 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

**CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE UN MECANISMO DE DOS GRADOS  
DE LIBERTAD CON ACTUADORES DE RIGIDEZ VARIABLE PARA IMITAR  
MOVIMIENTOS EXPLOSIVOS HUMANOS**

Kevin Velásquez Serpa

Ingeniería Mecatrónica

Director: Juan Sebastián Botero Valencia

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**Agosto de 2016**

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

Imitar los movimientos humanos en sistemas robóticos es cada vez más común, aunque inicialmente se utilizaban actuadores rígidos, en la actualidad se han implementado numerosos dispositivos que buscan tener flexibilidad inherente con el fin de acercarse más al comportamiento de los músculos humanos. Esto ha permitido que los robots actuales cumplan tareas como caminar, saltar o correr con un mejor índice de desempeño y con eficiencia energética, pero al usar sistemas de este tipo se obtienen modelos matemáticos y de control más complejos.

La implementación de un actuador que contenga las características ya mencionadas empieza con el diseño de las piezas en el software Nx Unigraphics©, donde se modelan piezas desde los eslabones, que son los elementos de mayor tamaño, hasta acoples para los mismos eslabones y otras piezas necesarias para realizar el ensamble del actuador de impedancia variable (VSA), dichas piezas se imprimieron en la impresora 3D Makerbot Replicator 2X utilizando ABS. Posteriormente se ensamblan las piezas y se logra dar forma al VSA, con resortes, servomotores digitales y también sensores para medir variables que luego nos va a ser útiles para la caracterización e identificación del sistema. Se crean bases de datos con la información adquirida por los sensores y provista también por el sistema embebido que controla los servomotores, información introducida en un perceptrón multicapa que es entrenado para identificar el sistema tomando como referencia la longitud del resorte.

Se logra caracterizar la carga, la posición y la velocidad del VSA con la estrategia de control propuesta para manipular y adquirir datos de los servomotores, esto permitió que se realice la posterior identificación del sistema tomando como parámetro la longitud del resorte, ya que es una variable que incluye datos de la posición del servomotor principal, la posición de la polea y la posición de la articulación.

*Palabras clave:* VSA, Actuador de rigidez variable, Identificación de sistemas, Redes neuronales, CAD, Impresión 3D.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

---

Inicialmente quiero agradecer a mis padres, Sol Serpa y Rodrigo Velásquez, quienes siempre han estado durante mi proceso de formación, no solo de mi logro profesional si no de mi vida, brindando su apoyo en cada momento necesario para seguir con el objetivo de cumplir mis metas.

Quiero agradecer a los familiares que aportaron su granito de arena en pro de mi carrera. Agradecer a mi pareja quien estuvo en momentos difíciles durante todo mi periodo de formación dando también su apoyo incondicional. De igual manera agradezco a aquellos amigos y conocidos que creyeron en que esto se podía lograr, y que también ayudaron en mi proceso de formación como persona y profesional. No se puede dejar de lado a todos los compañeros de clase, profesores y personas dentro del ámbito académico que colaboraron en la construcción de este proyecto de vida, a ellos gracias.

Un agradecimiento a los integrantes del laboratorio de Sistemas de Control y Robótica de la institución, especialmente a mi tutor Juan Sebastián Botero Valencia y a Julio Restrepo, quienes aportaron su conocimiento para el desarrollo de este trabajo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# ACRÓNIMOS

---

*VSA*: Variable Stiffness Actuator.

*MACCEPA*: Mechanically Adjustable Compliance and Controllable Equilibrium Position Actuator.

*CAD*: Computer Aided Design.

*MDF*: Modelado por Deposición Fundida.

*ABS*: Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

*PLA*: Ácido Poliláctico.

*RNA*: Red Neuronal Artificial.

*MLP*: Multi-Layer Perceptron.

*CW*: Clock Wise.

*CCW*: *Counter Clock Wise*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Generalidades .....	7
1.2. Objetivos .....	8
1.2.1. General .....	8
1.2.2. Específicos.....	8
1.3. Organización.....	8
2. MARCO TEÓRICO .....	9
2.1. Actuadores de rigidez variable (VSA) .....	9
2.2. Sistemas embebidos .....	10
2.2.1. OpenCM.....	10
2.3. Servomotor .....	11
2.4. Diseño Asistido por Computador .....	12
2.5. Impresión 3D .....	13
2.6. Redes neuronales artificiales .....	14
2.6.1. Perceptrón multicapa .....	16
2.7. Identificación de sistemas.....	16
3. METODOLOGÍA .....	18
3.1. Diseños y modelos CAD de las piezas .....	18
3.1.1. Modelo CAD de los eslabones.....	18
3.1.2. Modelo CAD de los elementos de transmisión .....	20
3.1.2.1. Engranajes .....	20
3.1.2.2. Poleas y tensores .....	23
3.1.3. Modelo CAD de los elementos extras.....	24
3.1.4. Ensamble.....	27
3.2. Impresión 3D y ensamble del prototipo .....	29
3.3. Funcionamiento del VSA.....	31
3.4. Manipulación de servomotores y adquisición de datos.....	32

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.5. Identificación del sistema .....	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	34
4.1. Caracterización .....	34
4.2. Identificación .....	36
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	38
5.1. Conclusiones .....	38
5.2. Recomendaciones .....	39
5.3. Trabajos futuros .....	39
REFERENCIAS .....	40
APÉNDICE.....	42
Código para manipulación y adquisición de datos desde OpenCM .....	42
Código para adquisición y almacenamiento de datos en Matlab .....	46
Código de la red neuronal para identificación .....	48

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Generalidades

Una de las características de los humanos es el poder desarrollar diferentes movimientos tanto sencillos como complejos, como también adaptarse a diferentes y cambiantes entornos, estas capacidades o habilidades son controladas por los músculos que hacen el papel de actuadores en tareas como caminar, correr o saltar, donde al cambiar la rigidez de los músculos se puede cambiar, por ejemplo, la velocidad del caminar o la frecuencia del paso al correr. Los robots modernos buscan imitar estos movimientos y normalmente lo hacen con actuadores rígidos lo que no les permite tener esa flexibilidad inherente que tienen los músculos humanos (Weckx et al., 2014), por esta razón se empiezan a desarrollar los actuadores de rigidez variable (VSA por sus siglas en inglés), que no solo buscan darle flexibilidad inherente a los actuadores, si no también mejorar la seguridad en la interacción humano-robot, mejorar la eficiencia energética explotando las capacidades de almacenamiento de energía de dichos dispositivos y desarrollar aplicaciones que involucren gran dinámica como los movimientos explosivos que se caracterizan por liberan gran cantidad de energía en cortos instantes de tiempo, incluyendo acciones como lanzar o saltar (Braun, Howard, & Vijayakumar, 2011).

Modelar o identificar este tipo de actuadores, que se convierten en un sistema, no es una tarea sencilla si se utilizan métodos tradicionales, por lo cual se busca implementar estrategias o metodologías que permitan identificar estos sistemas de una forma menos compleja. Pero para identificar un sistema de ese tipo es necesario contar con un prototipo mecánico, el cual se busca diseñar de manera que cumpla con requisitos básicos para un correcto funcionamiento, es decir, que nos pueda entregar suficiente información para lograr el objetivo de la identificación.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

Desarrollar un mecanismo de dos grados de libertad que contenga actuadores de rigidez variable en cada articulación que imiten movimientos explosivos humanos, para luego ser caracterizado e identificado

### **1.2.2. Específicos**

- Diseñar y modelar en software CAD un mecanismo de dos grados de libertad que contenga actuadores de rigidez variable en cada articulación
- Construir el diseño realizado utilizando herramientas de impresión 3D, servomotores digitales y resortes
- Implementar una estrategia de control en un sistema embebido que permita manipular y adquirir las señales de los servomotores
- Caracterizar los movimientos con parámetros como torque, posición y velocidad y proponer un modelo usando identificación

## **1.3. Organización**

En el capítulo dos se encuentran todos los conceptos y teorías bases necesarias para elaborar y entender el cuerpo del trabajo. En el capítulo tres se desarrolla la metodología propuesta, la cual contiene el diseño de las piezas que componen el prototipo, así como la impresión 3D de dichas piezas, seguido del método utilizado para la identificación del sistema planteado.

En el capítulo 4 se describen los resultados obtenidos a partir de la caracterización del VSA para su posterior identificación, la cual también es discutida en esta sección. En el capítulo 5 se realizan las conclusiones resultantes del desarrollo del trabajo, también se detalla el proyecto futuro para este prototipo siguiendo la metodología ya implementada. En el capítulo 6 se tienen las referencias bibliográficas de los textos utilizados dentro del trabajo. Por último, los apéndices contienen información que no se incluyó en la metodología, pero que es necesaria para la ejecución del trabajo.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

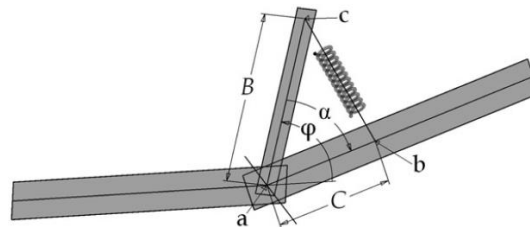
## 2. MARCO TEÓRICO

---

A continuación, se presentan los conceptos y teorías necesarios para comprender el desarrollo del trabajo, además de los componentes principales de los actuadores de rigidez variable, softwares, dispositivos y demás recursos utilizados para llevar a cabo el trabajo.

### 2.1. Actuadores de rigidez variable (VSA)

Un VSA es un actuador que contiene elementos elásticos físicos, en este caso resortes, capaces de almacenar y liberar energía, otorgando así flexibilidad inherente a los actuadores. A diferencia de los actuadores rígidos que se han utilizado por mucho tiempo en todo tipo de robots, los VSA contienen flexibilidad inherente permitiendo el cambio de rigidez por medio de un segundo motor, y por lo tanto cambia también el torque en la salida del actuador o de la articulación (Everarts et al., 2012). Para la implementación de un VSA es necesario contar con dos motores, uno para controlar la rigidez y otro para controlar la posición de equilibrio. La posición de equilibrio es donde no se generan fuerzas o torque por el actuador, y es una condición que no se utiliza en los actuadores rígidos sino en los VSA (Vanderborght et al., 2013). Esta flexibilidad que poseen los VSA permite también que tareas como caminar o correr se hagan con mejor desempeño, también variaciones de dichos movimientos como cambiar la velocidad del caminar o la frecuencia del paso al correr.



