



**Robótica aplicada a la elaboración de un brazo robótico solucionador de SUDOKUS
por medio de redes neuronales**

Camilo Andrés Díaz Pinzón

Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano
Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2018

Tabla de contenido

1	RESUMEN.....	3
2	INTRODUCCION	4
3	DEFINICION DEL PROBLEMA	5
3.1	CONTEXTO	5
3.2	FORMULACION DEL PROBLEMA.....	5
4	OBJETIVOS.....	6
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	6
4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
4.3	JUSTIFICACION	7
5	MARCO TEORICO	7
5.1	MARCO TEORICO	7
5.2	ESTADO DEL ARTE	12
6	METODOLOGIA	13
6.1	DISEÑO DEL BRAZO	14
6.2	LA ELABORACION Y PROGRAMACION DE LAS REDES NEURONALES	15
6.3	ELABORACION DEL DOCUMENTO	16
6.4	DESARROLLO DEL ALGORITMO DE LOS MOVIMIENTOS DEL BRAZO	17
7	DESARROLLO	18
7.1	DISEÑO DEL BRAZO	18
7.2	DESARROLLO DEL ALGORITMO DE LOS MOVIMIENTOS DEL BRAZO	24
8	RESULTADOS.....	28
8.1	FUTURO DEL PROYECTO.....	29
8.2	CONCLUSIONES.....	30
9	AGRADECIMIENTOS	31
10	BIBLIOGRAFIA	32

1 RESUMEN

La robótica ha estado presente desde los inicios de la industria, lo que implica, que a través de los años ha estado evolucionando tanto hasta haber llegado a ser maquinas pensantes. En este proyecto, se busca desarrollar un sistema de inteligencia artificial a un brazo robótico, este tiene como objetivo resolver problemas específicos donde se enseña, desde el desarrollo de la arquitectura del brazo, hasta la ejecución y finalización de un prototipo de este.

En el siguiente documento se encontrará una breve explicación de la historia de la robótica, la definición de muchos conceptos de las maquinas autómatas y la inteligencia artificial; al igual que mostrar el desarrollo de un robot, cuyo propósito es solucionar SUDOKUS.

2 INTRODUCCION

La robótica ha hecho parte fundamental del desarrollo de la industria y la generación de conocimientos aplicados, como soldadores en plantas de manufactura o ayudantes guía en operaciones de ensamblaje; además de ser una parte importante de la vida actual de las personas, siendo participes en acciones de rescate o siendo los únicos habitantes del planeta marte hasta el momento. Los robots y autómatas han desarrollado año tras año una serie de herramientas que los ayudan en su manejo de problemas y comunicación con su entorno, trayendo consigo un desarrollo de tecnologías a nivel global.

Durante los últimos años, el desarrollo de los robots se ha enfocado en la evolución de su inteligencia. Año tras año, los robots son más autónomos e inteligentes, junto con ellos, las computadoras, lo que conlleva a una rápida transformación de los procesos y metodologías para distintos trabajos en los que los autómatas se ven involucrados.

Aunque no solamente los robots han estado creciendo en términos intelectuales, también lo han estado haciendo en la complejidad de sus mecanismos estando en la vanguardia del desarrollo de nuevas herramientas de movimiento artificial, siendo participes en la generación de componentes biomecánicos, como en aspectos médicos bien ejemplificados, como las manos protésicas o artificiales, las cuales han sido desarrolladas por mucho tiempo atrás; pero en la actualidad, son tecnologías punta en términos de mecanismos y sensores. [7]

Siempre la tecnología ha estado inspirada en componentes biológicos y los robots no son la excepción. Tomando en cuenta el desarrollo de la inteligencia en las maquinas, ha tomado mucha inspiración de la neuro ciencia, como los conocimientos y estudios de esta; y aplicándolo hacia algoritmos complejos de aprendizaje. La inteligencia artificial tiene bastantes fundamentos sobre el funcionamiento celebrar de ciertos primates, de los que se puede partir para el mecanismo funcional de cerebro, creando redes neuronales artificiales para diferentes tareas. [9]

Los avances han permitido que las computadoras actuales razonen he interactúen con el mundo real, siendo participes de diferentes experimentos, o siendo actores en el control de tendencias actuales; lo que implica que los desarrollos de las IA's y robots tienen un espectro de ejecución mucho más grande de lo que las personas creen, estando en todas partes en los que exista una evolución tecnológica.

Gracias a estos diferentes avances tecnológicos, podemos ver reflejada la generación de conocimientos, con el desarrollo global proporcionando un impulso a realizar proyectos e investigaciones cada vez más elaboradas y profundas para todos los estudiantes de las ciencias aplicadas, frente a las cuales se desarrolla este proyecto.

3 DEFINICION DEL PROBLEMA

3.1 CONTEXTO

La robótica en los últimos años ha tomado un giro considerable que va más allá de la simple realización de tareas secuenciales o repetitivas, se han convertido en una herramienta que poco a poco supera las expectativas con respecto a sus límites. Cada vez vemos, leemos y oímos que la inteligencia artificial es el futuro del mundo y los instrumentos para ser parte de este futuro, al parecer inevitablemente, están al alcance de jóvenes estudiantes.

Gracias a múltiples variedades de dispositivos y a la interconectividad del mundo, se puede observar como diferentes profesionales, maestros o estudiantes; aportan sus conocimientos a la exploración de desarrollo y aplicación de las inteligencias artificiales; mostrando, año tras año, los grandes saltos tecnológicos e investigativos frente a este tema. Proyectos con base en redes neuronales, son el centro de atención en diferentes puntos del globo; proyectos como Duplex (aplicativo de la empresa Google) muestran el potencial de estas tecnologías, provocando el temor y asombro por parte de las masas.

Pero ¿es viable confiar en la inteligencia artificial? Aún no tenemos una respuesta concreta a esta pregunta, debido a la cantidad de ramas por la que se puede considerar el desarrollo de las IA's, Aún estamos lejos de una inteligencia artificial completamente autónoma, pero aun así se pueden hacer maravillas haciendo uso de estas; por medio del uso de reconocimiento de patrones, o más conocido como machine learning, el mundo ha podido apreciar asombrosas proezas de la ingeniería; como robots que juegan ajedrez, o bien, sistemas de estudios de comportamiento donde, con base a unos pocos históricos de búsquedas en internet, se puede identificar un patrón de consumo por parte de un individuo. El uso de las inteligencias artificiales puede convertir fácilmente a los robots, tanto en herramientas, como juguetes o ayudantes.

Tomando la premisa anterior, podemos construir con motores, piezas y un par de cables “un juguete” el cual, con las instrucciones correctas, puede hacer lo que nosotros deseemos o necesitemos, ya sea que resuelva un cubo de Rubik o que salga de un laberinto. Bajo esta temática, se desarrolla el siguiente proyecto: tomar una tarea cotidiana y elaborar un robot con la suficiente inteligencia para la solución de tareas específicas.

3.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

Considerando los avances tecnológicos de la inteligencia artificial, se busca diseñar, desarrollar e implementar, un sistema de redes neuronales adheridas a un brazo robótico autónomo, bajo la directriz de solucionar cualquier tipo de SUDOKU de 9x9.

En ese sentido, la pregunta guía que precede a este documento es: ¿Cómo desarrollar un modelo adecuado de un brazo robótico con redes neuronales para la solución de problemas específicos?

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y realizar un primer prototipo que muestre la funcionalidad de un brazo robótico, que, por medio de redes neuronales, es capaz de resolver cualquier tipo de SUDOKU de una dimensión de 9x9 de forma fluida y autónoma, con una mínima participación de la interacción humana.

El objetivo es lograr que, por medio de redes neuronales, un brazo robótico reconozca, solucione y escriba un SUDOKU de forma física.

			8		1			
						4	3	
5								
				7		8		
						1		
	2			3				
6							7	5
		3	4					
			2			6		

Imagen 1. SUDOKU. Autoría Alex Zevallos. Blogspot.com

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar, de forma adecuada, la parte estructural del brazo robótico; de acuerdo con las necesidades requeridas para el correcto funcionamiento de este al momento de ejecutar la tarea para el cual fue creado. Realizando los estudios mecánicos y físicos del diseño del brazo robótico, para evitar el desgaste o estrés del material seleccionado al momento de la implementación de sus funciones.
- Elaborar y montar el esquema del circuito electrónico a utilizar en el brazo robótico para su correcto funcionamiento.
- Formular y programar las redes neuronales para el reconocimiento de los patrones de números, con el fin de identificar los números plasmados en la matriz SUDOKU y traducirlos a un mapa de bits para su correcto procesamiento y búsqueda de solución. E Idear y programar el algoritmo por el cual se encontrará la solución del SUDOKU.

- Realizar el montaje de un primer prototipo, para la aproximación de un brazo robótico funcional para la tarea propuesta.

4.3 JUSTIFICACION

La inteligencia artificial ya se muestra como parte fundamental del futuro del globo, por ende, formar parte de este debería ser una de las prioridades de las instituciones alrededor del país. Al ser tecnologías tan novedosas; aún hay mucho por hacer, por optimizar, y por crear cualquier investigación o desarrollo abordando esta temática que aproxima cada vez más a una formación académica más preparada para las nuevas generaciones.

5 MARCO TEORICO

5.1 MARCO TEORICO

El uso de la robótica, para solución de problemas, se remonta a la década de los sesentas; enlazado el desarrollo de los sistemas y manufactura asistida por computadoras, cuyos métodos de ejecución caracterizan las presentes tendencias de la robótica y los sistemas automatizados en los procesos de manufactura. Uno de los principales implicados en el desempeño de investigación, que abarca el tema de la robótica, es Estados Unidos; en donde hubo una adopción considerable, de casi veinte años, después de su aparición en la industria. Según los datos históricos expuestos en el libro: “Robótica aplicada” de Jon J. Craig, el mercado de la robótica en la industria, fue muy variable tras la adquisición de los Estados Unidos de estas nuevas tecnologías, manteniéndose en esa variabilidad durante casi 10 años, después de este periodo de incertidumbre el uso de los sistemas autómatas se vio en un incremento bastante drástico, lo cual indica que, durante este periodo de auge de la robótica, su investigación y desarrollo también lo hizo, manteniendo una relevancia de suma importancia en la actualidad [8].

