido. Tanto el manual de usuario y especificación de bus I2C de NXP (NXP Semiconductors, April 2014) como el reporte de aplicación de Texas Instrument (Texas Instrument, Feb 2015) presentan las ecuaciones para calcular el valor mínimo y máximas de éstas.

Una resistencia chica previene que el pin del I2C quede en un estado lógico bajo, es por esto que el valor de V_{OL} determina la resistencia mínima de pull-up.

$$R_p(\text{min}) = \frac{(V_{CC} - V_{OL}(\text{max}))}{I_{OL}}$$

La resistencia máxima de pull-up está limitada por la capacitancia del bus C_b dado por las especificaciones estándar del tiempo de subida (rise time) del I2C. Si la resistencia es muy grande la línea puede no llegar al valor lógico alto antes de que baje. Mientras más grande la resistencia, más grande es el retraso (delay)

$$R_p(\text{max}) = \frac{t_r}{(0.8473 \times C_b)}$$

En el datasheet del PIC16F1455 (Microchip Technology) se pueden encontrar los valores de V_{CC} (Voltaje de alimentación), V_{OL} (Voltaje bajo de salida), I_{OL} (Corriente baja de salida), t_r (Tiempo de subida) y C_b (Carga capacitiva del bus), reemplazando las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$R_p(\text{min}) = \frac{(5 - 0.6)}{3 \times 10^{-3}} = 1.46 \text{ k}\Omega$$

$$R_p(\text{max}) = \frac{1000 \times 10^{-9}}{(0.8473 \times (400 \times 10^{-12}))} = 2.95 \text{ k}\Omega$$

Una vez que se tuvo el valor mínimo y máximo de la resistencia de pull-up, hubo que decidir el valor de la resistencia basándonos en el trade-off entre velocidad y consumo de potencia. Una resistencia más chica dará una mayor velocidad ya que tiene un delay más chico y la resistencia grande dará un menor consumo. En este caso se consideró mejor optar por la opción que consuma menos energía ya que la velocidad no es un factor limitante. Por esta razón se decidió utilizar una resistencia de $2.2 \text{ k}\Omega$.

Microcontrolador

Para la elección del microcontrolador se tomaron varios criterios de elección como la cantidad de pines suficiente para los sensores y actuadores, soporte de protocolo de comunicación I2C, dos módulos de PWM, fácil disponibilidad en el mercado y bajo costo.

El microcontrolador PIC16F1455 (Microchip Technology) cuenta con todas estas características y además cuenta con conversores analógicos/digitales por si se desea agregar algún sensor analógico. Un factor importante a tener en cuenta también es que la capacitancia de los pines que se utilizan para la comunicación I2C tienen una capacitancia de 10 pF . Este es un valor estándar y teniendo en cuenta que se usarán hasta diez de módulos de acción, se puede calcular entonces que la

capacitancia de todos los microcontroladores será de 100pF, dejando un margen máximo de 300pF para los demás componentes.

Cable de conexión entre módulos

El factor que limita el largo y el tipo de cable que se use es la capacitancia del bus. Como mencionamos en secciones anteriores la carga capacitiva máxima para el protocolo I2C en Standard Mode es de 400pF. Anteriormente establecimos que la capacitancia de los diez microcontroladores es de 100pF, por lo que el margen de capacitancia para el cable que tenemos es de aproximadamente 300pF como máximo. Según el diseño mecánico el robot completo (contemplando 10 módulos) mide aproximadamente 2m. Se escogió un cable CAT5 ya que su capacitancia es de aproximadamente 3.3pF por metro, con lo que estamos bien por debajo del margen de 300pF. Además permite conectar las señales de I2C y las señales de alimentación en la misma vaina.

Pruebas, simulaciones, resultados, implementación

Un parámetro importante del robot es el ángulo de rotación que puede realizar cada módulo ya que este ángulo de rotación es el equivalente a la contracción y expansión muscular. Para determinar este ángulo, se estudió la cinemática directa del robot. En este análisis se miden todas las propiedades geométricas de las partes involucradas y su movimiento en la rotación para calcular la posición final de las partes en la estructura articulada. Conociendo la posición inicial de las partes y su posición final se puede obtener el ángulo de rotación completo de cada módulo.