**Figura 1.** Principio de funcionamiento de un VSA

**Fuente:** (Van Ham et al., 2007)

El principio de funcionamiento se puede explicar con el esquema expuesto en la figura 1, el cual consiste en tres eslabones pivoteando alrededor de un mismo eje, el eslabón del medio es móvil y está atado por medio de un resorte al cuerpo de la derecha, la variación del ángulo  $\varphi$  está dada por un servomotor, mientras que la variación del ángulo  $\alpha$  indica la

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

rigidez que va a tener el cuerpo de la derecha, es decir, mientras que  $\alpha \neq 0$  la elongación del resorte genera una fuerza y esta a su vez un torque que tiende a alinear el cuerpo de la derecha con el eslabón móvil. Cuando  $\alpha = 0$  es cuando el actuador está en la posición de equilibrio, la cual es determinada por el valor de phi. La pre-tensión del resorte está dada por un segundo servomotor y una polea ubicados en el eslabón derecho (Van Ham et al., 2007). El sistema ilustrado es el MACCEPA, uno de los primeros VSA funcional implementado.

## 2.2. Sistemas embebidos

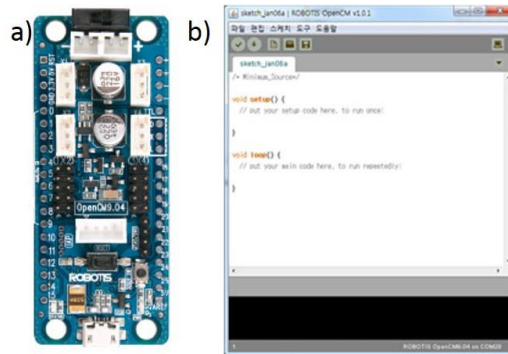
Los sistemas embebidos son circuitos electrónicos capaces de realizar operaciones computacionales y que son diseñados para cumplir tareas específicas dentro de un proceso. Por lo general y a diferencia de los sistemas integrados en computadoras portátiles o de escritorio, los sistemas embebidos tienen limitaciones en cuanto a procesamiento y número de tareas que pueden ejecutar, esto es debido a que desde el diseño se determinan las tareas que va a realizar. Los sistemas embebidos están compuestos por hardware y software y su núcleo central es un microprocesador dedicado. Estos sistemas se encuentran en muchos de los dispositivos electrónicos de uso cotidiano, desde el control de inyección de gasolina en automóviles, hasta en lavadoras y cámaras fotográficas.

Dentro de este trabajo se tiene un sistema embebido que controla los servomotores utilizados y que además nos permite ingresar otro tipo de señales digitales y analógicas. La programación se realiza por medio de una interfaz con lenguaje de alto nivel con un software dedicado. El sistema utilizado es el siguiente:

### 2.2.1. OpenCM

Este dispositivo electrónico está compuesto por un hardware que es la tarjeta embebida, la cual contiene los puertos para la conexión con los motores, con el computador y con la fuente de energía además de poseer pines para entradas analógicas y digitales como sensores y demás elementos deseados. Por otra parte, está el software que es un ambiente de desarrollo exclusivo de la compañía ROBOTIS®, diseñado para la programación de dicha tarjeta. En la figura 2 se ilustran tanto la tarjeta como el entorno de desarrollo.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 2.** Sistema embebido OpenCM, a) Tarjeta; b) Interfaz de programación

**Fuente:** <http://en.robotis.com/>

### 2.3. Servomotor

Los servomotores son generalmente motores DC acoplados a un sistema de engranajes y un sistema de control que permite, por medio de sensores, saber la posición en la que se encuentra el eje de salida, la cual es enviada por realimentación. Esta característica hace que este tipo de actuadores se utilicen en tareas donde es necesario conocer la posición. Como se mencionó, los servomotores están compuestos por un motor DC, un mecanismo de engranajes para la reducción de velocidad e incremento del esfuerzo de torsión o rotación y un dispositivo electrónico para evaluar la posición y controlar el circuito. El servomotor no gira libremente, es necesario comandar para que realice un movimiento de acuerdo con una posición (Ruiz-Velasco Sánchez, 2007).



**Figura 3.** Servomotor Dynamixel AX-12A.

**Fuente:** [http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/ax\\_series/dxl\\_ax\\_actuator.htm](http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/ax_series/dxl_ax_actuator.htm)

Los servomotores utilizados en el trabajo son los Dynamixel AX-12A (ver figura 3) de la compañía ROBOTIS©, son controlados por medio del sistema embebido OpenCM y tienen las siguientes especificaciones:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Tabla 1.** Especificaciones del servomotor Dynamixel AX-12A

PARÁMETRO	VALOR
<b>Peso</b>	54.6 g
<b>Dimensiones</b>	32 mm * 50 mm * 40 mm
<b>Resolución</b>	0.29°
<b>Relación de reducción</b>	254:1
<b>Par de arranque</b>	1.5N.m (12.0 V, 1.5 A)
<b>Rango de funcionamiento</b>	0° - 300°
<b>Voltaje</b>	9 – 12 V (Recomendado 11.1 V)
<b>Realimentación</b>	Posición, Temperatura, Carga, Voltaje, etc.
<b>Velocidad de comunicación</b>	7343 bps – 1 Mbps
<b>Material</b>	Plástico de ingeniería

**Fuente:** [http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/ax\\_series/dxl\\_ax\\_actuator.htm](http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/ax_series/dxl_ax_actuator.htm)

## 2.4. Diseño Asistido por Computador

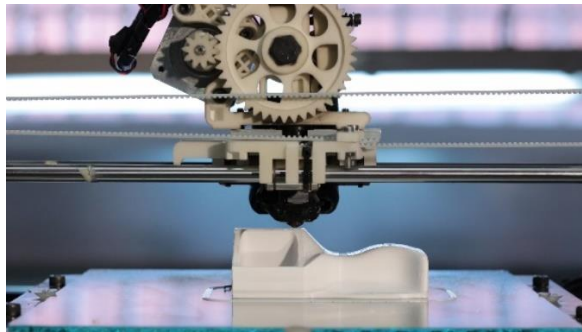
El diseño asistido por computador (CAD por sus siglas en inglés) es una herramienta computacional que ayuda a representar gráficamente objetos físicos, también permite mejorar, optimizar, modificar y analizar dichas representaciones que pueden ser en 2D o en 3D. Estos objetos pueden ser posteriormente exportados a formatos con los cuales se realicen acciones como generar los planos de las piezas diseñadas y el maquinado o la impresión 3D de las piezas. Algunos softwares CAD permiten ir más allá de solo diseñar, integrando complementos como el poder definir los tipos de materiales, propiedades mecánicas y térmicas, análisis de esfuerzos, análisis cinemáticos y dinámicos de ensamblajes, etc., (Zheng Li, 2015).

El software CAD permitió el diseño y modelado de la mayoría de las piezas necesarias para la realización del prototipo. El software que se utilizó para el diseño, ensamble, generación de planos y exportación de archivos para impresión 3D fue Nx Unigraphics de la compañía SIEMENS®, versión 10.0, con unidades métricas en todas las piezas.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.5. Impresión 3D

Mientras que en el mecanizado tradicional se utilizan métodos de remoción de material para lograr las formas deseadas en determinados objetos, con la impresión en tres dimensiones se pueden hacer objetos con técnicas aditivas como lo es el modelado por deposición fundida (MDF), que consisten en calentar el material, que es por lo general algún plástico, y añadir capas de dicho material, una encima de otra, para obtener la pieza deseada. Existen muchas técnicas de impresión en tres dimensiones, como por ejemplo la manufactura de objetos laminados (LOM), la fabricación directa de metal (DMF), el sinterizado selectivo por láser (SLS), la estereolitografía (SLA o STL), etc., (Gil, 2015), todas basadas en la misma técnica, pero una de las más utilizadas es la MDF.



**Figura 4.** Impresión en 3D por MDF

**Fuente:** <http://exarchitects.com/wp-content/uploads/2014/07/01-Impresion-3d-EXarchitects.jpg>

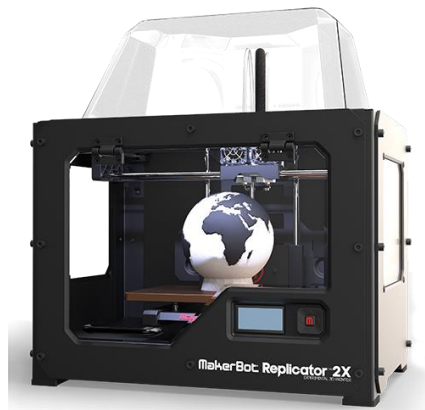
En cuanto a materiales, se utilizan plásticos, metales, cerámicas, hormigón, entre otros, sin embargo, los más utilizados son los plásticos sensibles a la temperatura, como lo son el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) y el PLA (Ácido poliláctico). El ABS es un termoplástico sensible al calor, es extruido a través de un cabezal y luego se solidifica en una plataforma calentada por resistencias, en el proceso de extrusión se alcanza un rango de temperatura entre 230°C y 260°C. Entre las ventajas se encuentra su flexibilidad, resistencia y buen acabado, mientras que una de las desventajas es que durante la impresión se pueden liberar gases que resultan tóxicos para los humanos si se dan en altas concentraciones. Por otro lado, el PLA es también un material plástico que a diferencia del ABS no expulsa gases nocivos para la salud, se encuentra en muchos más colores y no necesita de una superficie caliente luego de la extrusión, además se dice que es natural por proceder de plantas como el maíz (Gil, 2015).

Generalmente las piezas a imprimir son diseñadas en software CAD, desde donde se exportan a un formato que sea compatible con el software de impresión del fabricante de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

la impresora. Cada fabricante tiene su propio software, es decir, no existe un software genérico para imprimir, aunque si existen programas Open Source (código abierto) para la programación de impresoras caseras.

En el trabajo se utilizó la impresora Makerbot Replicator 2X (ver figura 5) de la compañía Makerbot® Industries, LLC© para imprimir las piezas diseñadas en CAD empleadas en el prototipo. Esta impresora utiliza ABS con impresión por MDF.

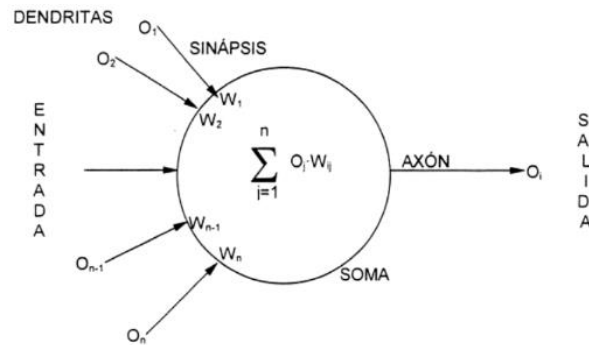


**Figura 5.** Impresora 3D Makerbot Replicator 2X

**Fuente:** <http://store.makerbot.com>

## **2.6. Redes neuronales artificiales**

En el intento de imitar el funcionamiento del cerebro humano, se crearon diferentes modelos matemáticos y computacionales que buscan precisamente emular el comportamiento de uno de los órganos más importantes del cuerpo humano, con una característica principal que es el aprendizaje a través de la experiencia (Flórez López et al., 2008). Como las redes neuronales artificiales (RNA) están basadas en neuronas biológicas, tienen, por lo tanto, partes que se asemejan como son las dendritas (entradas), el soma (núcleo) y el axón (salidas), la sinapsis es igual en ambos casos y son las conexiones entre las dendritas de una neurona y el núcleo de otra. En la figura 6 se observa un modelo de neurona artificial.