Para el mundo actual, los sistemas autónomos junto con la robótica son parte esencial de nuestro diario vivir y se pueden definir certeramente como maquinas que imitan el comportamiento de seres vivos para la realización de trabajos concretos. Estos son puntualmente referenciados como el desarrollo investigativo más común de la ingeniería [5], y como no hacerlo si la ingeniería es uno de los pocos estudios de las ciencias aplicadas con los conocimientos para la elaboración y control de estos.

Los robots son maquinas caracterizadas para la ejecución de tareas concretas, los cuales tienen diferentes tipos, con características específicas, como lo son los robots manipuladores, cuyos actuadores simulan un brazo articulado.

Los robots manipuladores son, esencialmente, brazos articulados. De forma más precisa, un manipulador industrial convencional es una cadena cinemática abierta

formada por un conjunto de eslabones o elementos de la cadena interrelacionar mediante articulaciones o pares cinemáticos, (texto). Las articulaciones permiten el movimiento relativo entre los sucesivos eslabones [5].

Además de las articulaciones y funciones, un robot tiene que poseer un sistema de control, ya que, dependiendo de la arquitectura del sistema de control, el robot puede realizar o solucionar tareas sencillas o complejas. Las tareas sencillas se catalogan como tareas de un bajo nivel, donde el razonamiento de la máquina es de corto plazo y mantiene un conjunto de movimientos básicos para la finalización de la tarea; un ejemplo claro de esto: los robots con empleos en la industria, encargados de la soldadura en procesos de manufactura, el cual solamente necesita de las coordenadas de movimientos una sola vez y funciona de manera continua, repitiendo el mismo patrón de movimientos. El otro tipo de tareas a realizar por un robot, son las actividades complejas, donde el nivel de razonamiento de la máquina es mucho más compuesto y elaborado, mostrando un intento de línea de aprendizaje, además de un seguimiento continuo de sí mismo y de su entorno, como lo son los famosos seguidores de línea [15][2]. Estos tipos de robots son una de las bases para las máquinas autómatas que, a partir de una comunicación con su entorno, son capaces de realizar actividades de mayor dificultad; comunicación que logran por medio de dispositivos sensibles a los cambios en el ambiente, dispositivos comúnmente denominados sensores, los cuales, por medio de pulsos o señales digitales, permiten una interacción directa de la máquina con el entorno; este mecanismo es también llamado monitoreo continuo, que es el primer nivel para el desarrollo de máquinas más avanzadas.

Para la elaboración de robots más avanzados, es necesario llevar un buen control, conocimiento del diseño y limitaciones de este; siendo una de las partes más importantes a la hora de manufacturarlos para el cumplimiento de sus labores. Dependiendo de la cantidad de mecanismos que este posea, puede elevar la complejidad de sus movimientos, por ende, se tiene mucho cuidado a la hora de realizar la arquitectura del diseño del robot, si es muy complejo su sistema de mecanismos, lo más probable es que los cálculos para sus movimientos básicos se vuelva una tarea titánica; pero por el otro lado, si el sistema es demasiado básico, el robot en cuestión tendrá una limitación al momento de realizar sus tareas. La optimización del diseño de un buen robot, muchas veces, por no decir la mayoría, se deja en un segundo plano o simplemente se ignora; esto causa uno de los muchos problemas a la hora de hacer una investigación o un desarrollo sobre la robótica. Estas dificultades desarrolladas por un mal estudio de diseño conllevan aún más inconvenientes en el proyecto, al tener que elevar la complejidad del razonamiento del robot y un sistema demasiado elaborado del control de este, una de las soluciones planteadas para el remedio a un contratiempo de diseño es la elaboración de técnicas de control teóricas, que mantengan la configuración de los segmentos que realizan la operación [12]. Obviamente, es mejor evitar cualquier aumento de la dificultad de los sistemas de control innecesariamente; es por esto, que el uso de un adecuado sistema de mecanismos es la mejor alternativa, como por ejemplo lo es el uso de esquemas de mecanismos que proporcionen una mayor flexibilidad y capacidad de movimiento, como es el esquema de transmisión *Variable stiffness transmission* (VST), el cual funciona por medio de la capacidad de absorción de energía cinética de ciertos componentes, básicamente funciona como un intento de tendón que por medio de varios puntos de flexión tiene una capacidad mayor de absorber fuerza y funciona a través de un solo

actuador, lo que mejoraría en gran medida el sistema de control de un brazo robótico o de un robot móvil [1].

Sin embargo, no es mala idea tener un sistema de control adecuado, con el cual se puede explotar el potencial de una maquina autónoma si está en las manos correctas. Un gran ejemplo del potencial que tienen los sistemas de control, son los vehículos autónomos sin conductor (UV, unmanned vehicles), cuya funcionalidad está ligada directamente con la comunicación constante de la maquina con el entorno; como lo mencionábamos anteriormente, el uso de sensores y la robótica van muy de la mano, gracias a este matrimonio que hay entre estos, es posible que los vehículos estén conduciendo en las calles sin necesidad de intervención humana; este es un modelo de robot autónomo que tiene sus fundamentos en el monitoreo continuo, el cual agencias como el departamento de investigación de defensa de Canadá ha apostado hace ya bastante tiempo atrás [13].

La robótica aun así posee mucho potencial de crecimiento bastante amplio, donde hay un componente de aprendizaje por parte de la máquina, donde ya podemos definir las maquinas inteligentes, que están un paso más allá de la complejidad de las máquinas de monitoreo continuo. Y aunque se piense que la inteligencia artificial es un tema que se vino a desarrollar hace unos pocos años, es en cierta medida falso; esta metodología de autonomía en las maquinas empieza a ser diseñada al mismo tiempo que se empezó a distribuir computadoras a los hogares, aunque este tipo de inteligencia artificial era muy primitiva y solo se permitía reconocer cierto tipo de patrones en algoritmos de programación. Tomando inspiración de las herramientas ya existentes de reconocimiento de patrones, se pudo elaborar algoritmos primitivos de inteligencia computacional (CI) como el *artificial immune algorithm* [9], cuya relación con el sistema inmune del ser humano es bastante evidente. Dentro de la rama de las inteligencias artificiales se puede encontrar el uso de redes neuronales para la ejecución de tareas complejas.

En los últimos años el rango de estudio de Inteligencia Artificial ha brindado grandes soluciones a diversos campos como Economía, Medicina, Física, Seguridad, entre otras áreas. Uno de los temas de Inteligencia Artificial que ha conseguido trascendencia, es el reconocimiento de patrones a través de Redes Neuronales Artificiales [18].

A través de patrones específicos o únicos se puede lograr diferenciar un individuo u objeto de otro de su mismo tipo, un ejemplo de ello sería el ADN, que con ligeros cambios en su estructura logra diferenciar un animal de otro o las huellas digitales de una persona que lo identifican y hacen único.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) se basan en la red de neuronas del cerebro humano; su funcionamiento es a través de un modelo matemático el cual consiste en unas entradas, unos pesos y la salida o salidas.

“Una red neuronal artificial es un procesador distribuido en paralelo de forma masiva que tiene una tendencia natural para almacenar conocimiento de forma experimental y lo hace disponible para su uso” [29].

El estudio de la Redes Neuronales Artificiales (RNA) ha tenido gran relevancia en los últimos años, puesto que toman como base la estructura del sistema nervioso, replicándolo computacionalmente para construir “sistemas de procesamiento de información paralelos distribuidos y adaptativos que puedan presentar un cierto comportamiento de inteligente similar al de los organismos biológicos” [3] [30]

Las Computadoras u objetos que son construidos con algún tipo de RNA, al imitar la estructura del sistema nervioso son capaces de ejecutar instrucciones que aquellos que no tienen dentro en su programación una RNA. La operación que ejecuta principalmente es transformar de manera análoga las señales de entrada [11].

Las neuronas son la pieza básica de las redes biológicas y a su vez las neuronas se organizan por capas. Las RNA no son diferentes, se establece una estructura jerárquica similar, la neurona artificial es la parte básica del sistema, varias capas de neuronas artificiales forman una red; una o diferentes capas de redes neuronales, con sus interfaces de entrada y salida, construyen el sistema global de la red neuronal.

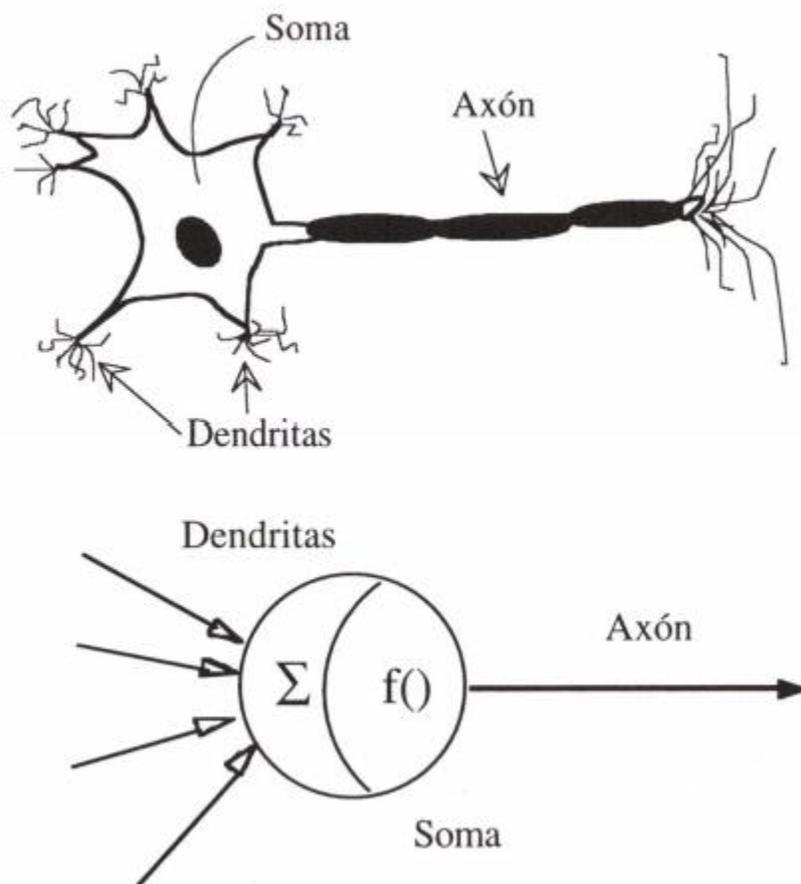


Imagen 2. Neurona biológica y esquema de neurona artificial. Universidad de Zaragoza. [29]

Una neurona artificial es un nodo simple que a partir de un vector de entradas $X(t)$ que puede provenir del exterior o de otra neurona, retorna una única salida $Y_i(t)$. El esquema que compone una neurona i es:

- El vector de entrada $X_i(t)$ y pesos sinápticos W_{ij} . (Estos pesos pueden ser de Valor fijo o cambiante dependiendo el tipo de RNA que se implemente)
- Una regla de programación $H_i(t) = s(W_{ij}, X_i(t))$.
- Una función de activación $Y_i(t) = F_i(Y_i(t-1), H_i(t))$, que retorna una salida $Y_i(t)$.