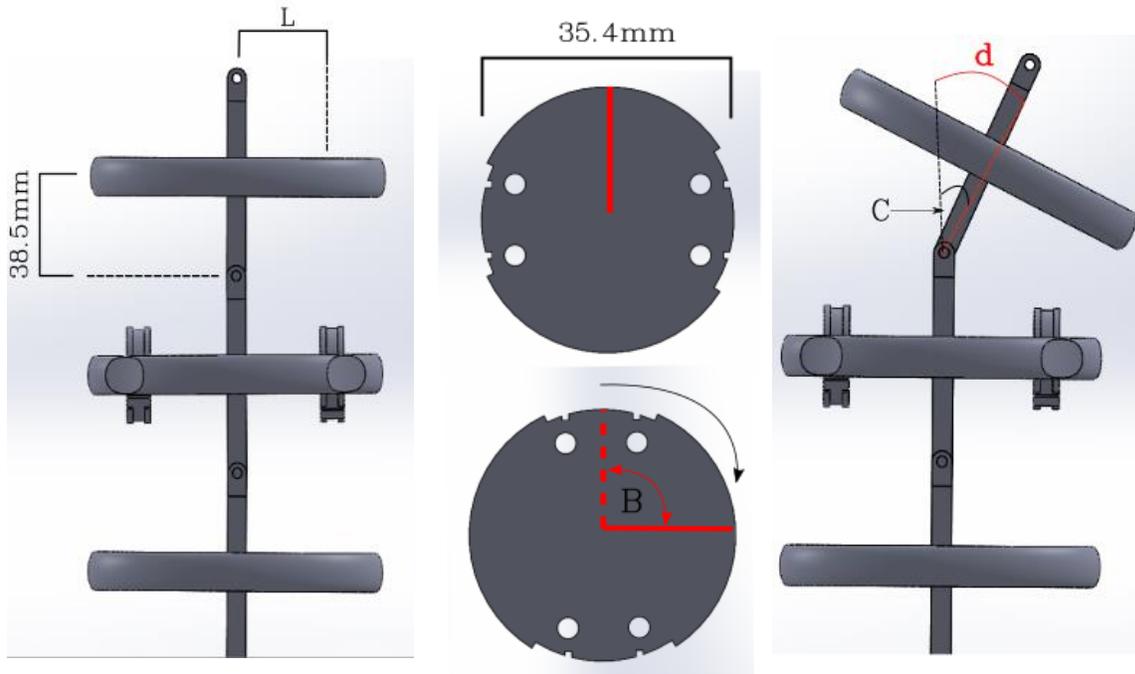


Figura 30 Estas figuras indican las medidas de las piezas que están involucradas en las ondulaciones de las vértebras. Se puede observar el módulo de acción desde una vista superior y la vista de los adaptadores de los servomotores desde una vista lateral. Indicado en rojo se muestra el movimiento que ocurre al girar el servomotor.

Las piezas involucradas en la rotación son el eje central, la vértebra pasiva y el adaptador del servomotor, y se pueden observar en la Figura 30 donde en rojo está marcado el movimiento durante la rotación. La tanza utilizada tiene un bajo factor de estiramiento y como las fuerzas aplicadas al movimiento no son de gran magnitud se decidió despreciar este factor. Un componente que nos limita el rango de rotación son los resortes. Como estos pueden variar según el prototipo, no se tomaron en cuenta para el análisis de cinemática directa, pero si fueron considerados luego en la comprobación del movimiento del prototipo.

El largo de “L” depende del agujero en el cual se ajuste el tornillo, éste está determinado por la ecuación: $L = 19 \text{ mm} + 7x$ donde x representa el número del hueco en donde se coloque el tornillo siendo $x=1$ el hueco más cercano al eje central (ver Figura 14).

Cuando el servomotor gira un ángulo “B”, la tanza se enrosca sobre el adaptador del servomotor provocando que la vértebra pasiva se acerque a la activa. Esto describe un arco “d” desde la posición inicial a la final, centrado alrededor del punto de rotación y girando un ángulo “C”. Debemos tener

en cuenta que este grado de rotación es para solo una de las vértebras pasivas dentro del módulo. Como estas vértebras están espejadas y se contraen al mismo tiempo, el ángulo de rotación del módulo está dado por “ ϑ ” que simplemente es el doble del ángulo de rotación “ C ” (ver Figura 31).

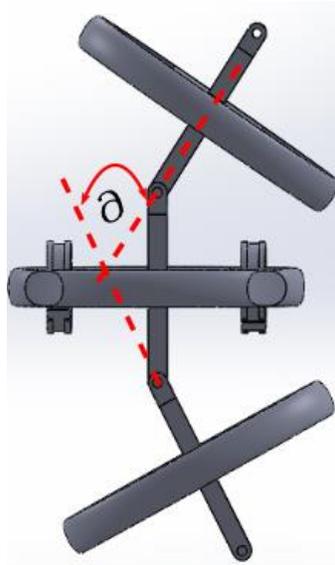


Figura 31 Rotación completa del módulo frente al giro de los servomotores. El ángulo “ ϑ ” es el ángulo de rotación medido entre las dos articulaciones de la vértebra activa (marcado en rojo).