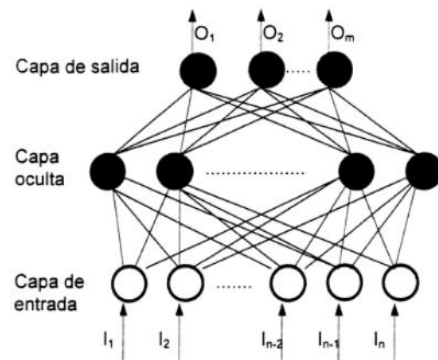


**Figura 6.** Modelo de neurona artificial.

**Fuente:** (Pino Diez et al., 2001)

Dentro del soma o núcleo se encuentra la función de activación que es la encargada de calcular el nivel de estímulo o excitación en la salida de la neurona, esto se da por la comparación entre la entrada total, la cual contiene los pesos y estímulos de las conexiones que llegan, y el estado inicial de la neurona, dicha función de transferencia es a menudo de tipo sigmoideal. Existen, también, muchos tipos de funciones de activación, por ejemplo: la función lineal, la función escalón, la función mixta, la función sigmoideal, la función gaussiana, entre otras.

Una red neuronal se define como “Un modelo conexionista cuyos elementos o nodos, conectados entre sí, simulan las funciones desempeñadas por las células cerebrales denominadas neuronas” (Lahoz-Beltrá, 2010). Una RNA está compuesta entonces, por varias unidades de procesamiento individual (neuronas) interconectadas entre sí con la capacidad de aprender, del mismo modo en que lo hace el cerebro humano. Las RNA se organizan de diferentes maneras dependiendo, generalmente, de criterios como las capas y el flujo de datos. Una red puede ser de una sola capa de neuronas (monocapa) o de varias capas donde las neuronas se organizan en capas de entrada, capas ocultas y capa de salida (multicapa). Por otro lado una red puede ser de propagación hacia adelante (feedforward) donde la información circula desde la entrada hacia la salida, o propagación hacia atrás (feedback) donde las salidas de las unidades de procesamiento se pueden conectar con neuronas de la misma capa o capas anteriores (Flórez López et al., 2008). En la figura 7 se muestra un ejemplo de una RNA multicapa con arquitectura feedforward.

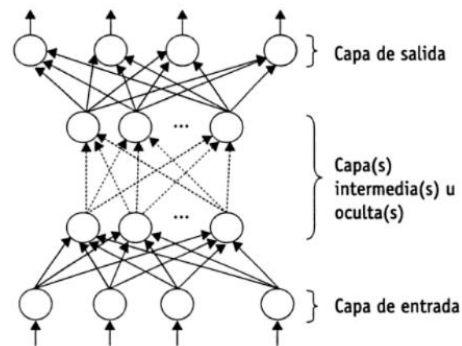


**Figura 7.** Arquitectura de una red neuronal multicapa.  
**Fuente:** (Pino Diez et al., 2001)

Una de las RNA más utilizadas es el perceptrón multicapa (MLP) el cual se define a continuación,

### 2.6.1. Perceptrón multicapa

Un MLP es un modelo de RNA con arquitectura feedforward y por lo menos tres capas, capa de entrada, capa de salida y capa(s) oculta(s) (ver figura 8). Este tipo de RNA es muy utilizado en la resolución de problemas tanto de regresión como de clasificación y dependiendo del número de capas ocultas puede resolver problemas de mayor complejidad.



**Figura 8.** Arquitectura del perceptrón multicapa  
**Fuente:** (Flórez López et al., 2008)

## 2.7. Identificación de sistemas

La identificación de sistemas busca el modelamiento matemático de plantas o procesos mediante pruebas o adquisición de datos experimentales. En un sistema o planta actúan diferentes tipos de variables las cuales son influyentes para determinar un modelo para



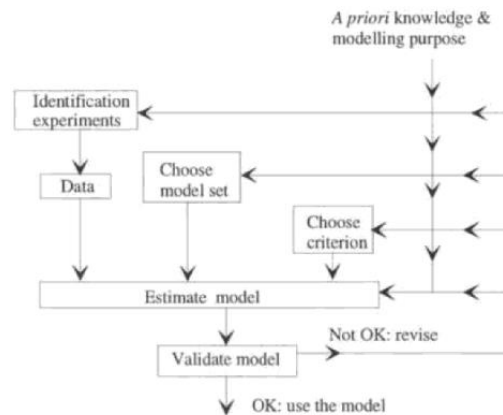
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cualquier planta. Las variables más relevantes para el observador son las variables de salida, también existen variables que son manipuladas por uno llamadas variables de entrada. Por otro lado, tenemos las perturbaciones que pueden ser manejadas por el usuario (como una entrada) y perturbaciones externas al sistema, todas las variables mencionadas nos ayudan a describir cómo actúa el sistema (Zhu, 2001).

Un modelo representa aquellos aspectos necesarios y esenciales de una planta, los cuales deben entregar información suficiente y utilizable de dicha planta. Hay diferentes tipos de modelos, los cuales se pueden aplicar según el tipo de planta que se tenga, aunque es común determinar varios modelos para un mismo sistema y luego se elige el que mejor represente a la planta. Existen, por ejemplo, modelos gráficos, modelos mentales, modelos matemáticos, entre otros, siendo el modelo matemático el más apropiado, y en general necesario, para describir relaciones entre las variables de la planta en los sistemas modernos de control.

No solo con los datos y el modelo se puede lograr la identificación de una planta, es necesario validar dicho modelo preferiblemente con datos que no se hayan utilizado previamente en la identificación del modelo, con el fin de corroborar que el modelo estimado si es lo suficientemente bueno y contiene información suficiente para ser utilizado y aplicado como modelo final del sistema.

Dentro del proceso para identificar un sistema es necesario primero, obtener datos mediante pruebas o experimentos, el segundo paso es determinar el modelo que represente mejor la planta, y por último se hace la validación y posterior aplicación del modelo. En la figura 9 se ilustra un diagrama con los pasos para identificar sistemas.



**Figura 9.** Procedimiento para identificación  
Fuente: (Zhu, 2001)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 3. METODOLOGÍA

---

En esta sección se muestran los métodos y procedimientos realizados para cumplir cada uno de los objetivos propuestos. Iniciando con el diseño y modelos CAD de las piezas, la impresión y posterior ensamble, y luego la caracterización e identificación del sistema.

### 3.1. Diseños y modelos CAD de las piezas

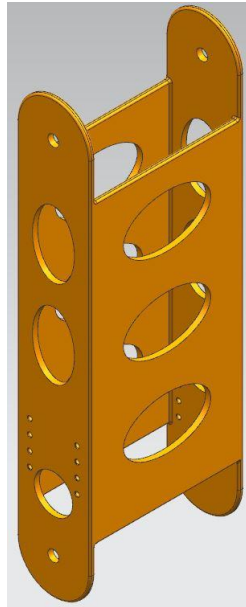
Para el diseño del VSA se tuvieron en cuenta varios aspectos, primero las dimensiones de los servomotores ya que son los objetos de mayor tamaño que van dentro de los eslabones, por lo cual se tuvo muy en cuenta a la hora del diseño final. Segundo, las longitudes totales de los eslabones debido a las restricciones dimensionales de la impresora 3D. Tercero, las distancias entre los ejes tanto de rotación de las articulaciones, como de los servomotores, ya que estos no coinciden en este tipo de actuadores.

Las piezas fueron diseñadas en el software NX Unigraphics © con unidades métricas. En el anexo 1 se encuentran los planos de todas las piezas.

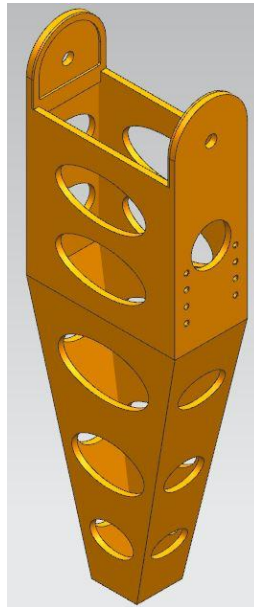
#### 3.1.1. Modelo CAD de los eslabones

El primer eslabón (eslabón 1) se diseñó teniendo en cuenta las dimensiones de los servomotores y las longitudes de los resortes. Las dimensiones del eslabón 1 son: 247,6 mm x 88 mm x 41 mm. En la figura 10 se ilustra el CAD de esta pieza.

En el segundo eslabón (eslabón 2) también se tuvieron las mismas consideraciones, pero esta pieza tiene un cambio de geometría desde el centro hacía abajo y se hizo con el fin de adaptar piezas adicionales en un trabajo futuro. Las dimensiones de la pieza son 250 mm de longitud total, 82 mm x 41 mm en la parte superior, mientras que en la parte inferior es de 25 mm x 25 mm. La figura 11 muestra el CAD del eslabón 2.



**Figura 10.** CAD del eslabón 1  
Fuente: Autor

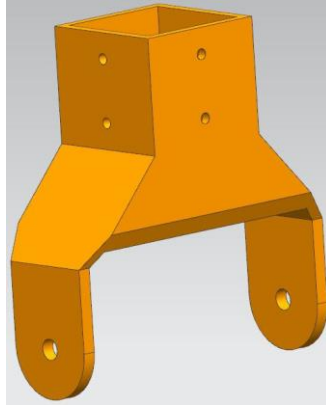


**Figura 11.** CAD del eslabón 2  
Fuente: Autor

El tercer eslabón (eslabón fijo) tiene la función de conectar los eslabones 1 y 2 con la parte fija del sistema. Esta pieza se acopla con un perfil de aluminio el cual sirve de soporte de todo el sistema y que además contiene uno de los servomotores (ver ensamble, sección

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.4.). Esta pieza cuenta con dimensiones 105 mm de longitud total, 96 mm en su parte más ancha y 41 mm de profundidad. En la figura 12 se observa el eslabón 3.



**Figura 12.** CAD del eslabón 3 o eslabón fijo  
Fuente: Autor

### 3.1.2. Modelo CAD de los elementos de transmisión

En este trabajo se diseñaron tres elementos de transmisión mecánica como piñones, poleas y tensores; los ejes, tornillos y rodamientos se eligieron con medidas estándar, solo teniendo en cuenta las dimensiones básicas de algunas piezas.

#### 3.1.2.1. Engranajes

En primera instancia se diseñaron las ruedas dentadas que van directamente acopladas a los servomotores y que transmiten un movimiento a un engrane que va en el eje de la articulación. La relación de transmisión es 1:1 por lo cual se tienen las mismas dimensiones para ambas ruedas. Este diseño en las ruedas dentadas aplica para las dos articulaciones. Cabe mencionar que la geometría de los piñones sufre algunas modificaciones para lograr el acople con los servomotores sin afectar la transmisión.