Las entradas y salidas de una neurona artificial pueden ser binarias (digitales) o continuas (analógicas) esto depende del modelo y la aplicación.

“La regla de propagación, a partir de las entradas de la neurona y de sus pesos, proporciona el valor del potencial postsináptico. La regla más habitual es lineal, llevando a cabo la suma de las entradas ponderada con los pesos sinápticos, a esta expresión se suele añadir un parámetro adicional i denominado umbral”. [30]

$$H_i(t) = \sum_j W_{ij} * X_j - \theta_i$$

Ecuación 4.1

La función de activación $f(.)$ proporciona a partir del potencial postsináptico $h(t)$ y del propio estado de activación anterior de la neurona $Y_i(t-1)$, su estado de activación actual.

Las redes neuronales tienen una serie de clasificaciones, las cuales corresponden a como es su funcionamiento.

Como lo son:

- Híbridos
- RBF Contrapropagación
- Supervisados
- Realimentados
- BSB
- Hacia Adelante
- Perceptrón [3]
- No Supervisados
- Realimentados
- HopField
- Hacia adelante
- Mapas de Kohonen
- Reforzados
- Aprendizaje reforzado

Un gran ejemplo de cómo trabaja una red neuronal, es la definida como perceptrón, cuyo primer modelo fue desarrollado en 1958 por Rosenblatt; este modelo despertó gran interés debido a su capacidad de reconocer patrones simples. Este modelo sólo es capaz de discriminar patrones muy sencillos, linealmente separables, esto limita a las redes a la solución de problemas donde el conjunto de puntos sea separable geoméricamente.

La función XOR no puede ser resuelta implementando una sola red de Perceptrón, quizás con varias redes de Perceptrón se pueda solucionar. [31]

En un principio se pretendía detectar formas simples, tales como caracteres escritos a mano, mapas de tiempo y espectros del lenguaje; esto ha venido cambiando de una manera más ambiciosa, desde sus inicios se ha querido lograr una percepción Artificial que no es nada más que imitar los sistemas sensoriales biológicos en su forma más completa.

En 1960 se empezaron los primeros experimentos, estos experimentos estaban basados en redes neuronales elementales tales como el *Perceptrón*, *Adaline*, *Matrices de Aprendizaje*. Estos en un principio fueron fáciles, pero pronto se dieron cuenta que imitar los sistemas biológicos era más difícil de alcanzar.

En el análisis de imágenes existen ciertos requerimientos que no son fáciles de cumplir:

- Invariabilidad de la detección con respecto a la traslación, rotación, escala perspectiva, oclusión casual y casamiento simple de los objetos; especialmente bajo condiciones de iluminación variables [32].
- Relación de observaciones de varios contextos a niveles diferentes de abstracción, en orden a distinguir los eventos más selectivamente [32].

5.2 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, la mayor cantidad de avances investigativos y de desarrollo en la robótica, son mejoras mecánicas y aplicativas a prototipos ya existentes; obviamente, esto no le quita merito ya que, en las últimas décadas han aparecido robots que caminan de manera bípeda, otros con reconocimiento de signos vitales, etc.... Muchos de estos tipos de máquinas autómatas, son desarrollos a largo plazo y aún no están disponibles para su adquisición por parte de la gente del común, pero, aun así, hay una gran cantidad de robots mezclados entre nosotros, como el sistema de asistente por reconocimiento de voz (Alexa o Siri) los cuales son sistemas computacionales con redes neuronales que identifican patrones de comportamiento de su poseedor, aumentando la capacidad de interacción entre máquina y humano.

La robótica y el desarrollo de inteligencia artificial van muy de la mano y con el uso adecuado de estas dos, es posible la elaboración de proyectos muy ambiciosos; la mayoría de estas creaciones son posibles por parte investigativa de estudiantes universitarios o entidades privadas que, aunque, los componentes para su fabricación no son baratos, son accesibles para las instituciones que apoyen estos proyectos.

Uno de los ejemplos mas claros de robots autónomos en la industria, es el sistema automatizado actual de algunas empresas de manufactura automotriz, que en uno de sus procesos mas comunes para el uso de estos es en la aplicación de pinturas a la carrocería de autos, los cuales por medio de algoritmos previamente establecidos logran un acabado superficial impecable sin importar la forma o tipo de carrocería y pintura.

Además uno de los puntos clave en el uso de redes neuronales, es en el reconocimiento de patrones para el estudio de comportamiento humano, tomando como ejemplo el algoritmo de YouTube, este toma una recopilación de búsquedas y visitas a los videos montados en la plataforma y con base en estos va generando un perfil del usuario, por el cual, le es más fácil al aplicativo sugerirle al usuario videos relacionados a su tendencia de búsquedas, y publicidad relacionada con temas afines al comportamiento del usuario en la red, creando así un vinculo mas directo entre el usuario y la plataforma, ya que es una interacción mas personal.

En la actualidad, no existen muchos ejemplos de como usar estos dos factores juntos en la industria, robots autónomos y redes neuronales, la mayoría de los proyectos que contienen estas dos características son de mera investigación, aun no son aplicados directamente en un ambiente industrial o comercial. Pero no es sorpresa que se este pensando en aplicar diferentes modelos de proyectos con estos enfoques en una especie de evolución en mecanismos de la industria.

6 METODOLOGIA

Al ser un proyecto de generación de conocimientos e investigación científica, la metodología que define en gran parte es la experimental y empírica, las cuales están sustentadas en el control y manipulación de un gran grupo de variables integradas en la concepción de este, haciendo referencia particularmente al manejo completo del ambiente en el que se verá desempeñado.

Para el desarrollo de la investigación se implementó un método diferente para el diseño arquitectónico del brazo para la elaboración y programación de las redes neuronales, la elaboración del documento y el desarrollo del algoritmo de movimientos del brazo. Esto fue definido con base a los diferentes objetivos del proyecto que por motivos de tiempos y practicidad fue dividido en dos partes como lo muestra el diagrama 1.

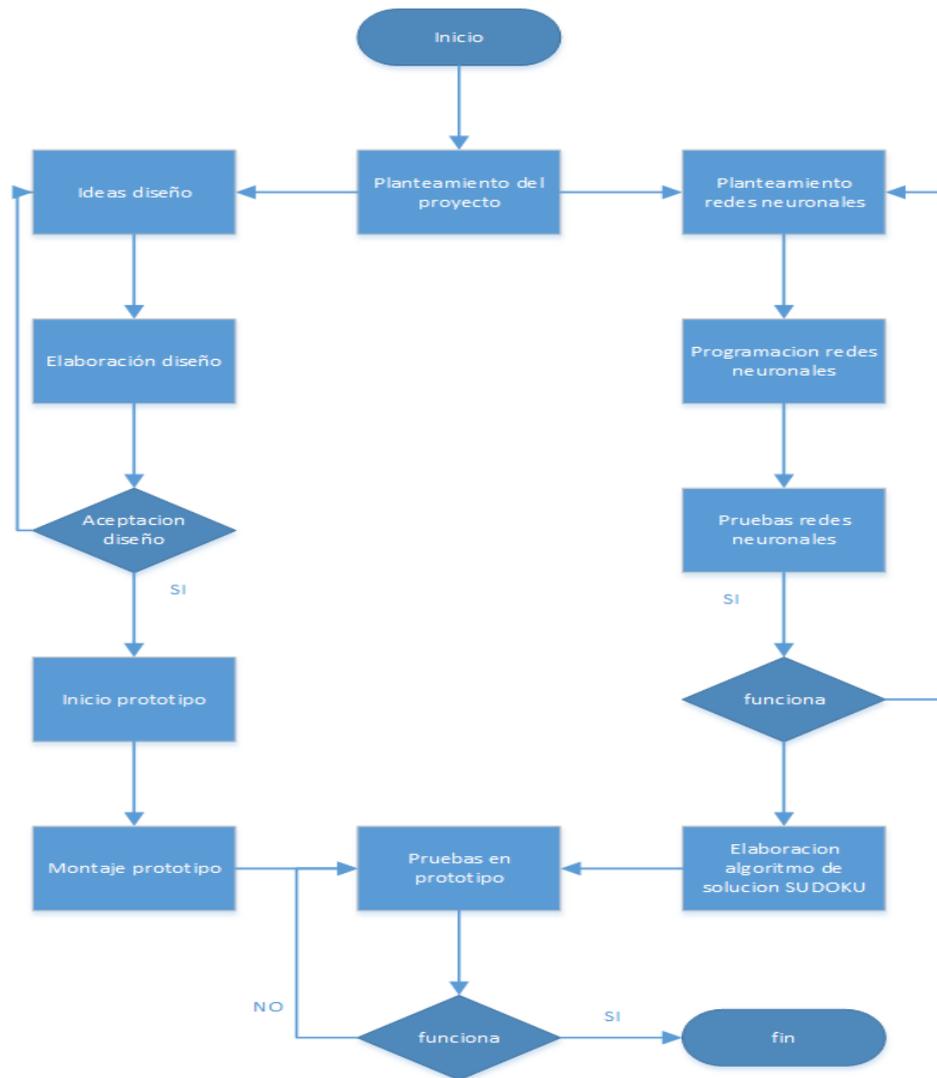


Diagrama 1. Diagrama de flujo elaboración del proyecto. Autoría propia

6.1 DISEÑO DEL BRAZO

Para el diseño del brazo, se utilizó una metodología con bastantes beneficios en términos de diseños considerando diferentes referentes a brazos con previas concepciones que aumentarían el comportamiento, se tomaron ideas que fueran funcionales para el enfoque del proyecto y se inició con el diseño arquitectónico del brazo.