A continuación, se presentan las fórmulas para obtener estos valores.

El arco “ d ” que se desplaza la vértebra está dada por:

$$d = \frac{B \times \pi \times 35.4mm}{360^\circ}$$

Donde $-90^\circ < B < 90^\circ$

El radio de giro depende del punto de ajuste del tornillo, por lo que está determinado por:

$$r = \sqrt{(38.5)^2 + (L)}$$

$$r = \sqrt{(38.5)^2 + (19 + 7x)} = \sqrt{49x^2 + 266x + 1843.25}$$

El ángulo C se puede calcular entonces como:

$$C = \frac{d \times 360^\circ}{2\pi r}$$

Como se estableció antes, el grado de rotación total “ ϑ ” del módulo es el doble de “ C ”.

$$\vartheta = 2C$$

Por lo que la ecuación final para encontrar el grado de rotación es:

$$\vartheta = 2 \times \frac{\frac{B \times \pi \times 35.4mm}{360^\circ} \times 360^\circ}{2\pi \times \sqrt{49x^2 + 266x + 1843.25}}$$

$$\vartheta = \frac{B \times 35.4}{\sqrt{49x^2 + 266x + 1843.25}}$$

La relación entre ϑ y B se ve afectada por el hueco elegido por lo que podemos dejar el valor de ϑ en función de B de acuerdo al hueco al cual se ajusta el tornillo (Ver Tabla 3).

Tabla 3 En la tabla se observa como varía el valor de ϑ (en función de B) dependiendo de la posición del tornillo elegida para sujetar la vértebra.

Número de Tornillo	Valor de ϑ
1	0,762B
2	0698B
3	0,638B
4	0,583B
5	0,534B

En el prototipo se seleccionó el tercer hueco (Tabla 3) de la vértebra pasiva para sujetar el tornillo y como mencioné anteriormente el ángulo del servomotor gira entre -90° y 90° . Por lo que el ángulo de rotación total del módulo en este prototipo tiene los siguientes valores:

$$-57.42^\circ < \vartheta < 57.42^\circ$$

Los valores obtenidos a través del estudio de la cinemática directa nos dan un rango máximo teórico de movimiento. Para corroborar los valores reales del ángulo de rotación se siguieron los siguientes pasos:

1. Se programó al maestro con movimientos predeterminados que simulen una contracción y expansión muscular en un módulo de acción. Esto se logra enviando una señal desde el maestro al esclavo que corresponde al duty cycle que se quiere evaluar.
2. Se colocó el módulo de acción con un lápiz sujeto a un punto de la vértebra pasiva sobre un tablero de dibujo donde se marcó en el mismo la posición de la vértebra activa y el punto de rotación.
3. Al iniciar la secuencia de movimientos, el lápiz marca el arco "d" y cuando la vértebra llega su máxima contracción/expansión se marca con una X el punto al cual llega.
4. Con estos puntos y el arco "d" que marca el lápiz se pudo observar el ángulo de rotación del módulo, se realizaron varias medidas y se obtuvo un promedio de los ángulos de rotación de acuerdo al movimiento del servomotor. Estos valores se pueden observar en la Tabla 4.

La Figura 32 muestra un diagrama de la prueba realizada.

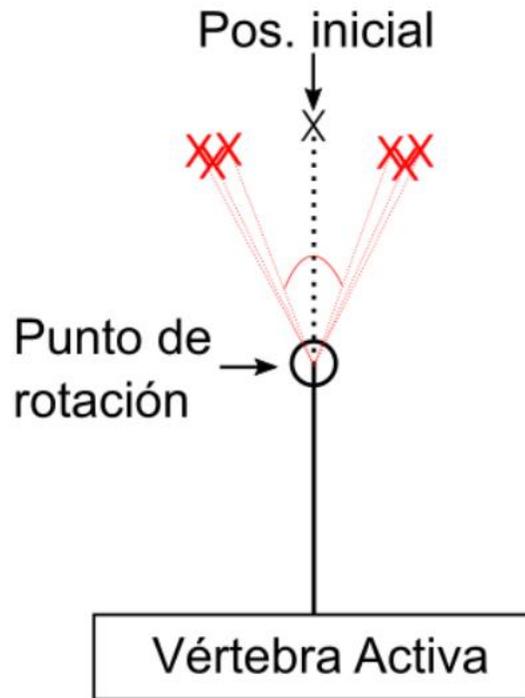


Figura 32 Esquema de la prueba realizada para adquirir el ángulo de rotación en el prototipo. La vértebra activa se fija en una posición y se toma un punto de referencia de una de las vértebras pasivas (Pos. Inicial). Se le envía al esclavo movimientos predeterminados de rotación y se marca con una X roja la posición en la que queda el punto de referencia. Estos puntos se promedian y obtenemos el grado de rotación del prototipo.