Para el diseño de los piñones se utilizó el GC Toolkits de Nx, con el cual se pueden crear diferentes tipos de piezas mecánicas. Esta herramienta necesita de datos como el módulo, el número de dientes, el ángulo de presión y el espesor para realizar el CAD de las ruedas. En nuestro caso estos datos fueron:

- Módulo: 1 mm
- Número de dientes: 50
- Ángulo de presión: 20°
- Espesor: 7 cm

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El módulo y el ángulo de presión son valores estándar en el diseño y manufactura de engranajes. Para calcular el diámetro primitivo de los engrane, se tiene que,

$$D = mZ \quad (1)$$

Donde D es el diámetro primitivo, m es el módulo y Z el número de dientes, se puede calcular el diámetro para así saber la distancia entre centros, que está dada por la siguiente fórmula,

$$A = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (2)$$

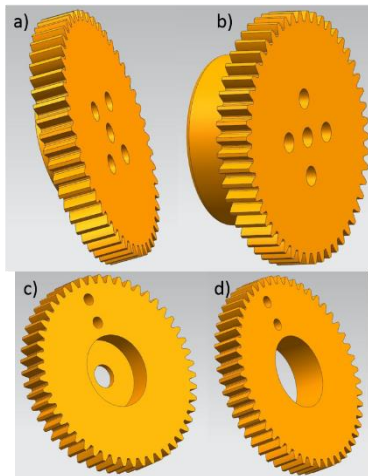
De la ecuación (1) tenemos que

$$D_1 = D_2 = 1 * 50 = 50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, de (2) se obtiene el valor de la distancia entre centros así,

$$A = \frac{50 \text{ mm} + 50 \text{ mm}}{2} = 50 \text{ mm}$$

En la figura 13 se muestran los engranes diseñados.



**Figura 13.** CAD de las ruedas dentadas. a) Piñón de acople a servomotor 4, b) Piñón de acople a servomotor 2, c) Engrane para eje de articulación 1, d) Engrane para eje de articulación 2.

**Fuente:** Autor

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

También se diseñaron ruedas dentadas extras para transmitir el movimiento de los engranes que están en el eje de la articulación a sensores implementados en el prototipo. Para estos elementos se cambió el número de dientes, lo cual consecuentemente cambia el diámetro primitivo y la relación de transmisión, para ambos sensores se buscaba una relación de 4:1, aunque se utilizó una rueda dentada intermedia para transmitir el movimiento requerido modificando un poco la relación de transmisión final, lo cual no influye en el funcionamiento del sistema ya que el acondicionamiento del sensor se hizo mediante software. Cabe mencionar que se tiene una distancia ortogonal entre el eje de la articulación y el eje del sensor estimada de 36 mm para ambos casos.

Teniendo en cuenta que,

$$\omega_1 Z_1 = \omega_2 Z_2; \quad \omega_2 Z_2 = \omega_3 Z_3 \quad (3)$$

De donde se puede deducir que,

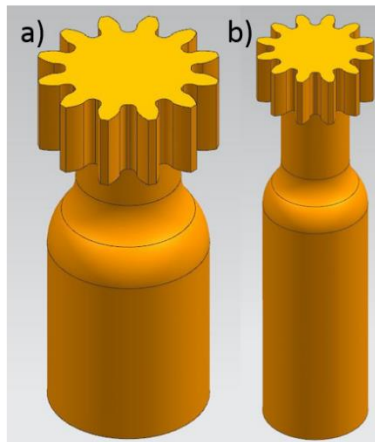
$$i = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_3} \quad (4)$$

Donde  $i$  es la relación de transmisión, y para nuestro caso  $i = 4$ , entonces despejamos  $Z_3$  así,

$$Z_3 = \frac{50}{4} = 12,5$$

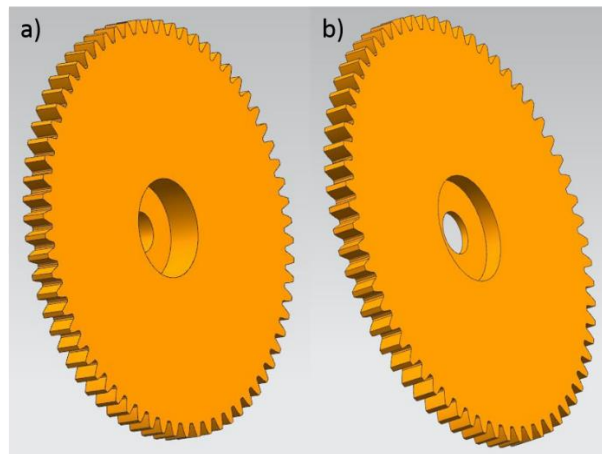
El valor obtenido de  $Z_3$  se redondea a 12 para no disminuir la relación y posteriormente se obtiene el diámetro con un valor de 12 mm. Sabiendo que la distancia es de 36 mm, la rueda intermedia debería tener un diámetro de 60 mm para cubrir la distancia restante, y conociendo que el módulo es de 1 mm, entonces  $Z_2 = 60$ .

En resumen, los engranes que van en los ejes de los sensores son de 12 dientes, mientras que las ruedas intermedias son de 60 dientes. En ambos casos tanto las ruedas intermedias como los engranes que van en los sensores se modifican geoméricamente para lograr el funcionamiento deseado. En la figura 14 se ilustran los engranes que van a los sensores, mientras que en la figura 15 se observan las ruedas intermedias.



**Figura 14.** CAD de los engranes para sensores con modificaciones geométricas. a) Engrane para sensor 1, b) Engrane para sensor 2

**Fuente:** Autor



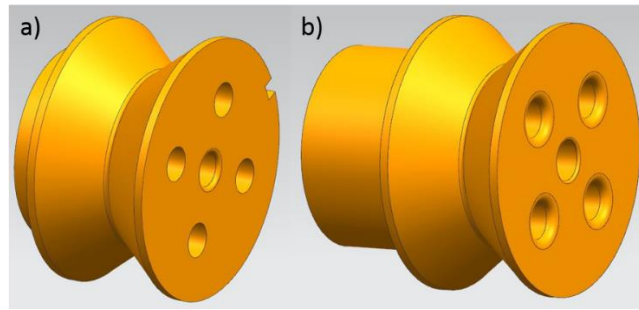
**Figura 15.** CAD de las ruedas intermedias con modificaciones geométricas. a) Rueda para sensor 1, b) Rueda para sensor 2

**Fuente:** Autor

### 3.1.2.2. Poleas y tensores

Para el diseño de las dos poleas utilizadas, se tuvo en cuenta principalmente el acople con el servomotor y se definió una geometría con un diámetro interior de 20,5 mm cuyo valor es necesario para cálculos posteriores. En la figura 16 se muestran las poleas diseñadas.

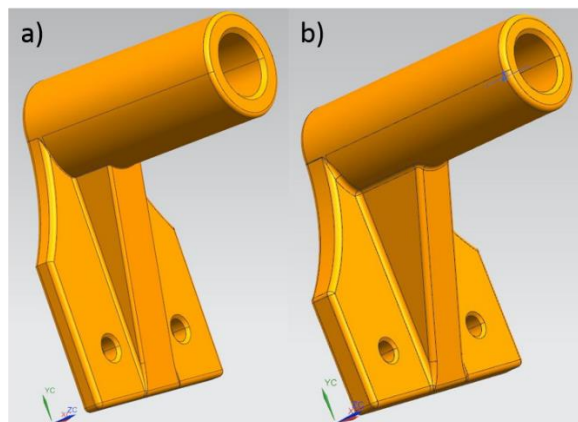
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 16.** CAD de poleas de transmisión. a) Polea para servomotor 1, b) Polea para servomotor 3

**Fuente:** Autor

Por otro lado, los tensores se diseñaron especialmente para este prototipo, con el fin de guiar y tensar las cuerdas que estiran los resortes mediante las poleas. El CAD de los tensores se puede observar en la figura 17.



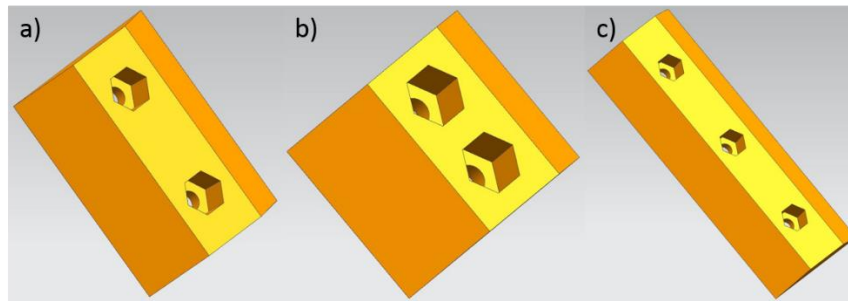
**Figura 17.** CAD de los tensores. a) Tensor para polea 1, b) Tensor para polea 2

**Fuente:** Autor

### 3.1.3. Modelo CAD de los elementos extras

Estos elementos extras son en su mayoría acoples, bases y soportes para las piezas del prototipo. Para acoplar el eslabón fijo al perfil de aluminio se diseñó una pieza con forma trapezoidal con espacio para tuercas que van a permitir el ensamble de estas dos piezas. Este tipo de elemento también sirvió para acoplar una base para la tarjeta del sistema embebido (ver figura 19) y para el ensamble del soporte del servomotor 1 (ver figura 20). En la figura 18 se muestran los acoples diseñados.

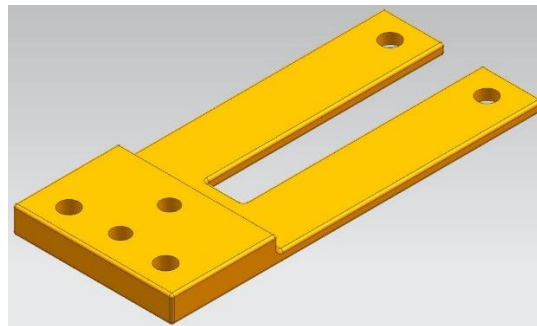




**Figura 18.** CAD de acoples. a) Acople para eslabón fijo 4, b) Acople para base de OpenCM, c) Acople para soporte de servomotor 1

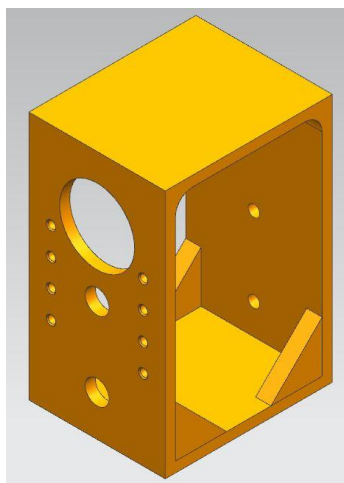
**Fuente:** Autor

La base para el sistema embebido se muestra en la figura 19, mientras que el soporte para el servomotor 1 que está acoplado en el perfil de aluminio se observa en la figura 20.