El diseño final del brazo debía tener un aspecto simple, ya que está basado en el método de trabajo puka joque, el cual define que la máquina debe ser fácil de utilizar y controlar. El procedimiento por el cual pasó el diseño del brazo es bastante simple y muestra un modelo básico de prototipado, como se puede observar en el diagrama 2.

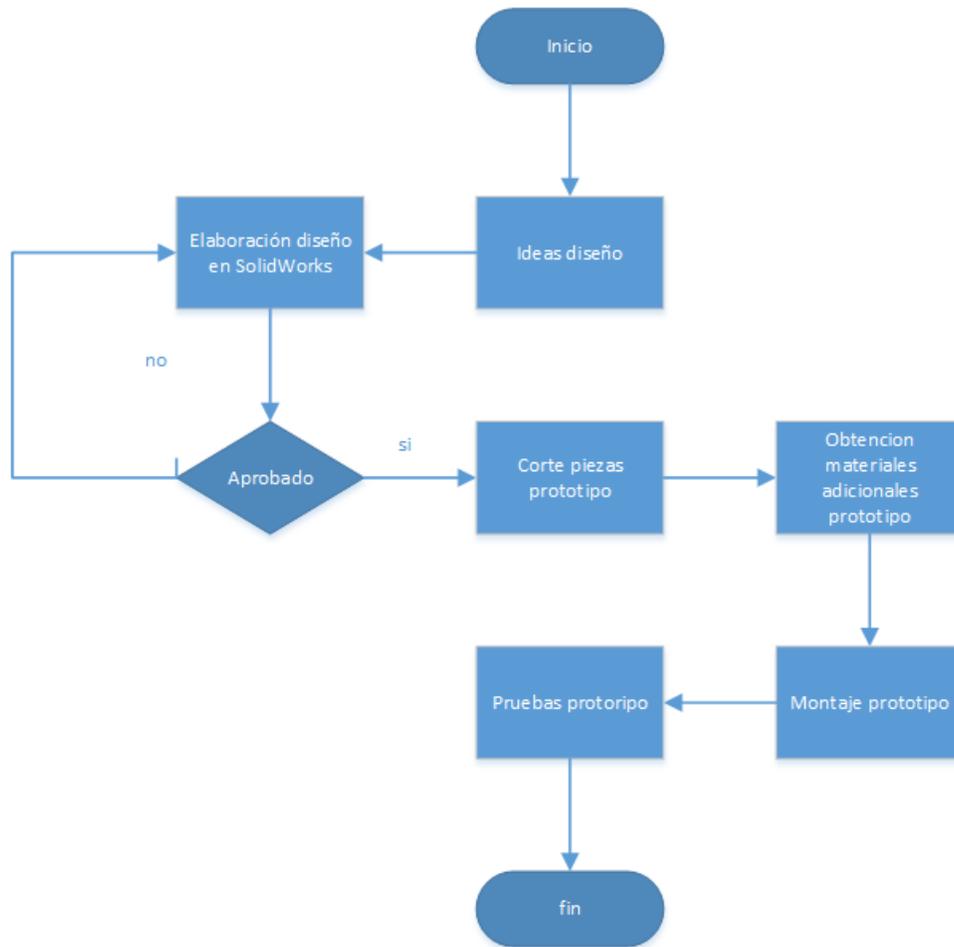


Diagrama 2. Diagrama de flujo diseño del prototipo. Autoría propia.

6.2 LA ELABORACION Y PROGRAMACION DE LAS REDES NEURONALES

Lo primero que se debe pensar es el número de neuronas en la capa de entrada y salida. Los datos entrantes serán procesados por las neuronas que se establecen de entrada y que serán procesadas por las RNA, los resultados que se obtengan tras el procesamiento serán entregados a través de las neuronas de salida. Esto quiere decir que una RNA con e neuronas de entrada y s neuronas de salida, corresponderá a un vector de entrada X de tamaño e $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ y los datos de salida será un vector Y de tamaño s $[y_1, y_2, y_3, \dots, y_n]$, estableciendo una dependencia entre ellos y podremos llamar esta dependencia ES y se puede representar como una función:

$$[y_1, y_2, y_3, \dots, y_n] = ES[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$$

Ecuación 5.1

ESTRUCTURA DE LOS DATOS DE ENTRADA

Como los datos que se van a procesar son imágenes, se tendrán mapas de bits que representan cada número, estas imágenes estarán representadas como una matriz de $[1,0]$, donde el 1

representará el área sombreada de la imagen y el 0 será la parte en blanco, se establecerán varias imágenes de entrada por cada número, esto teniendo en cuenta el aspecto a de los antecedentes. Estas imágenes que serán la guía de la RNA para procesar los datos de entrada serán la base de conocimiento (experiencia) o también llamados datos de entrenamiento de la RNA; el tamaño de la matriz de entrada estará definido por el número de neuronas de entrada {E}. El vector de salida será de tamaño 9 esto indica que se tendrán 9 Neuronas de salida, este será un vector de [1,0] en el cuál en la posición (X+1) del vector es la que indicara el número que ha sido leído.

ENTRENAMIENTO DE LA RNA

Se deberá ejecutar un proceso de entrenamiento de la RNA con la base de conocimiento, se medirá la curva de error que arroje en entrenamiento de la RNA, se ejecutará n números de entrenamientos hasta obtener un error mínimo; de este entrenamiento se obtendrán los pesos W que serán establecidos en las conexiones neuronales de la RNA.

6.3 ELABORACION DEL DOCUMENTO

El documento se elaboró partiendo de una investigación previa, la búsqueda de las referencias y la lectura de documentos que ayudaran al desarrollo del proyecto en general, pasando por un filtro realizado por los participantes del proyecto, se seleccionaron documentos específicos para su correcta referenciación en el documento que debe proyectar los conocimientos adquiridos para la investigación. Una vez obtenidas las suficientes referencias, se iniciaría con la elaboración del marco teórico y el estado del arte, donde se encuentra la mayor cantidad de referencias del documento. Partiendo de estos se redactó el resto del documento, como se puede observar en el diagrama 3.



Diagrama 3. Diagrama de flujo elaboración de documento. Autoría propia.

6.4 DESARROLLO DEL ALGORITMO DE LOS MOVIMIENTOS DEL BRAZO

El brazo robótico necesita de un algoritmo de programación para que pueda realizar los movimientos necesarios para la recolección de los datos (el SUDOKU) y la escritura de los números. Para esto primero se realizó un modelamiento matemático con base en movimientos angulares, ya que los mecanismos de movimiento del brazo son realizados por servo motores, los cuales tienen un movimiento angular en dos ejes. Una vez finalizados los cálculos matemáticos, se procedió a la programación en Arduino para la escritura de los números, el método completo por pasos se puede observar en el diagrama 5.

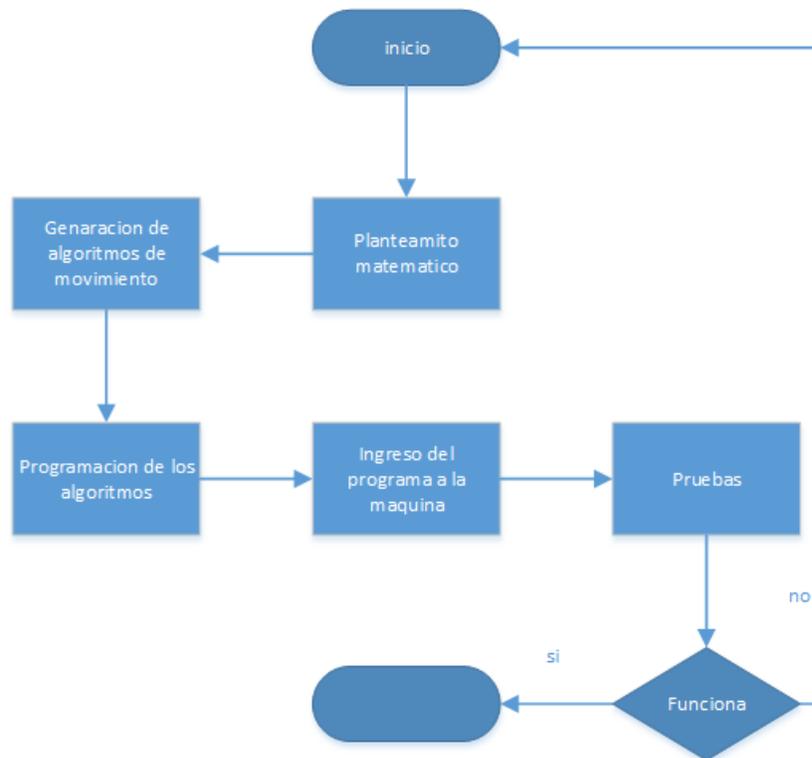


Diagrama 4. Diagrama de flujo algoritmo de movimiento. Autoría propia.

7 DESARROLLO

El proyecto tubo un desarrollo arduo y gracias a las metodologías propuestas en el enciso anterior, se pudo progresar adecuadamente en la mayoría de los puntos clave en la elaboración del proyecto.