Se puede notar en la Tabla 4 que la diferencia entre el valor máximo obtenido por la cinemática directa y el valor máximo de las pruebas es considerable (22.27°), esto se debe a que los servomotores no llegan a girar en su totalidad porque la fuerza que ejercen los resortes es mayor a la fuerza que poseen estos servomotores.

Tabla 4 Valores obtenidos tras realizar las pruebas de rotación de un módulo de acción. Se puede observar en la tabla el valor que le envía el maestro al esclavo, el duty cycle que el esclavo les envía a los servomotores, el rango de giro que realizan los servomotores y el rango del ángulo de rotación del módulo.

Valor que envía el maestro		Duty cycle		Rango de giro del servo		Ángulo de rotación (θ)	
min	max	min	max	min	max	min	max
15	75	2,50%	12,50%	-90°	90°	-34,73°	34,73°
18	72	3,00%	12,00%	-80°	80°	-34,38°	34,38°
22	68	3,67%	11,33%	-70°	70°	-32,47°	32,47°
25	65	4,17%	10,83%	-60°	60°	-29,605°	29,605°
28	62	4,67%	10,33%	-50°	50°	-26,17°	26,17°
32	58	5,33%	9,67%	-40°	40°	-21,63°	21,63°
35	55	5,83%	9,17%	-30°	30°	-17,12°	17,12°
38	52	6,33%	8,67%	-20°	20°	-12,76°	12,76°
42	48	7,00%	8,00%	-10°	10°	-8,34°	8,34°
45	45	7,50%	7,50%	0°	0°	0°	0°

Durante estas pruebas no solo se ensayó el ángulo de rotación, sino que a la vez se demostró que el protocolo I2C funciona correctamente y que el cable CAT5 utilizado permite una buena comunicación a dos metros de distancia (ver Figura 33).

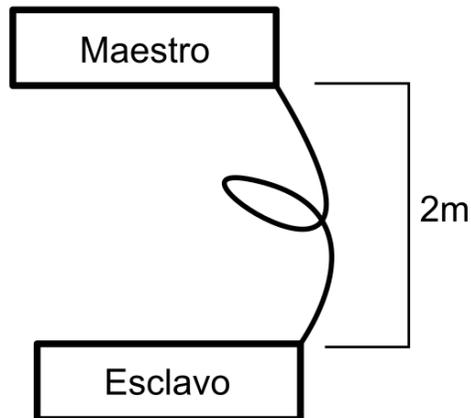


Figura 33 El maestro y esclavo se conectaron con un cable CAT5 de 2m de longitud que es el largo aproximado del robot completo con los 10 módulos, demostrando que la capacidad del cable no afecta a la comunicación.

En la Figura 34 se puede observar una captura realizada de una trama de datos del bus I2C. Según el protocolo implementado, la primera información que se envía es el address de 7bits con el 8vo bit siendo el bit de lectura o escritura (R/W). En este caso el master se comunica con el slave de dirección 31 (7bits de address: 0011111) y le está escribiendo (bit R/W: 0). El segundo paquete de datos que recibe es el registro al cual le quiere escribir, en este caso es el registro 15 (00001111) que según vimos en la Tabla 1 es el valor para el duty cycle del PWM. El tercero y último paquete de esta secuencia es el dato que le escribe al registro, en este caso es el dato 45(00101101) que una vez ingresado a la función del esclavo, devolverá el valor de duty cycle de 1.5ms o 7.5% que corresponde a un ángulo de rotación de 0°.