**Figura 19.** CAD de la base para el sistema embebido

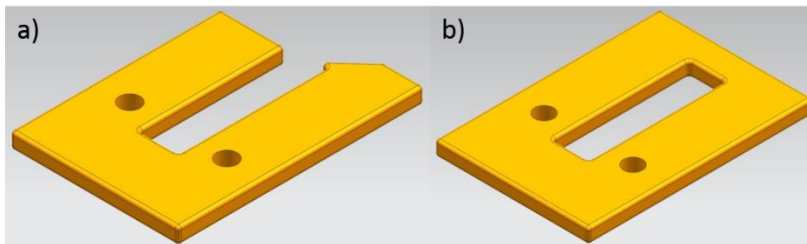
**Fuente:** Autor



**Figura 20.** CAD del soporte para el servomotor 1

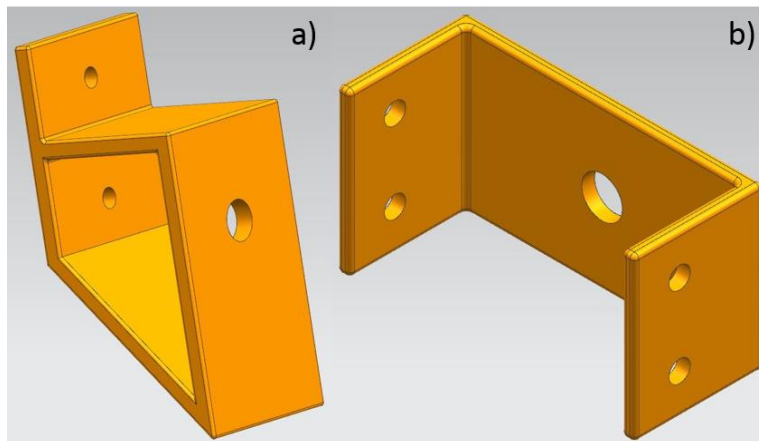
**Fuente:** Autor

Los sensores que ya se habían mencionado en la sección 3.1.2.1 van ensamblados a los eslabones por medio de unas bases necesarias debido a la geometría de los sensores. Estas bases se pueden observar en la figura 21. Por otro lado, para las ruedas dentadas intermedias se diseñaron soportes para los ejes de dichas ruedas, las cuales se muestran en la figura 22.



**Figura 21.** CAD de las bases para los sensores. a) Base para sensor 1, b) Base para sensor 2

**Fuente:** Autor

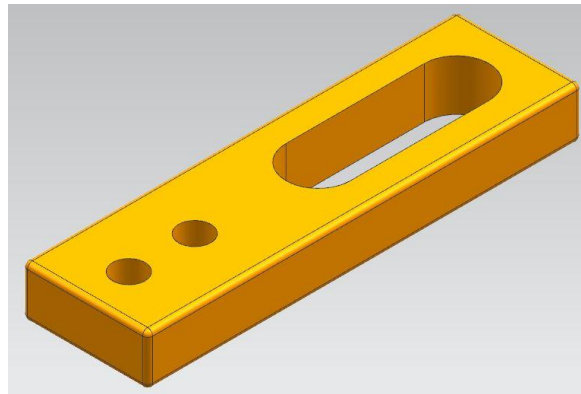


**Figura 22.** CAD de los soportes para los ejes de las ruedas dentadas intermedias. a) Soporte para rueda 1, b) Soporte para rueda 2

**Fuente:** Autor

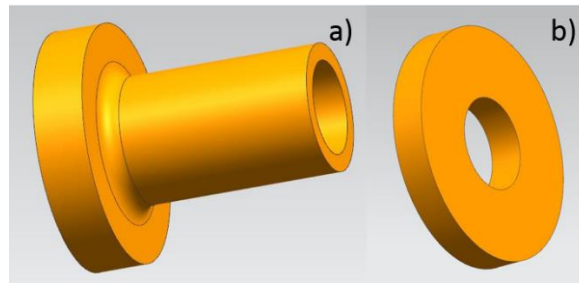
En el caso de los resortes hay dos elementos que se utilizan para el funcionamiento de este dentro del sistema. Se diseña un soporte que acopla el resorte con el engrane de la articulación, y también una especie de eje que hace girar libremente al resorte en el soporte anteriormente mencionado. En la figura 23 se ilustra el soporte, mientras que en la figura 24 se muestra el eje, el cual está compuesto por 2 partes.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 23.** CAD del soporte y acople para resorte.

**Fuente:** Autor

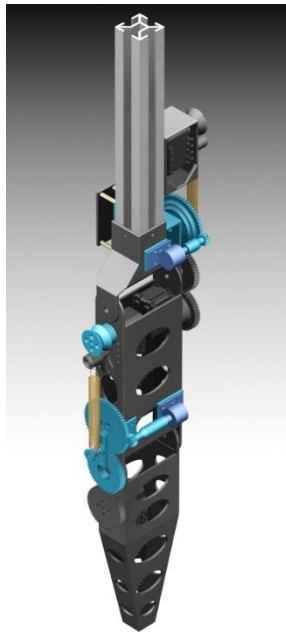


**Figura 24.** CAD del eje para resorte. a) Eje parte 1, b) Eje parte 2

**Fuente:** Autor

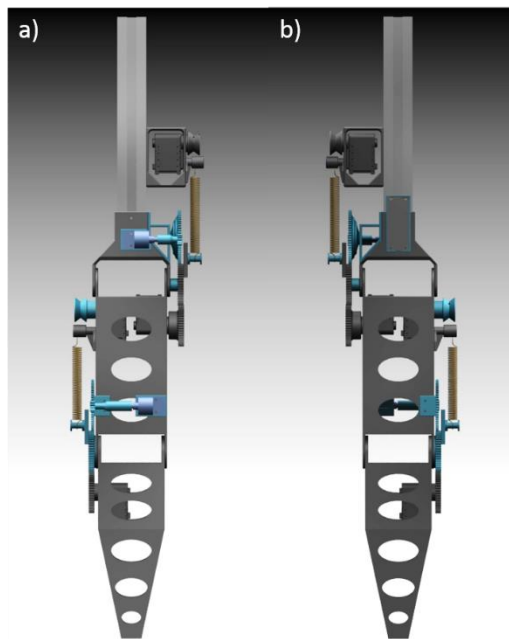
### 3.1.4. Ensamble

En el ensamble se encuentran todas las piezas mostradas anteriormente, además se incluyen piezas mecánicas comerciales, los sensores y la tarjeta OpenCM como ilustración. En la figura 25 se muestra el ensamble con una vista isométrica renderizada, en la figura 26 se encuentran dos vistas laterales para mostrar detalles del ensamble y en la figura 27 se realiza una vista explosionada.



**Figura 25.** Render del CAD del ensamble del prototipo con vista isométrica

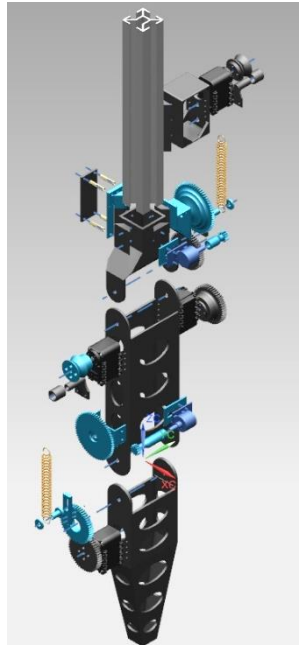
**Fuente:** Autor



**Figura 26.** Render del CAD del ensamble del prototipo. a) Vista lateral derecha, b) Vista lateral izquierda

**Fuente:** Autor

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 27.** Render del CAD del con vista explosionada.

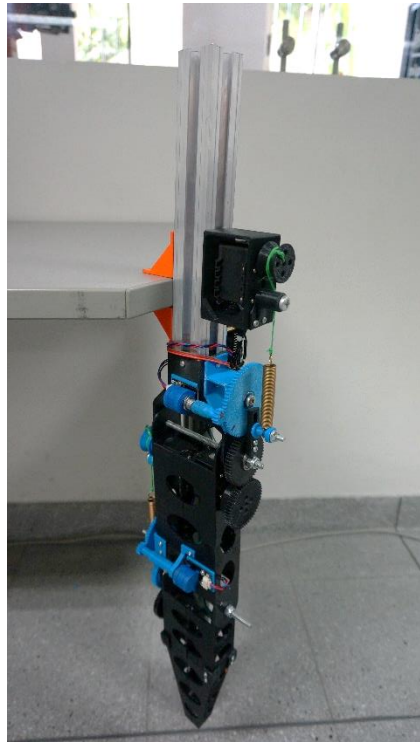
**Fuente:** Autor

### 3.2. Impresión 3D y ensamble del prototipo

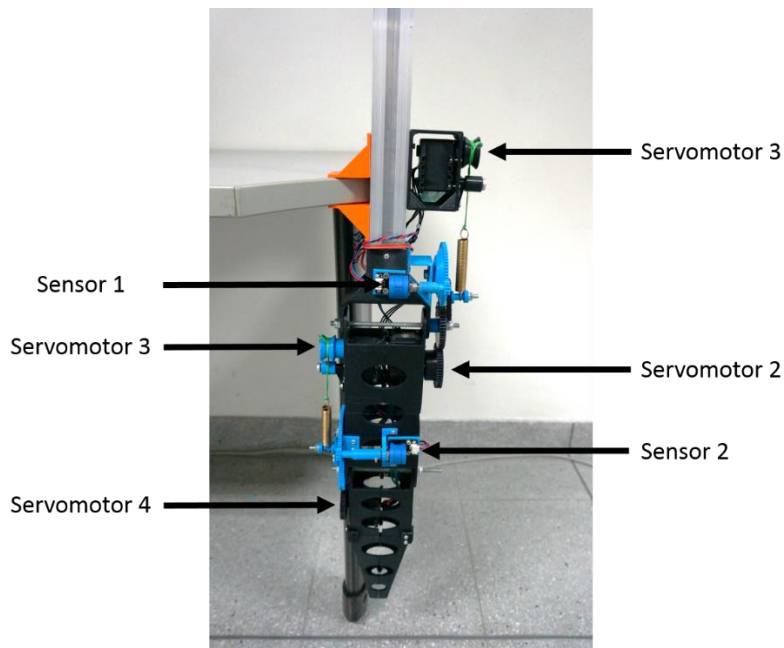
En la impresión de las piezas de mayor tamaño que son los eslabones 1 y 2, se tuvieron restricciones debido a la capacidad dimensional de la impresora utilizada, por lo cual estas dos piezas se dividieron cada una en 4 piezas para luego ser ensambladas y formar cada eslabón. El resto de piezas se imprimieron completas ya que no superaban las dimensiones de la impresora.