Partiendo de un inicio el proyecto comenzó con la idea de realizar un trabajo basado en la robótica que pudiera realizar tareas complejas por medio de algoritmos de aprendizaje, un brazo robótico que solucionara SUDOKUS que estuvieran en un formato físico. Para este proyecto se tenía la idea de realizar un diseño propio y una programación elaborada por los mismos estudiantes.

Por la dificultad del proyecto apareció una metodología que no se había planteado, haciendo pruebas de cada uno de los puntos de la investigación, iban apareciendo errores, los cuales se les proporciona una solución parcial, la cual algunas veces arrojaba más errores de los que corregía.

7.1 DISEÑO DEL BRAZO

El diseño del brazo está fundamentado en la idea de que los movimientos de brazo son de categoría básica, con uso de movimientos rotacionales únicamente por cada uno de los ejes de este.

Para esto se tomaron como ejemplo diferentes tipos de brazos, tanto mecánicos como robóticos y así seleccionar que partes y mecanismos podíamos implementar en nuestro proyecto y cuales no eran necesarios para su correcto funcionamiento; tomando en cuenta las dificultades que puede generar un mal diseño a la hora de realizar el programa encargado de controlar los movimientos del brazo, se optó por crear un diseño lo suficientemente básico para el cumplimiento de la tarea, así la programación de los movimientos no tendría que tener una gran complejidad. Algunos de los brazos en los cuales se basó el prototipo del brazo son los mostrados en las imágenes 3, 4 y 5.



Imagen 3. El manipulador Adept 6 tiene seis articulaciones giratorias y es popular en muchas aplicaciones. Autoría de Adept Technology, Inc. [8]

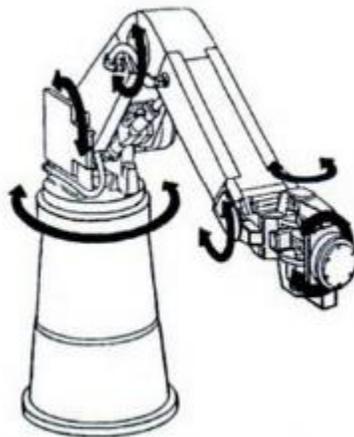


Imagen 4, manipulador con configuración angular y muñeca con tres grados de libertad. Autoría Anibal Ollero, Robótica: manipuladores y robots. [6]

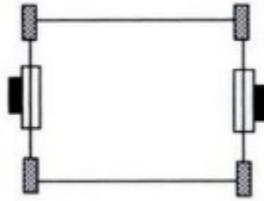


Imagen 5. Locomoción con direccionamiento diferencial en dos ruedas laterales. El sistema emplea cuatro ruedas de castor no actuadas para soporte de la máquina. Autoría Anibal Ollero, Robótica: manipuladores y robots. [6]

Una de las partes a diseñar, fue la base para el intermediario entre el ambiente y la máquina, el cual tuvo gran inspiración en formas y herramientas como el carro de locomoción (imagen 5) Donde se tenía que tener en cuenta los mecanismos de movimiento y estabilidad para un soporte del sensor, en este caso, una cámara; el cual debía obtener una lectura del SUDOKU y enviar los datos al robot para ser interpretados.

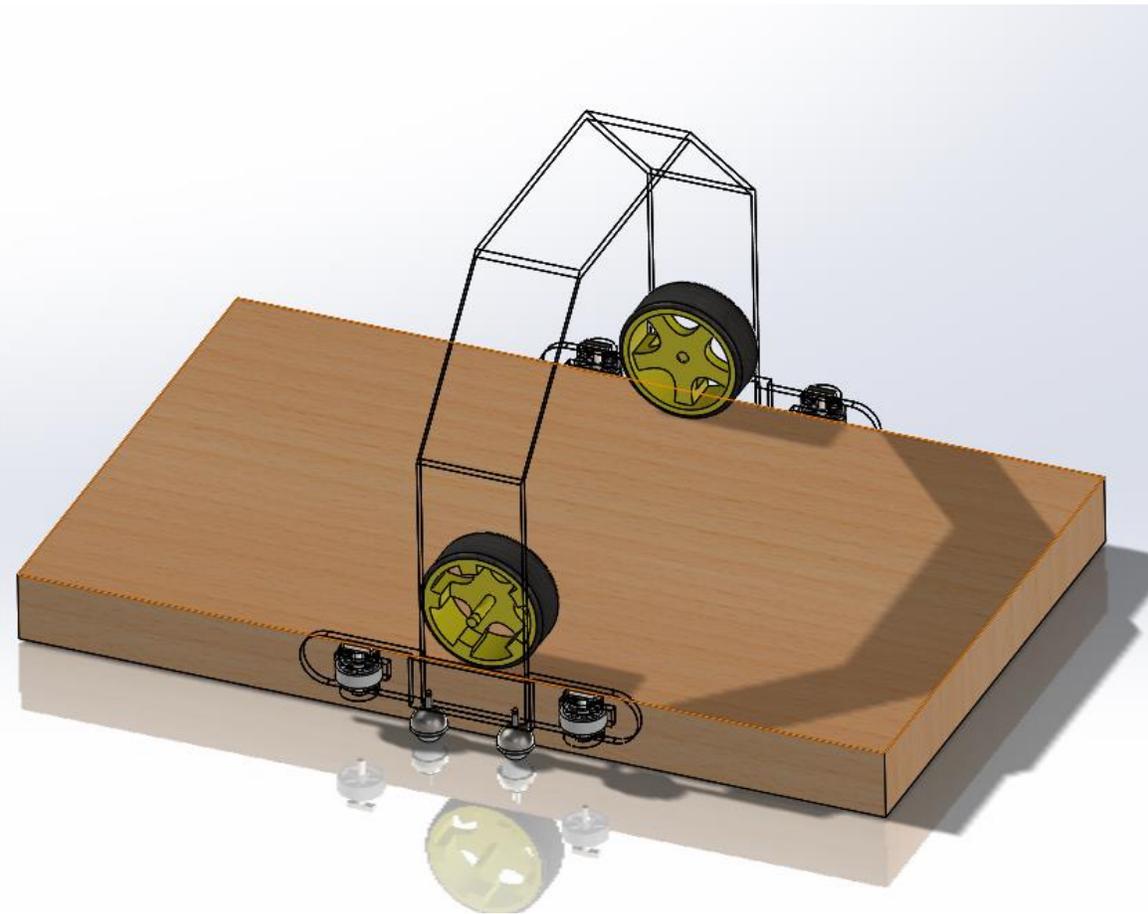


Imagen 6. Base de la cámara. Autoría propia.

Para ello, se debía tener en consideración el peso generado por el sensor y como distribuirlo de manera adecuada, así evitar fisuras o fracturas de esta.

Partiendo de esta premisa, se calculó los vectores de fuerza que iban a generar acción en el soporte, tomando el peso de la cámara y multiplicándolo por la constante gravitacional, obtendremos la fuerza que ejercería el sensor a la base. [20]

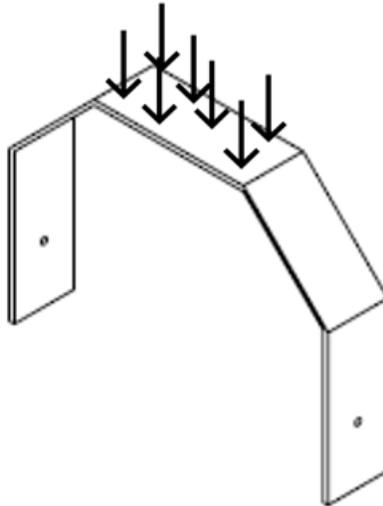


Imagen 7, base cámara con vector peso. Autoría propia.

Para esto se optó por una forma hexagonal de la base, por el cual la fuerza ejercida se distribuyera en forma de arco por diferentes puntos de esta, generando cuatro puntos vitales, donde se presenta el mayor estrés a razón del peso.

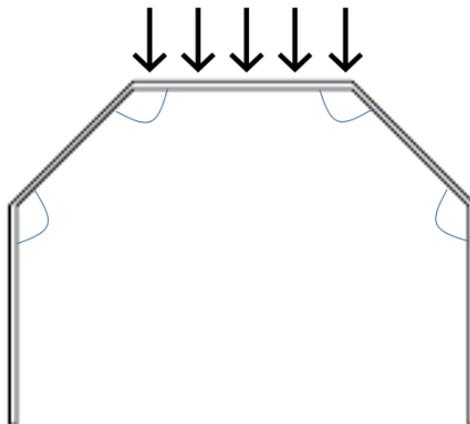


Imagen 8, base cámara con vectores de peso y puntos de distribución. Autoría propia

Adicional a esto, se realizó el estudio vectorial del movimiento de la base, ya que se optó porque el soporte sea completamente móvil y así no interferiría o colisionaría con el brazo al momento de que este ejecute su tarea.

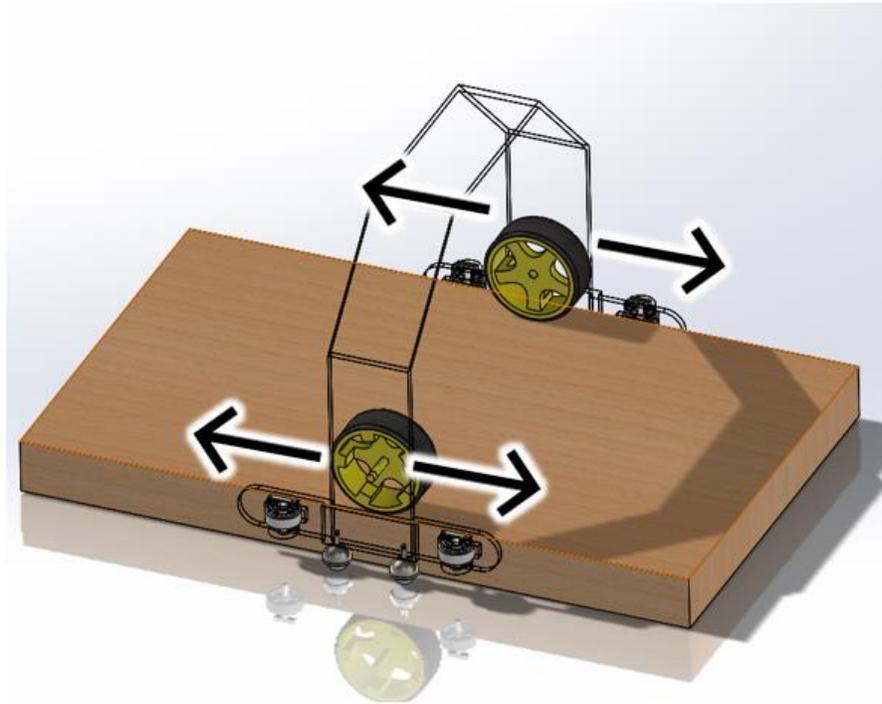


Imagen 9. Base cámara con vectores de movimiento. Autoría propia.