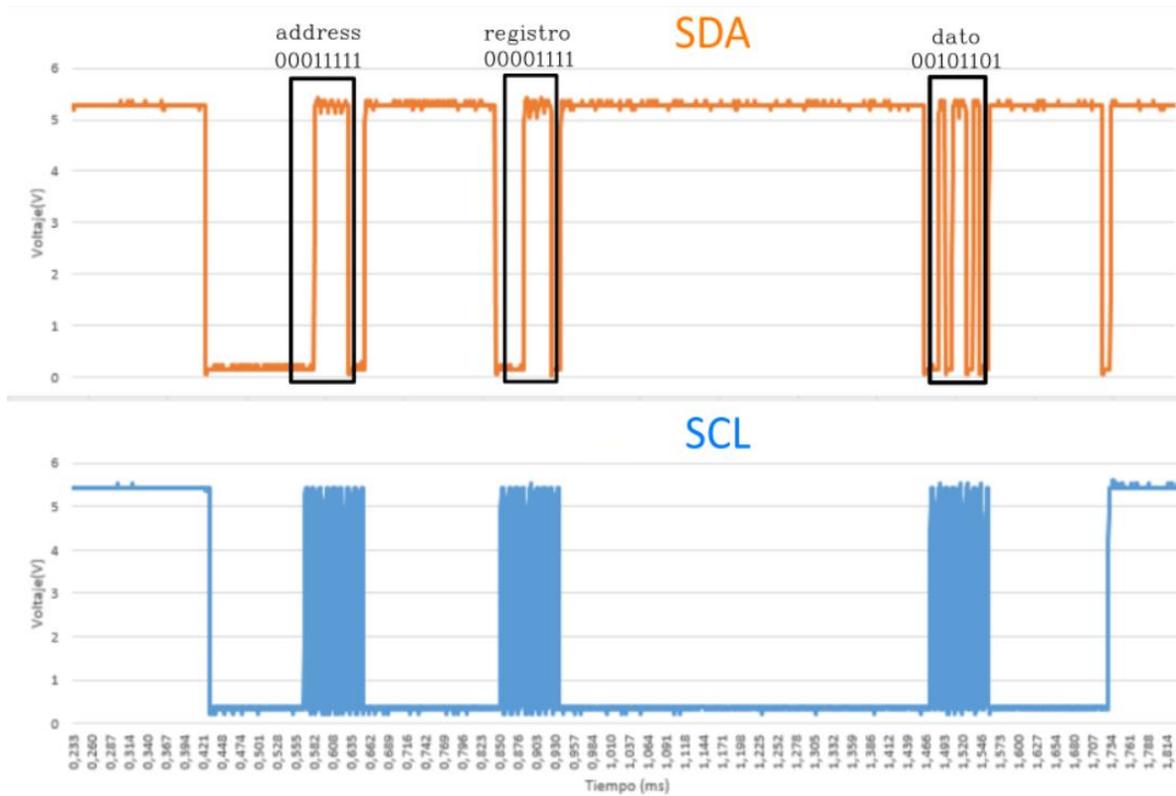


Figura 34 Líneas SDA y SCL del protocolo de comunicación I2C representando una secuencia de escritura en el esclavo para mover los servomotores. En el eje vertical se muestra el voltaje de las líneas que alcanza aproximadamente 5V y en el eje horizontal el tiempo en milisegundos. Marcados en cuadros negros están los paquetes de bits que se envían por la línea de datos SDA. Debajo de los cuadros negros se puede ver cómo se activa el clock durante el envío de datos.

Conclusiones

Entender la relación entre el sistema nervioso y el comportamiento de los individuos es uno de los objetivos/preguntas principales de la neurociencia. Este es el marco en el que el Dr. Pablo M. Gleiser lleva adelante su línea de trabajo como Investigador del Conicet. De aquí surgió el objetivo de este proyecto final integrador que consiste en el diseño e implementación de un robot biomimético cuya forma corporal se asemeje a la de un nematodo.

Para poder establecer la conexión entre los circuitos neuronales y el movimiento es necesario realizar un trabajo dentro de un marco interdisciplinario donde se integre la información del conectoma y del comportamiento del gusano con sus movimientos y ondulaciones. En este contexto utilizamos información biológica de cómo está distribuida la red neuronal y las simetrías de la estructura muscular de *C. elegans* para poder construir un nuevo robot biomimético. En particular se diseñó un sistema mecánico, y desarrolló un sistema electrónico para la alimentación y el control de los sensores y los actuadores. Se eligió un formato abierto para el hardware y software donde la mecánica puede replicarse fácilmente utilizando impresión 3D.

Este nuevo prototipo permitirá extender los resultados originales de T. Busbice, que modeló a *C. elegans* como un vehículo con dos ruedas, extendiendo el análisis hacia una aproximación más biológica, donde se tiene en cuenta la forma del cuerpo del gusano. De esta forma se pueden incorporar nuevas variables al modelo y podrán surgir nuevos resultados e hipótesis sobre los comportamientos del gusano y su interacción con el ambiente.