En el ensamble todos los tornillos utilizados son M3, con excepción de los utilizados en la sujeción y acoples de los servomotores que son M2. Para los ejes de las articulaciones y de las ruedas dentadas intermedias se utilizó un eje roscado de 1/4 de pulgada con tuerca de seguridad para evitar pérdida en la rigidez mecánica por el movimiento de las piezas. En los ejes de los resortes se utilizó un tornillo M5 también con tuerca de seguridad para evitar deslizamientos del eje a través del soporte debido a la fuerza del resorte. Los resortes van acoplados a los engranes de las articulaciones y también unidos a las poleas mediante cuerdas.

En las figuras 28 y 29 se muestra el prototipo ensamblado en diferentes vistas, mientras que en la figura 30 se puede detallar la tarjeta OpenCM y la fuente de poder.

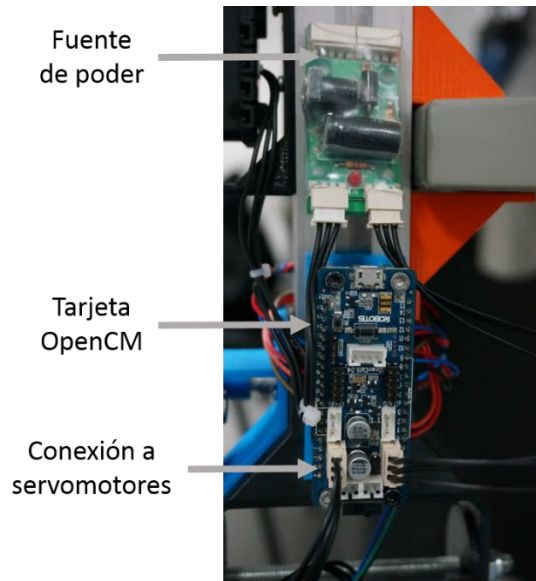


**Figura 28.** Prototipo del VSA ensamblado  
**Fuente:** Autor



**Figura 29.** Prototipo del VSA ensamblado en vista lateral derecha  
**Fuente:** Autor

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

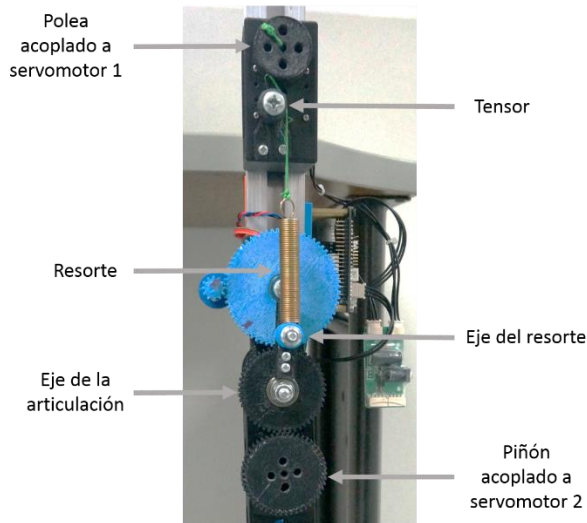


**Figura 30.** Tarjeta OpenCM y fuente de poder  
**Fuente:** Autor

### 3.3. Funcionamiento del VSA

A diferencia de los actuadores rígidos tradicionales, los VSA tiene la característica de poseer elementos mecánicos pasivos, en este caso resortes, que permiten variar la rigidez y por ende cambiar también los valores de torque a la salida de la articulación.

El resorte es el objeto que permite que la rigidez varíe, en este caso está puesto de forma radial al engrane de la articulación, para generar una fuerza con un vector en dirección de la polea al que está sujeto. La variación del ángulo de la polea cambia directamente la longitud del resorte, pero dicha longitud no varía solamente por la polea, sino también por el cambio angular en el engrane de la articulación. Este cambio de longitud del resorte cambia también la fuerza que ejerce en el sistema y consecuentemente la rigidez que tiene la articulación. De esta manera se pueden usar este tipo de actuadores en diferentes entornos cambiantes. En la figura 31 se muestran las partes que componen al VSA, cabe aclarar que no es solo un servomotor sino toda la estructura.



**Figura 31.** Componentes del VSA

**Fuente:** Autor

### 3.4. Manipulación de servomotores y adquisición de datos

Para realizar la caracterización y posterior identificación del sistema, es necesario realizar pruebas experimentales que nos permitan adquirir datos que contengan la suficiente información para tal fin, es por eso que se desarrollan algoritmos para las pruebas del VSA y para adquirir los datos necesarios. Todos los códigos implementados se encuentran en el apéndice.

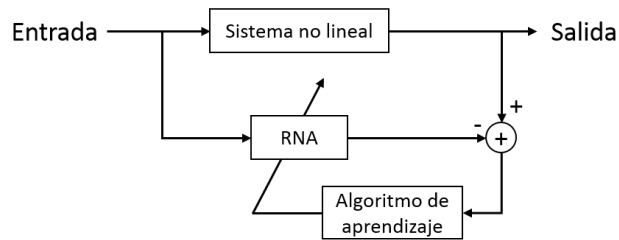
En la manipulación de los servomotores, como prueba inicial, se realizaron algoritmos que permiten moverlos hasta cierto grado con base en las especificaciones técnicas del fabricante. Luego se genera un movimiento sin repeticiones para observar y obtener los puntos máximos a los que puede llegar cada articulación sin que se presenten choques, posteriormente un movimiento cíclico, cambiando las longitudes de los resortes que al mismo tiempo es la rigidez, y se muestran los datos que se quieren conocer. Para estas pruebas se desarrolló un código en la interfaz del software del sistema embebido OpenCM.

Habiendo implementado dicho código se procede a generar las bases de datos que nos van a permitir caracterizar e identificar el sistema. Esta adquisición de datos se realiza en el software MATLAB©, donde se desarrolla un código que guarda todos los datos enviados por el puerto serial, previamente especificados en el OpenCM, y los almacena en diferentes variables. De esta manera se obtienen los datos que posteriormente se van a utilizar.



### 3.5. Identificación del sistema

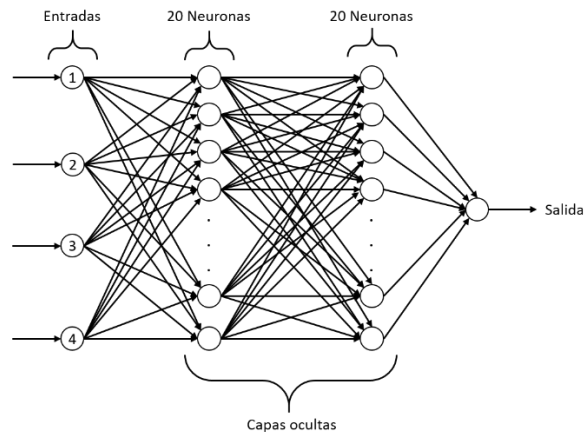
La identificación del sistema se realiza utilizando redes neuronales artificiales, tomando los datos adquiridos previamente y entrenando a la red para que nos entregue el resultado deseado. Para esta operación se utilizó el Toolbox de redes neuronales de MATLAB®, implementando un código que permite introducir varias entradas, además de definir la función de transferencia o activación de las neuronas, en este caso una función lineal, y los datos utilizados en la validación. El código implementado se encuentra en el apéndice. El esquema que representa la identificación por redes neuronales está en la figura 32.



**Figura 32.** Esquema de identificación por redes neuronales

**Fuente:** Autor

En la figura 33 se ilustra la red neuronal utilizada, la cual cuenta con dos capas ocultas y veinte (20) neuronas en cada capa oculta. En la capa de entrada se tiene cuatro (4) neuronas y en la capa de salida una neurona. Las variables de entrada que se utilizaron fueron, la posición del servomotor, la posición de la polea y los datos adquiridos por el sensor acoplado al engrane de la articulación, la cuarta entrada es el bias. La salida deseada es la longitud del resorte la cual se toma como parámetro de identificación.



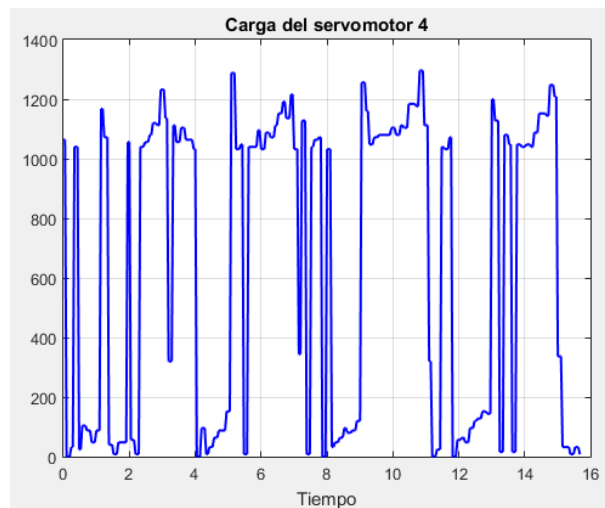
**Figura 33.** Esquema de la red neuronal artificial utilizada.

**Fuente:** Autor

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización

Las variables utilizadas para caracterizar el VSA fueron posición, velocidad y la carga. La carga es un valor que se puede leer por medio del sistema embebido implementado, ya que los servomotores, como realimentación, nos entregan estos datos. Cada valor obtenido representa un porcentaje del máximo torque ejercido por el servomotor, además se tiene también en cuenta la dirección en la cual se realiza dicho torque, ya que según el fabricante los valores entre 0 y 1023 significan un torque en la dirección contraria a las manecillas del reloj (CCW), mientras que entre 1024 y 2047 la carga trabaja en la dirección de las manecillas del reloj (CW). Por ejemplo 1040 es un valor que indica que la carga se ejerce en la dirección CW y es un 1,6% del torque máximo ejercido por el servomotor.



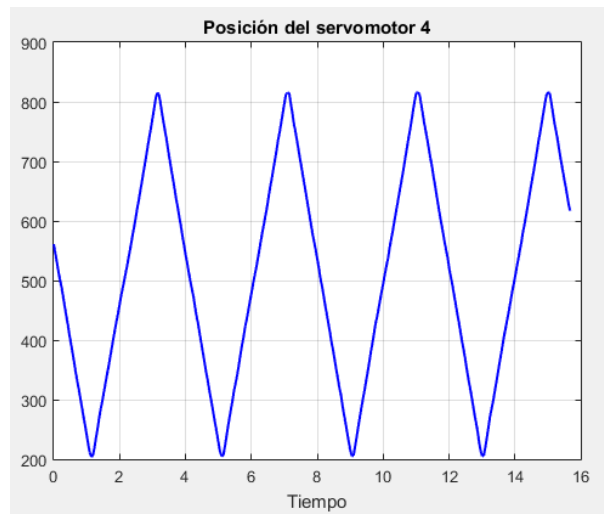
**Figura 34.** Carga ejercida por el servomotor 4

**Fuente:** Autor

En la figura 34 se muestra la gráfica de los datos obtenidos por la carga del servomotor, es notable que hay cambios de dirección repentinos, esto se debe a las fuerzas ejercidas tanto por el resorte como por el mismo sistema de engranajes.