Para ello se debía realizar una planificación de ruta y trayectoria, donde se vieran involucrados la velocidad y dirección del movimiento de la base, sin embargo, es necesario comprobar si en la trayectoria generada se presentaba algún tipo de colisión. Haciendo uso de mecanismos físicos, se podía restringir la trayectoria del soporte, como lo son un sistema de ruedas al costado de la base.

Además del uso de diseños ya establecidos, se izó uso de tres ejes de movimiento del brazo, basándonos en la biomecánica de un brazo humano, proporcionando así una visualización de puntos de rotación ya definidos, entregando un factor de movilidad ya conocida. Tomando el plano cartesiano se puede observar en la imagen 10, en un factor bidimensional se obtendría un sistema de dos grados de libertad, los cuales se pueden plasmar en el diseño del brazo.

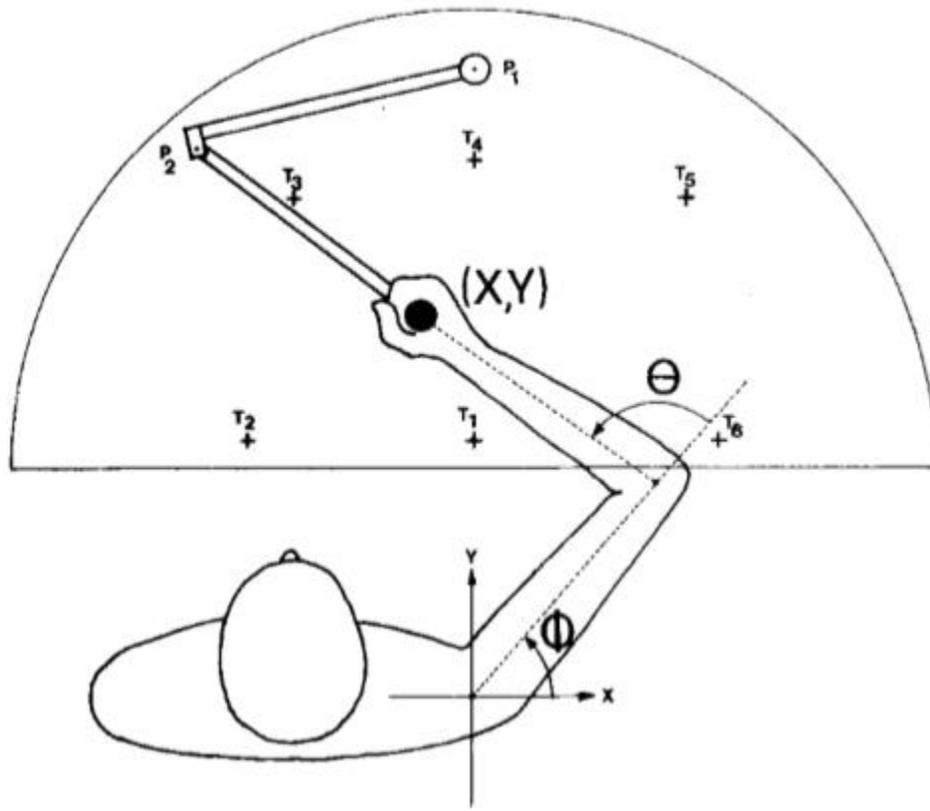


Imagen 10. Autoría de P. morasso, Istituto di Elettrotecnica Università di Genova

Con los mecanismos seleccionados y la idea plasmada, se inició con el diseño del brazo con el uso del programa SolidWorks, proporcionado por la institución, se comenzó a elaborar pieza por pieza el brazo a prototipar.

SolidWorks es una herramienta de diseño tipo CAD (diseño asistido por computadora) donde se pueden realizar piezas en 3D, ensamblajes y planos en 2D. cada una de las piezas del diseño tiene un modelado en tercera dimensión, además de un plano adherido a este donde se encuentran las cotas con sus respectivas medidas de cada uno de los lados de la pieza. El modelo y ensamblaje del brazo muestran los movimientos y los ejes de rotación que están previamente concebidos bajo las directrices del proyecto [27]. Una ventaja que permitió obtenerse por la herramienta digital SolidWorks es el estudio de movimientos y el desarrollo del ensamblaje del prototipo dando como resultado una manufactura considerablemente más precisa; adicionalmente se puede saber la resistencia del ensamblaje respecto al entorno, además de saber el grado de movimiento permisible por los ejes, sin llegar a colisionar las piezas que se vean involucrados [24]; estos estudios derivaron en la facilidad de cálculos para la elaboración del algoritmo que se encargara del control de la máquina.

Durante la elaboración de las piezas, empezaron a salir algunos errores de diseño, por los cuales se procedió a hacer cambios de diseño en las piezas, pero no todos corregían el error y algunos arrojaban más errores que los que solucionaban, lo que conllevó a un cambio completo de diseño varias veces.

7.2 DESARROLLO DEL ALGORITMO DE LOS MOVIMIENTOS DEL BRAZO

Para los movimientos del brazo, primero se comenzó a realizar modelos matemáticos del diseño del brazo, se comenzó a calcular los ángulos de movimiento además de los grados de libertad. Para el cálculo de la posición final del manipulador, se establece un sistema de coordenadas, previamente definidas, donde podemos ubicar cualquier punto en un espacio tridimensional, con el uso de vectores posicionales los que pueden verse claramente definidos con el uso de matrices, para la correcta explicación de esto toda mención de los vectores será identificada con un subíndice en la parte superior izquierda, el cual indicara el sistema de coordenadas al que hace referencia, una letra que indicara el nombre del punto que se va a trabajar sobre las distancias del eje [8]. La ecuación 6.1 ejemplifica un sistema de coordenadas llamado {A} con tres vectores unitarios mutuamente ortogonales con puntas solidas; el punto ${}^A P$ se define como un vector y se define igualmente como una posición en el espacio, o bien como un conjunto ordenado con los subíndices A, B y C.

$${}^A P = \begin{Bmatrix} P_A \\ P_B \\ P_C \end{Bmatrix}$$

Ecuación 6.1. Ejemplo de sistema de coordenadas

Con un punto en el espacio no es suficiente para la descripción completa de los movimientos del brazo, es necesario describir también la orientación del cuerpo en el espacio, es decir, suponiendo que el punto ${}^A P$ se encuentra en el extremo del manipulador, la ubicación completa del brazo no está especificada, para ello es vital proporcionar también su orientación, para ejemplificar esto se hará uso de la figura 2 que muestra claramente el vector de orientación del punto ${}^A P$ en el espacio X, Y y Z; los cuales representan los ejes en el espacio.

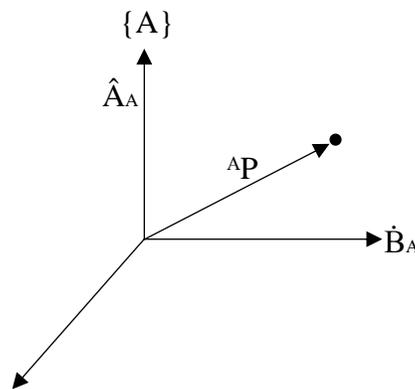


Figura 2. Vector ejemplo punto ${}^A P$, autoría propia

Cuando se tiene más de un solo vector, se utiliza lo que se denomina trama, la cual se define como una nueva sección del espacio, donde interactúa un vector adicional; estas tramas se proponen como cada uno de los ejes de la máquina, representar gráficamente los puntos,

vectores y ejes, en el cual va a ser interpretado el brazo se disponen la imagen 11 y 12, donde se muestran claramente.

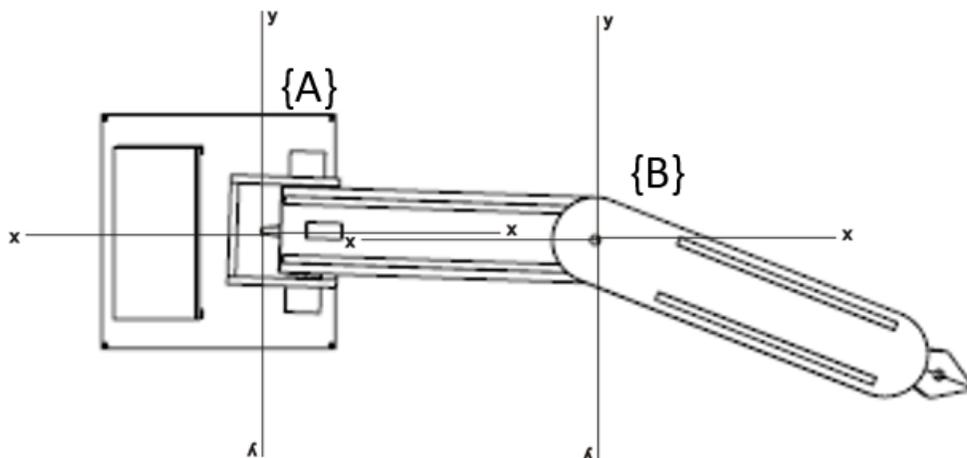


Imagen 11, brazo robótico con tramas 2D. Autoría propia.