Uno de los requerimientos para el desarrollo del prototipo es que el sistema sea escalable para considerar robots de distintos tamaños y longitudes así pudiendo estudiar si el comportamiento se ve afectado por estos factores. El segundo requerimiento es que el diseño permita realizar pruebas al robot con movimientos preestablecidos. El diseño debe dejar lugar a que en el futuro se puedan incorporar más actuadores que amplíen los grados de libertad de movimiento y la incorporación de más sensores para interactuar con el ambiente y/o con otros robots. Así mismo, permitiendo que eventualmente se puedan analizar los movimientos emergentes que surgen a partir de la simulación de la dinámica neuronal.

Se cumplieron los objetivos construyendo un robot con simetría bilateral permitiendo generar ondulaciones que simulan la contracción y expansión muscular. Además, el prototipo mecánico que se realizó posee un diseño modular que facilita su escalabilidad. En el diseño electrónico se contemplaron todas las características del protocolo utilizado y se diseñó con márgenes amplios permitiendo nuevamente su escalabilidad y evolución del prototipo. Dentro del diseño del sistema se incorporaron los sensores que se utilizaron para probar el protocolo de comunicación y el movimiento de los módulos, así como también futuros sensores.

Para cumplir con estos objetivos fue necesario llevar a cabo los requerimientos planteados del proyecto:

1. El sistema debe ser capaz de controlar y monitorear cada uno de los módulos de acción como un sistema distribuido y escalable. Debe aceptar la capacidad de agregar o quitar módulos.
2. El módulo de comunicación debe gestionar las comunicaciones a través de un bus de datos común hacia los N módulos de acción.

3. El módulo de acción debe ser capaz de recibir las señales de referencia y controlar 2 actuadores que generan los grados de libertad de movimiento de las vértebras, y actúan de manera independiente.
4. El sistema debe ser capaz de enviar comandos a los actuadores y sensores de los módulos.
5. El sistema debe permitir carga de secuencias de movimientos preestablecidos para los módulos de acción.
6. El sistema debe ser capaz de registrar los datos sensados, referidos a una base de tiempo configurable.
7. El módulo de acción debe recolectar la información de sus sensores y transmitirlas al módulo de comunicación.
8. El módulo de acción debe proveer un enlace de comunicación serie para agregar distintos sensores en un futuro.
9. El desarrollo y documentación del PFI (Proyecto Final Integrador) debe encuadrarse dentro una licencia de código abierto del estilo de la "Open Source Hardware Association"
10. El módulo de acción debe ser capaz de detectar intensidad lumínica.
11. El módulo de acción debe ser capaz detectar temperatura.
12. El módulo de acción debe ser capaz de detectar interacciones con objetos en cuatro puntos de su superficie.

La escalabilidad del sistema está dada como mencionamos anteriormente por la independencia que poseen los módulos de acción. Si bien el protocolo I2C permite que se direccionen 127 esclavos, el módulo de comunicación está programado para poder aceptar hasta 10 esclavos, límite que se puede cambiar dentro del código. El inconveniente con añadir muchos esclavos es dual, en principio el cable que conecta los módulos sería más largo con lo que poseería una capacitancia muy elevada. En segundo lugar, hay que sumar la capacitancia de cada componente que se añade a las líneas SCLx y SDAx (para un microcontrolador estándar es de 10pF). Estos problemas se pueden resolver utilizando algún buffer intermedio conectado a las líneas del protocolo I2C, pero actualmente no vemos la necesidad de tener tantos esclavos conectados. (Requerimientos 1, 2 y 8)

El protocolo I2C permite un monitoreo y control por parte del módulo de comunicación a los módulos de acción. De esta manera logra enviar comandos hacia los actuadores de cada módulo de acción, así como recibir las variables de cada sensor en el tiempo determinado. Todo movimiento preestablecido que se desea realizar se debe programar en el maestro, estos movimientos preestablecidos pueden servir para probar los motores y ver si las conexiones entre todo el sistema son las correctas. (Requerimientos 4,5,6,7)

Se logró modelar el comportamiento bilateral del C. elegans y su movimiento ondulatorio mediante el control de los actuadores de forma independiente para cada vértebra. El diseño permite que aun modificando el tamaño de las piezas se pueda seguir controlando. En este prototipo se optó por usar los servomotores sg90 porque son más económicos y accesibles, pero se pueden utilizar servomotores con mayor torque si se desea. (Requerimiento 3)