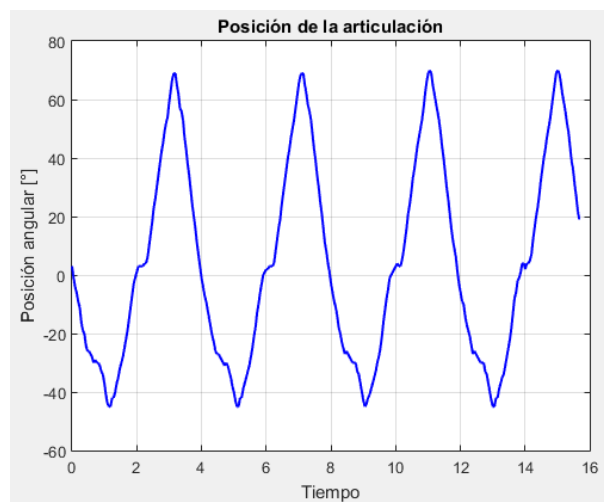
Para la posición tenemos un dato que también nos entrega el servomotor por realimentación. El rango de trabajo del servomotor es desde 0° hasta 300°, lo cual se representa en valores entre 0 y 1023, la resolución es de 0.29° por cada dato, es decir, en

un valor de 512 el servomotor se posiciona en  $150^\circ$ . Por otro lado, se determina también la posición de la articulación, como se mencionó anteriormente, esta posición no depende solo del dato que se le da al servomotor, sino también de la fuerza ejercida por el resorte. Según el diseño del VSA el rango de actuación de cada articulación es de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ , en las pruebas realizadas no se lleva hasta el límite, sino hasta posiciones en los que se pueda tener suficiente información. En la figura 35 se muestran las posiciones graficadas del servomotor, mientras en la figura 36 se observa el gráfico de las posiciones alcanzadas por la articulación.



**Figura 35.** Posiciones del servomotor 4.

**Fuente:** Autor



**Figura 36.** Posiciones alcanzadas por la articulación.

**Fuente:** Autor

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la figura 36 es notable que en la dirección angular positiva se alcanzan mayores valores, esto es debido a que en esa dirección la polea cambia la longitud del resorte, haciéndolo más rígido y por ende generando más fuerza para que pueda alcanzar tal posición.

La velocidad es también un factor importante, ya que en los movimientos explosivos se utilizan los puntos máximos de torque, posición y velocidad a los que puede llegar el sistema. En este caso nos limitamos a los mayores valores que nos puede entregar el servomotor, donde se tiene un rango entre 0 y 1023, valores que representan 0,111 rpm por unidad, es decir, que un valor de 500 equivale a 55,5 rpm. En las pruebas para la adquisición de datos se trabajó con velocidades bajas, 16,65 rpm con el fin de observar el comportamiento de cada componente del sistema.

## 4.2. Identificación

Para identificar el sistema, se utilizó como parámetro la longitud del resorte, ya que incluye variables como la posición del servomotor, la posición de la polea y la posición de la articulación, esta última variable es representada por los datos adquiridos con el sensor que está acoplado al engrane de la articulación. La base de datos de cada variable está compuesta por 1646 valores, de los cuales se tomaron 1000 para el entrenamiento de la red y el resto, 646, en la validación.

La red necesitó de 45 iteraciones para llegar al resultado final, utilizando el algoritmo de entrenamiento Levenberg-Marquardt y como criterio de rendimiento el algoritmo Mean Squared Error (mse). El rendimiento fue de  $1,00e-07$  y se validó en 6 ocasiones. En la tabla 2 se encuentran los datos más relevantes del entrenamiento de la red.

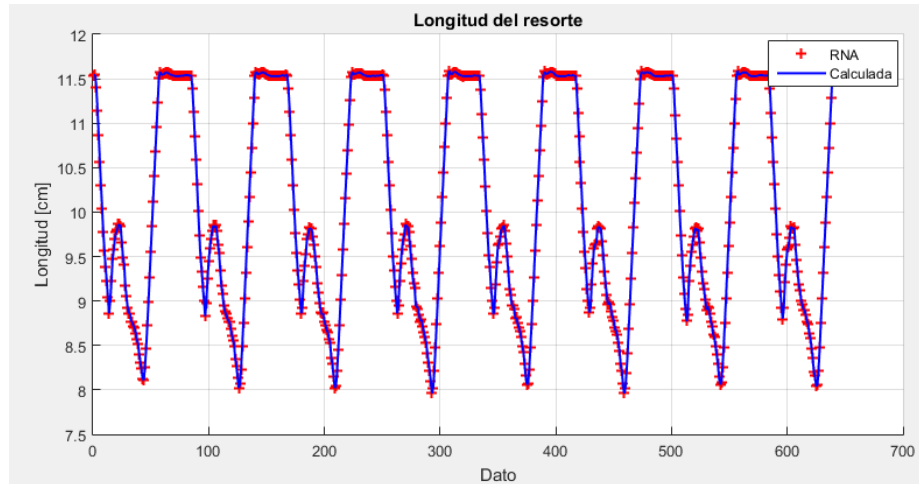
**Tabla 2.** Información del entrenamiento de la RNA

<b>Algoritmo de entrenamiento</b>	Levenberg-Marquardt
<b>Algoritmo de rendimiento</b>	Mean Squared Error
<b>Número de iteraciones</b>	130
<b>Desempeño</b>	$1,00e-07$
<b>Número de validaciones</b>	6

**Fuente:** Autor

En la figura 37 se muestra la comparación entre la longitud del resorte calculada, representada por la línea azul, y los resultados entregados por la RNA, representado por los

símbolos + de color rojo. Es notable que el error es muy bajo, por lo que la diferencia entre ambas gráficas es muy poco, haciendo efectiva la identificación por medio de la RNA.



**Figura 37.** Resultados de la identificación. Gráfica de longitud del resorte

**Fuente:** Autor

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 5.1. Conclusiones

Se logra la caracterización e identificación del sistema mediante la estrategia propuesta, estrategia que contiene pruebas para la adquisición de datos y la implementación de una RNA. La caracterización se basa en gran parte en los datos provistos por el fabricante de los servomotores ya que nos entrega información sobre el funcionamiento de estos, que son parte importante del comportamiento del VSA. Además, el diseño realizado facilita observar la influencia de cada componente dentro del sistema.

Se modelan en CAD todas las piezas diseñadas, logrando posteriormente el ensamble CAD de cada pieza dentro del sistema que es el VSA. También mediante la impresión 3D se obtienen los elementos en el material ABS, aunque algunos por restricciones en la capacidad de la impresora se dividieron, luego se ensamblan sin problemas para a continuación formar parte del VSA real e implementado con elementos mecánicos y servomotores digitales.

El sistema embebido permite llevar a cabo la estrategia de control implementada para manipular y adquirir datos de los servomotores, permitiendo esto poder realizar las pruebas posteriores y así obtener las bases de datos de las variables necesarias para lograr tanto la caracterización como la identificación del sistema.

En la caracterización se tienen en cuenta las limitaciones dadas por los servomotores, aunque tienen muchas ventajas también ya que por realimentación nos entrega datos, disminuyendo la cantidad de sensores a utilizar en este tipo de actuadores. Por otro lado, la RNA implementada facilita el proceso de identificación, entregando un error muy bajo y como se observa en la gráfica logrando seguir fielmente la variable propuesta a identificar.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5.2. Recomendaciones

La fuerza que ejerce el resorte es una variable importante en el sistema, por lo que se puede probar con diferentes tipos de resortes para observar cómo se comporta el VSA con cada resorte, y encontrar un punto óptimo en cuanto a esta variable.

El diseño mecánico se puede hacer un poco más compacto para no afectar la dinámica del sistema, por ejemplo, evitar la fricción directa entre los eslabones. También es recomendable dejar espacios para implementar sensores o piezas extras que no se consideren en el diseño inicial.

## 5.3. Trabajos futuros

Para este prototipo de VSA implementado se pretende realizar más pruebas con el fin de generar datos que permitan caracterizar el torque que puede generar la articulación, así como obtener perfiles de velocidad en diferentes movimientos. También se busca desarrollar códigos para que el VSA realice movimientos no explosivos, pero imitando los movimientos humanos como caminar o saltar.

Siguiendo con la línea de actuadores flexibles, se prevé implementar un amortiguado, el cual puede modificar la dinámica, pero dar mejores prestaciones en cuanto a imitar los movimientos humanos previamente mencionados.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

---

- Braun, D. J., Howard, M., & Vijayakumar, S. (2011). Exploiting Variable Stiffness in Explosive Movement Tasks. *Robotics: Science and Systems*, 1–8.  
<http://doi.org/10.1007/s10514-012-9302-3>
- Everarts, C., Dehez, B., & Ronsse, R. (2012). Variable Stiffness Actuator applied to an active ankle prosthesis: Principle, energy-efficiency, and control. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 323–328.  
<http://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385789>
- Flórez López, R., & Fernández Fernández, J. M. (2008). *Las Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas*. (L. Bello, Ed.). La Coruña: Netbiblo.
- Gil, I. (2015). *La impresión 3D y sus alcances en la arquitectura*. Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from [http://oa.upm.es/38442/7/PFC\\_IRENE\\_GIL\\_GIL.pdf](http://oa.upm.es/38442/7/PFC_IRENE_GIL_GIL.pdf)
- Lahoz-Beltrá, R. (2010). *Bioinformática: Simulación, vida artificial e inteligencia artificial*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Pino Diez, R., Gómez Gómez, A., & de Abajo Martínez, N. (2001). *Introducción a la Inteligencia Artificial: Sistemas Expertos, Redes Neuronales Artificiales y Computación Evolutiva*. Oviedo: Servicios de Publicaciones Universidad de Oviedo.
- Ruiz-Velasco Sánchez, E. (2007). *Educatrónica, innovación en el aprendizaje de las ciencias y la tecnología*. Ciudad de México: Ediciones Díaz de Santos.
- Van Ham, R., Vanderborght, B., Van Damme, M., Verrelst, B., & Lefeber, D. (2007). MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: Design and implementation in a biped robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(10), 761–768. <http://doi.org/10.1016/j.robot.2007.03.001>
- Vanderborght, B., Albu-Schaeffer, a., Bicchi, a., Burdet, E., Caldwell, D. G., Carloni, R., ... Wolf, S. (2013). Variable impedance actuators: A review. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), 1601–1614. <http://doi.org/10.1016/j.robot.2013.06.009>



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Weckx, M., Mathijssen, G., Si Mhand Benali, I., Furnemont, R., Van Ham, R., Lefeber, D., & Vanderborght, B. (2014). A Two-Degree of Freedom Variable Stiffness Actuator Based on the MACCEPA Concept. *Actuators*, 3(2), 20–40.