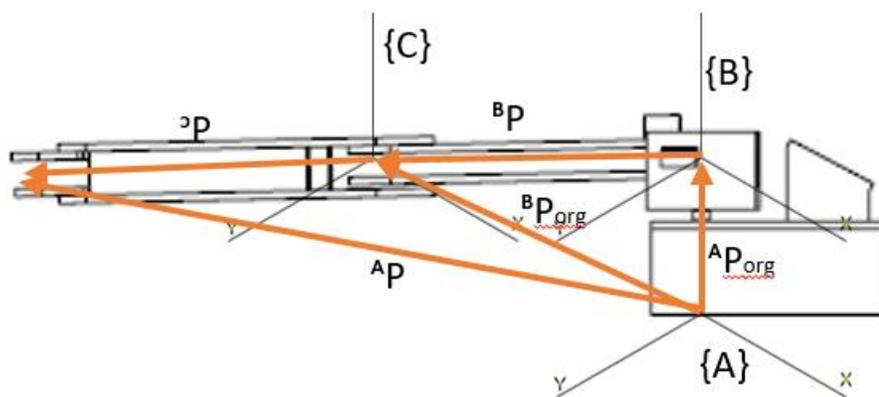


Imagen 12, brazo robótico con tramas y vectores. Autoría propia.

Para métodos prácticos, luego de decidir la posición de las tramas y vectores frente al dibujo del brazo, solamente se dejarán las tramas, vectores y ángulos de aquí en adelante, según muestra la imagen 13.

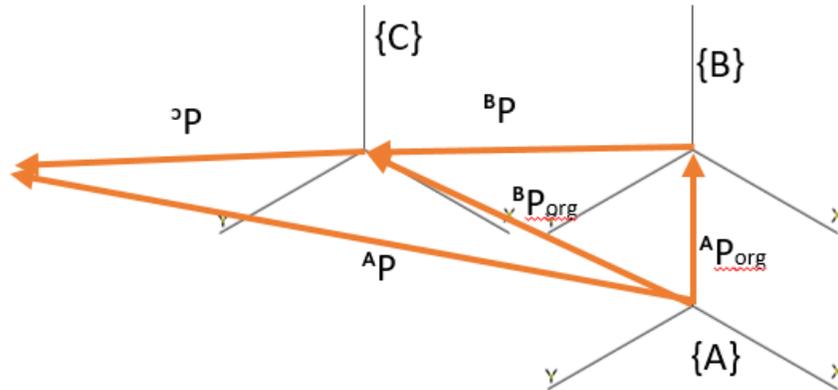


Imagen 13. Tramas y vectores del brazo. Autoría propia

Para la obtención de la orientación de cada punto, es necesario adjuntar un sistema de coordenadas. Para describir el sistema de coordenadas, en el cual hay una translación de trama, la que se define por un traslado de una trama por actuación de un vector, es necesario denotar los vectores unitarios proporcionando las direcciones del sistema de coordenadas de la trama {B} en términos del sistema de coordenadas de la trama {A}, denominándolos ${}^A\hat{X}_B$, ${}^A\hat{Y}_B$ y ${}^A\hat{Z}_B$, si los convertimos en columnas de una matriz 3 x 3 la podremos denominar como una matriz de rotación, nombrando a esta matriz ${}^A_B R$, ya que la matriz define la rotación específica de la trama {B} con respecto a la trama {A}, como se puede ver en la ecuación 6.2.

$${}^A_B R = [{}^A\hat{X}_B \quad {}^A\hat{Y}_B \quad {}^A\hat{Z}_B] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Ecuación 6.2

Donde r corresponde a la rotación en el eje correspondiente, el primer subíndice pertenece a la trama base, en este caso la trama {A}, y el segundo subíndice a la trama afectada, trama {B}.

Utilizando las asignaciones de tramas [8], podemos definir un vector punto donde interactúan dos o más tramas, como en la figura 4, los componentes de ${}^A P$ pueden calcularse de la forma en que muestra la ecuación 6.3.

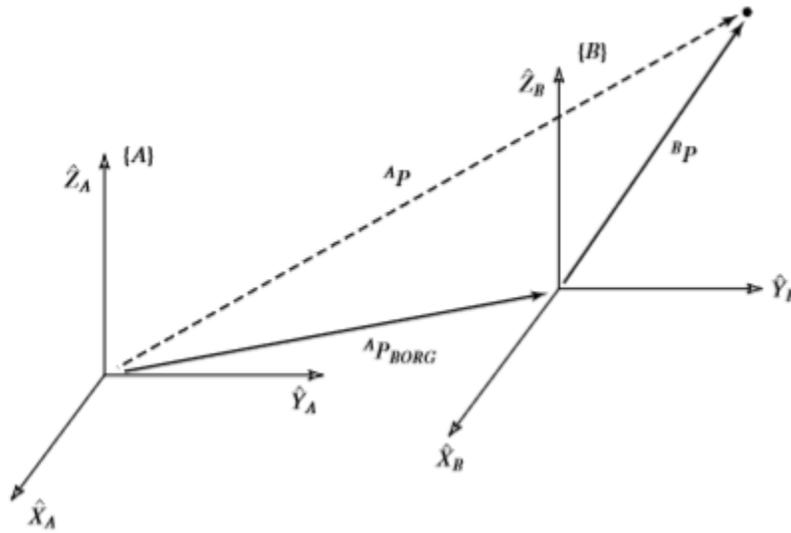


Figura 2. Asignación de traslación. John J. Craig, Robotica [8]

$$\begin{aligned}
 {}^A P_x &= {}^A \hat{X}_B \cdot {}^B P \\
 {}^A P_y &= {}^A \hat{Y}_B \cdot {}^B P \\
 {}^A P_z &= {}^A \hat{Z}_B \cdot {}^B P
 \end{aligned}$$

Ecuación 6.3

Reduciendo la ecuación en términos de una multiplicación de matrices rotacionales, se obtiene:

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P$$

Ecuación 6.4

La ecuación 6.4 implementa una modificación a la descripción del punto ${}^B P$ expresado de forma relativa al punto ${}^A P$, es decir, redefine el punto en el espacio {B}.

Si pensamos en un mecanismo para asignar una trama a otra como un operador adicional en forma de matriz. Esta asignación nos ayudara a escribir operaciones más compactas [8].

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{ORG}$$

Ecuación 6.5

Donde ${}^A P_{ORG}$ representa el vector origen de la trama {B}, el cual es el mismo vector punto de la trama {A}, que indica donde se encuentra la trama {B} en el espacio.

Gracias a esta ecuación, podemos representar de forma general el sistema de ecuaciones del brazo (figura 2), utilizando la ecuación 6.3, asignándoles los ángulos α , β y γ a los ejes de cada una de las matrices. Suponiendo una rotación de la trama del Angulo α sobre el eje \hat{X} , otorgándole al vector punto ${}^B P$ las coordenadas {0,2,4}.

$${}^A P = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\text{sen } \alpha & 0 \\ \text{sen } \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} + {}^A P_{ORG}$$

Ecuación 6.6

Representando las ecuaciones 6.5 y 6.6 en el proyecto, buscando tener las ecuaciones que definen el movimiento completo del brazo. Definiendo las siguientes ecuaciones se puede implementar el movimiento que se quiere realizar, en forma de código de programación, tomando en cuenta la figura 2 obtenemos las siguientes ecuaciones:

$${}^B P_{ORG} = {}^A R {}^B P + {}^A P_{ORG}$$

Ecuación 6.7

$${}^A P = {}^B R {}^C P + {}^B P_{ORG}$$

Ecuación 6.8

Haciendo uso de estas ecuaciones, es más sencillo controlar los movimientos de la máquina, pero aún existe algo por resolver. La razón de la máquina es solucionar un SUDOKU de forma autónoma, para esto y con la aplicación de las ecuaciones 6.7 y 6.8 definimos los ángulos en que debe moverse cada eje, ya que cada número, tiene una función adherida al mismo; usamos la función de cada una de las líneas para su correcta impresión, y esa función es la que implementamos en las ecuaciones de movimientos del brazo, ya que estas funciones de los números, pueden ser representadas como una combinación de vectores y manejar cada número como una suma de vectores en el espacio donde \hat{Z} es igual a cero [25].

Una vez estipulados los ángulos a mover en cada uno de los ejes del brazo, con el uso de la tarjeta de adquisición de datos Arduino, se programan los servomotores con cada uno de los ángulos respectivos, gracias a las librerías de control que ya vienen implementadas con el programa de Arduino, ayudan a una mayor facilidad en la realización del algoritmo, implicando un menor tiempo en la creación del algoritmo [19].

8 RESULTADOS

Una vez finalizado el proyecto, se entendió la dificultad de implementar un sistema de redes neuronales a un robot, lastimosamente no se logró el cumplimiento de todos los objetivos del proyecto, aunque si una gran parte de estos.

Principalmente, se logró la elaboración de un prototipo, el cual únicamente puede escribir teóricamente algunos números de forma física.

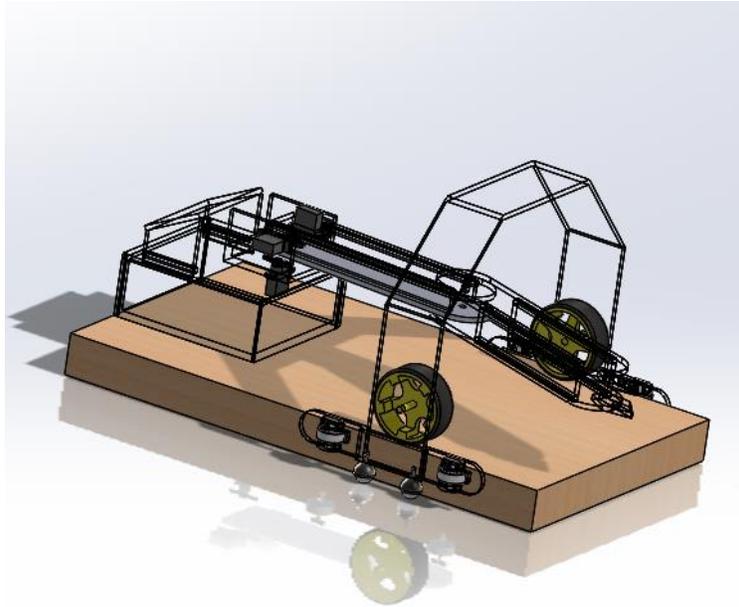


Imagen 14. Diseño del prototipo final en SolidWorks. Autoría propia.