Al momento de probar la capacidad del módulo de acción de recibir los datos de los sensores y enviarlos al módulo de comunicación se utilizaron los sensores lumínicos. En el diseño de la placa además de estos sensores se contempló el uso de sensores piezoeléctricos o switches y sensores de

temperatura por lo que ya se diseñaron las conexiones para cada tipo de sensor. (Requerimientos 10, 11 y 12)

Todas las piezas diseñadas, así como la programación de cada módulo se puede encontrar en el repositorio de Github que se encuentra anexo [Anexo I] para que se mantenga dentro de un formato de código abierto. Permitiendo que toda persona que quiera utilizar el prototipo como herramienta de estudio o quiera realizar modificaciones en el diseño sea libre de hacerlo, fomentando el uso de modelos biomiméticos en la ciencia. (Requerimiento 9)

Como se mencionó ya en otras secciones, la versatilidad que presenta este nuevo diseño del robot permite que las neuronas encargadas de la contracción muscular sean mejor distribuidas a lo largo del robot y permite un rango dinámico en sus oscilaciones. En el diseño de Busbice se tomaba un promedio de todas las señales neuronales encargadas de la parte motora y se les asignaba a solo dos motores. Con este nuevo diseño que es más largo, permite no solo la distribución de las neuronas, sino que además físicamente están más distanciados los sensores. Esto permite que se pueda observar una variación a lo largo del cuerpo del robot en los valores de los sensores, ya sea de luz o temperatura.

El prototipo actualmente posee tres módulos de acción que cumplen con todos los requerimientos mencionados. Se puede observar el prototipo actual en la Figura 35.



Figura 35 Prototipo actual con tres módulos de acción.

Como se puede observar, se logró diseñar y fabricar un prototipo funcional de un robot biomimético para el estudio de la actividad locomotora del nematodo *C. elegans*, el mismo fue probado y se obtuvieron resultados satisfactorios. Este robot se incorporará a las investigaciones del Dr. Pablo M. Gleiser, Investigador Independiente del CONICET en el Departamento de Física Médica del Centro Atómico Bariloche, y el becario doctoral del CONICET y Magister en Física Carlos Valencia Urbina.

Bibliografía:

- Altun, Z. W. (2002-2020). Obtenido de WormAtlas: <http://www.wormatlas.org>
- Busbice, T. (May 22, 2014). *Extending the C. Elegans Connectome to Robotics*.
- Consi, T. R., & Webb, B. (2001). *Biorobotics Methods & Applications*.
- Corsi, A. K., Wightman, C., & Chalfie, M. (2015). A Transparent Window into Biology: A Primer on *Caenorhabditis elegans*. *Genetics*, Vol.200, 387-407.
- Eisenmann, D. M. (25 de June de 2005). Obtenido de WormBook: <http://www.wormbook.org>
- Gray, J. M., Hill, J. J., & Bargmann, C. I. (1 de March de 2005). A circuit for navigation in *Caenorhabditis elegans*. *PNAS*.
- Heuvel, M. P., & Edward T. Bullmore, O. S. (2016). Comparative Connectomics. *Trends in Cognitive Science Vol.20 No 5*, 345-361.
- Link, C. D. (2006). *C. elegans* models of age-associated neurodegenerative diseases: Lessons from transgenic worm models of Alzheimer's disease. *Experimental Gerontology* 41, 1007-1013.
- Microchip. (2019). Section 24. Inter-Integrated Circuit. En *Pic32 Family Reference Manual* (págs. page 24-1).
- Microchip Technology. (s.f.). *Product Documents-Datasheets*. Obtenido de Microchip Technology: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/40001639b.pdf>
- NXP Semiconductors. (April 2014). *UM10204 I2C-bus specification and user manual*.
- OpenWorm. (July de 2015). Obtenido de OpenWorm: <http://openworm.org>
- Paul Sternberg, M. B. (2000). *Directory*. Obtenido de Wormbase: <https://wormbase.org>
- Sporns, O. (2010). *Networks of the Brain*. MIT press.
- Texas Instrument. (Feb,2015). *I2C Bus Pullup Resistor Calculation*.
- Tytell, E., P.Holmes, & Cohen, A. (2011). Spikes alone do not behavior make: Why neroscience need biomechanics. *Current Opinion in Neurobiology*, 816-822.
- Yang, G.-Z. (2018). The grand challenges of Science Robotics. *Science Robotics*.