<http://doi.org/10.3390/act3020020>

Zheng Li, J. (2015). *CAD, 3D Modeling, Engineering Analysis, and Prototype Experimentation*. Cham: Springer International Publishing.

<http://doi.org/10.1007/978-3-319-05921-1>

Zhu, Y. (2001). *Multivariable System Identification for Process Control*. Eindhoven: Elsevier Science Ltd.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## APÉNDICE

---

Este apéndice contiene los códigos de programación utilizados en la metodología, tanto para la manipulación y adquisición de datos de los servomotores, como para el almacenamiento de datos y el entrenamiento de la red neuronal.

### **Código para manipulación y adquisición de datos desde OpenCM**

```
#define DXL_BUS_SERIAL1 1 //Dynamixel on Serial1(USART1)  <-OpenCM9.04
#define DXL_BUS_SERIAL2 2 //Dynamixel on Serial2(USART2)  <-LN101,BT210
#define DXL_BUS_SERIAL3 3 //Dynamixel on Serial3(USART3)  <-OpenCM 485EXP
/* Dynamixel ID defines */
#define ID_NUM 15
#define ID_NUM1 16
/* Control table defines */
#define GOAL_POSITION 30

Dynamixel Dxl(DXL_BUS_SERIAL1);
// Interpolación Servo-Pot
double xaa=2740;
double xbb=1371;
double yaa=0;
double ybb=1023;
// Inversión valor polea
double xa=210;
double xb=900;
double ya=204;
double yb=0;
//Interpolación Ángulo Alfa (potenciómetro-Longitud resorte)
double xxa=512;
double xxb=718;
double yya=0;
double yyb=50;

const double B=3; // Distancia del eje a inicio del resorte [cm]
```

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

```

const double C=10.8; // Distancia del eje a fin del resorte sin estirar
[cm]
const double rpol=10.5/10; // Radio de la polea [cm]
const float pi=3.14159; // Constante pi
const double Rad=pi/180.0; // Grados a radianes
const double Grad=150/512.0; // Bits a Grados
int a;

void setup() {
  // Dynamixel 2.0 Baudrate -> 0: 9600, 1: 57600, 2: 115200, 3: 1Mbps
  Dxl.begin(3);
  Dxl.jointMode(ID_NUM);
  pinMode(2, INPUT_ANALOG);
}

void loop() {
  int Sen = analogRead(2); // Lectura del sensor
  if(a==0){
    Dxl.setPosition(ID_NUM, 820, 150); // Servo a Posición X, Velocidad X

    double Ser=(Dxl.getPosition(ID_NUM))*Grad;
    //Posición polea [°]
    double Ppol=ya+(((yb-ya)/(xb-xa))*((Dxl.getPosition(ID_NUM1))-xa));
    double yy=yaa+(((ybb-yaa)/(xbb-xaa))*(Sen-xaa)); // Interpolación pot
    // Posición articulación
    double pos=round((Dxl.getPosition(ID_NUM))-yy);
    double P=round(pos*Grad); // Conversión a grados - Pos articulación
    // Ángulo alfa (Potenciómetro)
    double Alfa=yya+(((yyb-yya)/(xxb-xxa))*(Sen-xxa));
    double Ls=(rpol*Ppol*Rad)+(sqrt(((pow(B,2))+pow(C,2))-
(2*B*C*cos(Alfa*Rad)))); // Longitud del resorte [m]
    double Lo=C-B; // Longitud Inicial del resorte [m]

    SerialUSB.print(Dxl.getPosition(ID_NUM)); // Posición Motor
    SerialUSB.print(", ");
    SerialUSB.print(Ser); // Posición Motor [°]
    SerialUSB.print(", ");

```

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

```

SerialUSB.print (Sen); // Valor potenciómetro
SerialUSB.print ("", "");
SerialUSB.print (P); //Posición Articulación [°]
SerialUSB.print ("", "");
SerialUSB.print (Ppol); //Posición Polea [°]
SerialUSB.print ("", "");
SerialUSB.print (Ls); // Longitud Resorte [cm]
SerialUSB.print ("", "");
SerialUSB.println (Dxl.getLoad (ID_NUM)); // Carga del motor 15

if (Dxl.getPosition (ID_NUM) >= 500 && Dxl.getPosition (ID_NUM) <= 1023) {
    Dxl.writeWord (ID_NUM1, GOAL_POSITION, 210);
}

if (Dxl.getPosition (ID_NUM) >= 815 && Dxl.getPosition (ID_NUM) <= 1023 ) {
    a=1;
}
}

if (a==1) {
    Dxl.setPosition (ID_NUM, 203, 150); // Servo a Posición X

    double Ser=(Dxl.getPosition (ID_NUM))*Grad; //Posición motor [°]
    //Posición polea [°]
    double Ppol=ya+(((yb-ya)/(xb-xa))*((Dxl.getPosition (ID_NUM1))-xa));
    double yy=yaa+(((ybb-yaa)/(xbb-xaa))*(Ser-xaa)); // Interpolación pot
    // Posición articulación
    double pos=round((Dxl.getPosition (ID_NUM))-yy);
    double P=round(pos*Grad); // Conversión a grados - Pos articulación
    // Ángulo alfa (Potenciómetro)
    double Alfa=yya+(((yyb-yya)/(xxb-xxa))*(Ser-xxa));
    double Ls=(rpol*Ppol*Rad)+(sqrt(((pow(B,2))+pow(C,2))-(
(2*B*C*cos(Alfa*Rad))))); // Longitud del resorte [m]
    double Lo=C-B; // Longitud Inicial del resorte [m]

    SerialUSB.print (Dxl.getPosition (ID_NUM)); // Posición Motor
    SerialUSB.print ("", "");

```

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

```

SerialUSB.print(Ser); // Posición Motor [°]
SerialUSB.print(", ");
SerialUSB.print(Sen); // Valor potenciómetro
SerialUSB.print(", ");
SerialUSB.print(P); //Posición Articulación [°]
SerialUSB.print(", ");
SerialUSB.print(Ppol); //Posición Polea [°]
SerialUSB.print(", ");
SerialUSB.print(Ls); // Longitud Resorte [cm]
SerialUSB.print(", ");
SerialUSB.println(Dxl.getLoad(ID_NUM)); // Carga del motor 15

if(Dxl.getPosition(ID_NUM)<=512 && Dxl.getPosition(ID_NUM)>=0) {
  Dxl.writeWord(ID_NUM1, GOAL_POSITION, 900);
}

if(Dxl.getPosition(ID_NUM)<=207 && Dxl.getPosition(ID_NUM)>=0) {
  a=0;
}
}
}

```

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## Código para adquisición y almacenamiento de datos en Matlab

```

Código para adquisición y almacenamiento de datos
%-----
--
clc;
clear all;
close all;
%-----
--
%borrar previos
delete(instrfind({'Port'},{'COM3'}));
%-----
--
%crear objeto serie
s = serial('COM3','BaudRate',1000000,'Terminator','CR/LF');
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
%-----
--
%abrir puerto
fopen(s);
%-----
--
% parámetros de medidas
tmax = 30; % tiempo de captura en segundos
rate = 34; % Capturas por segundo
%-----
--
% preparar la figura
f = figure('Name','Datos - Link2');
a = axes('XLim',[0 tmax],'YLim',[0 2800]);
l1 = line(nan,nan,'Color','r','LineWidth',2);
l2 = line(nan,nan,'Color','b','LineWidth',2);
l3 = line(nan,nan,'Color','g','LineWidth',2);
l4 = line(nan,nan,'Color','y','LineWidth',2);
l5 = line(nan,nan,'Color','k','LineWidth',2);
l6 = line(nan,nan,'Color','c','LineWidth',2);
l7 = line(nan,nan,'Color','m','LineWidth',2);

legend('Motor15','Motor15G','Potenciómetro','Articulación','Polea','Resorte','CargaM15');

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('--- ()')
title('Datos')
grid on
hold on
%-----
--
% inicializar
pm15 = zeros(1,tmax*rate);
pm15G = zeros(1,tmax*rate);
Pot = zeros(1,tmax*rate);

```

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

```

Part = zeros(1,tmax*rate);
Ppol = zeros(1,tmax*rate);
Lres = zeros(1,tmax*rate);
CargaM15 = zeros(1,tmax*rate);

i = 1;
t = 0;
%-----
--
% ejecutar bucle cronometrado
tic
while t<tmax
    t = toc;
    % leer del puerto serie
    a=fscanf(s,'%g %g %g %g %g %g %g %g');
    pm15(i)=a(1);
    pm15G(i)=a(2);
    Pot(i)=a(1);
    Part(i)=a(4);
    Ppol(i)=a(5);
    Lres(i)=a(6);
    CargaM15(i)=a(7);
    %dibujar en la figura
    x = linspace(0,i/rate,i);
    set(l1,'YData',pm15(1:i),'XData',x);
    set(l2,'YData',pm15G(1:i),'XData',x);
    set(l1,'YData',Pot(1:i),'XData',x);
    set(l4,'YData',Part(1:i),'XData',x);
    set(l5,'YData',Ppol(1:i),'XData',x);
    set(l6,'YData',Lres(1:i),'XData',x);
    set(l7,'YData',CargaM15(1:i),'XData',x);
    drawnow
    % seguir
    i = i+1;
end
%-----
--
% resultado del cronometro
clc;
fprintf('%g s de captura a %g cap/s \n',t,i/t);
%-----
--
% Cerrar y borrar puerto serial
fclose(s);
delete(s);
clear s;

```

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## Código de la red neuronal para identificación

```

% Red neuronal para Longitud del resorte
%-----
clc;
clear all;
close all;
%-----
l1 = dir; %Leer directorio
%-----
for i=3:10
    load(l1(i).name); %Cargar archivos del directorio
end
%-----
clear l1 i;
%-----
net = feedforwardnet([20 20]); % Crear red neuronal
net.layers{2}.transferFcn = 'purelin'; %Definir función de transferencia
%-----
x = [pm15' Ppol' Pot' ones(length(Pot),1)]; % Entradas
net = train(net,x(1:1000,:)',Lres(1:1000)); % Entrenamiento
y = net(x(1000:1646,:))'; % Salida
p = perform(net,y,Lres(1000:1646)); % Desempeño
%-----
%Plot del resultado
f = figure('Name','Longitud del resorte');
hold on;
grid on;
plot(y, '+r', 'LineWidth',1.5);
plot(Lres(1000:1646), 'b', 'LineWidth',1.5);
title('Longitud del resorte');
legend('RNA', 'Calculada');
ylabel('Longitud [cm]');
xlabel('Dato');

```



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTE: *Kevin Delgado*

FIRMA ASESOR: **JUAN SE.**

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO\_\_\_      ACEPTADO\_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_