Se finalizó con un diseño estructural básico, con base en laminado de acrílico, se eligió este material gracias a su maleabilidad y facilidad de manejo a la hora de realizar modificaciones en su estructura, además de su bajo costo con relación a su densidad, los procesos y herramientas para la edición y modificación de su forma. Se escogió realizarlo en láminas de acrílico, por su facilidad de montaje, armado y reparación. Se había pensado en un principio realizar el prototipo en aluminio, pero a falta de herramientas y de componentes económicos, se descartó esta idea.

Por términos de tiempo, no se obtuvo la elaboración de las redes neuronales, convirtiéndose en uno de los prospectos a continuar con tesis o proyectos posteriores.

La mayor parte de los problemas en la realización del proyecto fue la dificultad para encontrar una relación óptima entre la densidad del material, su diseño y ejecución. Por dificultades a la hora de lograr una correcta movilidad por parte del brazo y generar una armonía entre el brazo y la base del intérprete del ambiente.

8.1 FUTURO DEL PROYECTO

Como se mencionó anteriormente, el proyecto aún tiene mucho potencial por desarrollarse, uno de los puntos a elaborar, es la red neuronal y el algoritmo de solución, ya que estos por términos de tiempo no pudieron estar en la fase final del proyecto.

Otro de los aspectos de los cuales se puede partir en tesis futuras, es la optimización o una mejora del diseño establecido en este proyecto. Puede ser empezado un nuevo brazo a partir de este, para trabajos complejos diferentes.

Además de esto, el proyecto tiene una tendencia a evolucionar en la solución de otro tipo de soluciones de problemas específicos, ya sea que se pueda transformar el problema principal,

en construir un brazo que facilite o realice soldadura, caminos de soldadura en baquetas, manufactura de precisión, o un asistente para ensamblaje, haciendo uso de aprendizaje autónomo de la máquina para una evolución constante del proceso en sí.

8.2 CONCLUSIONES

Al final de la elaboración del proyecto se pudo identificar ciertos factores que interrumpieron el flujo constante de desarrollo del primer prototipo, como lo fue el factor tiempo, debido a dificultades o situaciones externas a la elaboración de este, el proyecto se quedó muy corto para el largo alcance que este puede tener. Un punto clave a la hora de ver en que influyó el factor tiempo, fue la elaboración de una de las piezas fundamentales del diseño: el soporte para la cámara; este no pudo ser montado gracias a la falla provista por el tiempo, por lo que las piezas fueron cortadas y manufacturadas en uno de los laboratorios de la universidad, se estaba a la merced de la disponibilidad de cortadora laser, la cual, en los últimos días de ensamblaje no poseía disponibilidad alguna para el corte de las piezas necesarias para este elemento del proyecto.

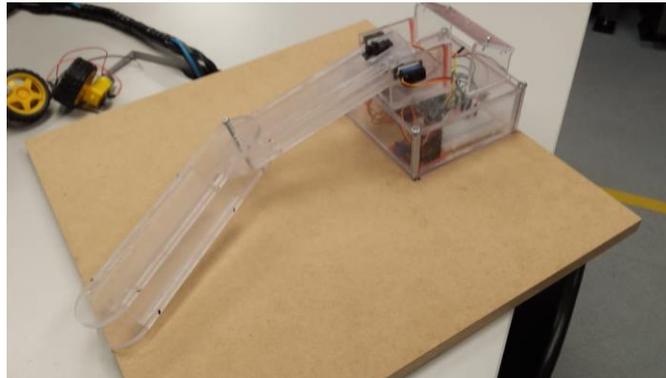


Imagen 15. Imagen del primer prototipo montado. Autoría propia.

En primera instancia, se esperaba que el prototipo fuera completamente funcional, pero un error de cálculo con respecto al peso de los materiales escogidos en la elaboración del brazo, terminó por influir negativamente en el correcto funcionamiento de este, ya que los servos motores escogidos para el movimiento del brazo, no tenían la suficiente fuerza mecánica para mover el robot de forma continua, generando una sobrecarga en estos y una posible falla en los motores.

Aunque los algoritmos de movimiento del brazo están correctamente modelados, la programación de dichos algoritmos no tiene las pruebas suficientes para dar una aprobación de estas, debido a los errores previamente descritos.

Pese a que el primer prototipo tiene una serie de fallas visibles, se logró un diseño adecuado, y un punto de partida bastante claro para futuros proyectos. Donde se puede observar claramente que la mayoría de los objetivos se cumplieron satisfactoriamente; al entender que un proyecto de esta magnitud necesitaría más tiempo y recursos, tanto económicos como de personal, se logró satisfactoriamente los puntos propuestos para esta fase del proyecto, al ser una fase de estudio y aproximación a un primer diseño.

9 AGRADECIMIENTOS

A la institución universitaria Politecnico Grancolombiano, la facultad de ingeniería y ciencias básicas, a todo el grupo docente de la institución, a los profesores Gabriel Mauricio Yañes y Alvaro Hilarion por sus aportes y apoyo constante en la elaboración de este proyecto.

A mi familia y amigos, los que siempre me apoyaron y estuvieron conmigo en este arduo proceso académico, en especial a Paula Andrea Díaz Pinzón, Laura Cristina Tapias y Cristian Alejandro Wilches, por sus aportes y ayuda en la elaboración de la tesis.

A los integrantes del laboratorio de diseño industrial de la institución, por su colaboración y prestamos de herramientas, para la elaboración del prototipo.

10 BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Bicchi, G. T. (2004). Fast and "soft-arm" tactics [robot arm design]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 22-33.
- [2] Angeles, J. (2007). Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. montreal: Springer.
- [3] Anonimo. (1994). Machine Learning, Neural and Statistical Classification. D. michie.
- [4] Aviles, D. O. (s.f.). ROBOTICA. Sin Publicar.
- [5] Baturone, A. O. (2001). Robótica: manipuladores y robots móviles. Barcelona: MARCOMBO.
- [6] Baturone, A. O. (2001). Robótica: manipuladores y robots móviles. Barcelona: marcombo.
- [7] Chappell, P. H. (2016). Mechatronic Hands Prosthetic and Robotic Design. London: The Institution of Engineering and Technology.
- [8] Craig, J. J. (2006). Robótica. PEARSON.
- [9] Dikai Liu, L. W. (2009). Design and Control of Intelligent Robotic Systems. Springer.
- [10] F. Gomez-Bravo, F. C. (2017). PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS EN ROBOTS MÓVILES BASADA EN TÉCNICAS DE CONTROL DE SISTEMAS NO HOLÓNOMOS. Depto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 1-8.
- [11] F.R.Eng., C. M. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning. Springer.
- [12] G. Beni, J. W. (2002). Theoretical problems for the realization of distributed robotic systems. Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1-2.
- [13] Greg Broten, S. M. (2006). Software Systems for Robotics An Applied Research Perspective. International Journal of Advanced Robotic Systems, 1.
- [14] Greg Broten, S. M. (2006). Software Systems for Robotics An Applied Research Perspective. International Journal of Advanced Robotic Systems, 1.
- [15] José Manuel Molina López, V. M. (1996). ROBOTS AUTONOMOS: ARQUITECTURAS y CONTROL. Buran, 19-24.
- [16] L.L. Whitcomb, A. R. (2002). Comparative experiments with a new adaptive controller for robot arms. Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1-2.
- [17] Morasso, P. (1981). Spatial Control of Arm Movements. Exp Brain Res, 223-227.
- [18] Nilsson, N. J. (1996). Introduction to Machine Learning. Stanford.
- [19] Noble, J. (2009). Programming Interactivity. O'Reilly.
- [20] Raymond A. Serway, J. W. (2007). Fisica Para Ciencias E Ingenieria. Cengage Learning.
- [21] Raymond A. Serway, J. W. (2015). Fisica. Electricidad Y Magnetismo. Cengage Learning.
- [22] REYES, F. (2011). Robótica - control de robots manipuladores. Ciudad de Mexico: Alfaomega.

- [23] S. A.GINZBURG, I. (1966). FUNDAMENTALS OF AUTOMATION AND REMOTE CONTROL . London: PERGAMON PRESS .
- [24] Shahin S. Nudehi, P. J. (2017). Analysis of Machiine Elements Using SOLIDWORKS Simulation 2017. SDC.
- [25] Stewart, J. (2008). Calculo de varias variables. Cengage Learning.
- [26] THIELSCHER, M. (2005). Reasoning Robots. Springer.
- [27] William E. Howard, J. C. (2017). IntroductIon to SolidModeling usingSolIdWorkS® 2017. Nueva York: McGraw-Hill.
- [28] Yoshihiko Nakamura, K. N. (1989). Dynamics and Stability in Coordination of Multiple Robotic Mechanisms. The International Journal of Robotics Research, 44-61.
- [29] E. Aldabas-Rubira, Introducción al reconocimiento de patrones, Barcelona, p. 3
- [30] C. S. C. Bonifacio Martín del Brío, «Fundamentos de las redes neuronales,» Fundamentos de las redes neuronales, p. 23, 1995.
- [31] A. C. V. A. M. H. Hugo Vega Huerta, «Reconocimiento de patrones mediante redes,» Universidad Nacional Mayor de San Marcos, FIS, p. 10, 2009
- [32] V. M. J:R: Hilera Gonzales, «Redes neuronales artificiales:fundamentos, modelos y aplicaciones,» Madrid: Addison-Wesley Iberoamericana, p. 305, 1995