Anexo I

https://github.com/JulioCamposHaedo/C_elegans_Robot

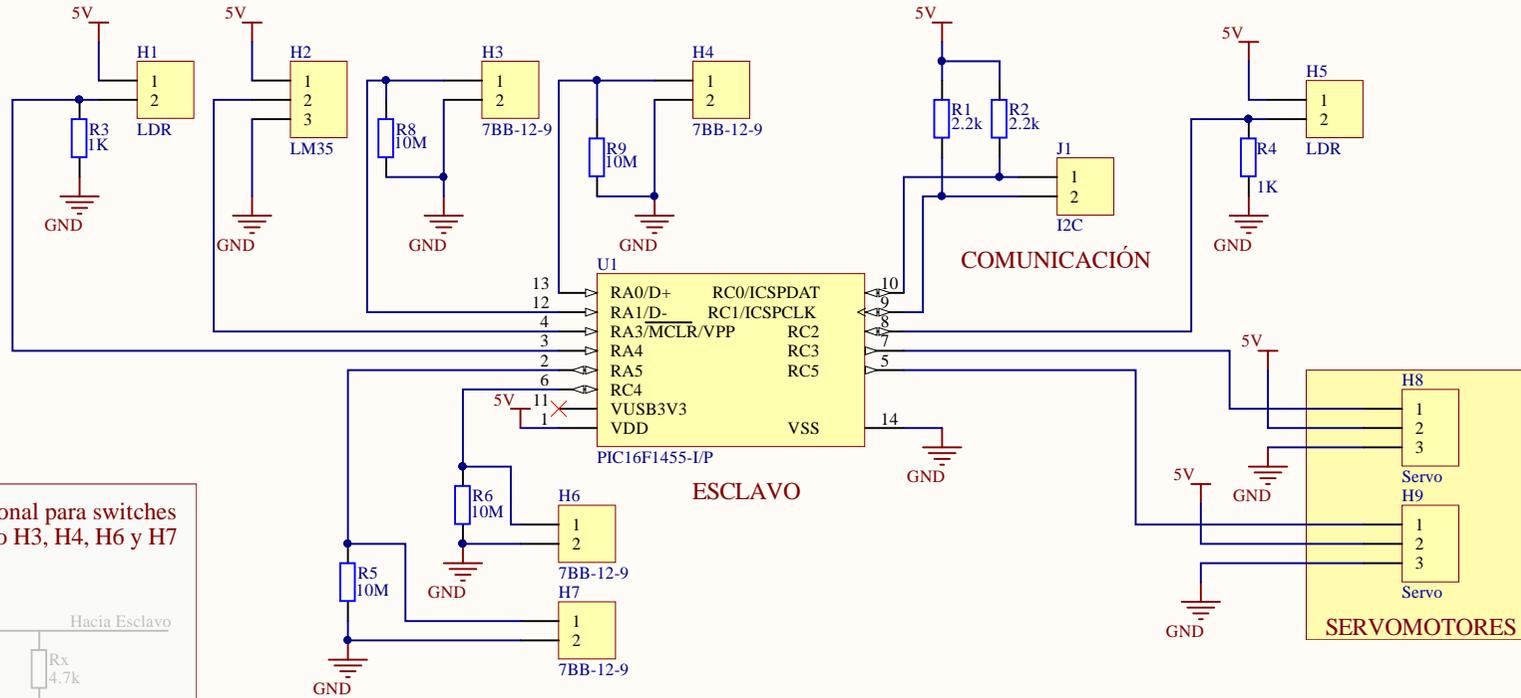
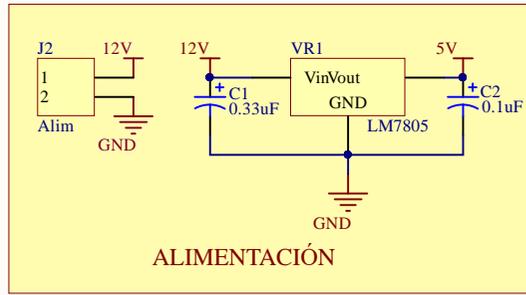
ANEXO II

1

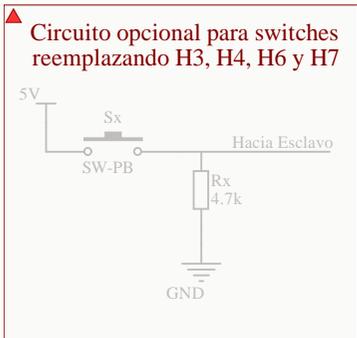
2

3

4



COMUNICACIÓN



Título: Título			
Versión: #1	Revisión: #1	Fecha: 23/11/2020	
Tamaño: A4	Hoja: 1	de 1	
Proyecto: Tesis_C_elegans.PrjPcb			
Carrera: Ingeniería Electrónica			Autores: Campos Haedo, Julio

1

2

3

4

ANEXO III

