

**GUIDED AND COLLABORATIVE CINEMATIC CONTROL SYSTEM WITH  
USE OF ARTIFICIAL VISION FOR TRAINING LEARNING PURPOSES OF  
HIGHER EXTREMITIES FOR TECNOACADEMIA CÚCUTA FROM SENA  
NDS**

**SISTEMA DE CONTROL CINEMÁTICO GUIADO Y COLABORATIVO CON  
USO DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA FINES DE APRENDIZAJE DE  
TRAYECTORIAS DE LAS EXTREMIDADES SUPERIORES EN  
TECNOACADEMIA CÚCUTA DEL SENA NDS**

**(C) Ing. Mauro Leandro Ibarra Peñaranda\*, (C) Ing. Leider Aldair Sepúlveda\*,  
MSc. Oscar Manuel Duque Suarez\*\*\*, MSc. Andres Mauricio Puentes Velasquez\*\***

**\*Universidad de Pamplona**, Facultad de ingenierías y arquitectura, Programa de  
ingeniería mecatrónica.

Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
(57+7) 5685303 – 568530.

E-mail: [ing.mauroibarra@gmail.com](mailto:ing.mauroibarra@gmail.com), [lei13der301@gmail.com](mailto:lei13der301@gmail.com), [omduke@hotmail.com](mailto:omduke@hotmail.com).

**\*\* SENA**, SENNOVA, Tecnoacademia Cúcuta, Cúcuta, Regional Norte de Santander,  
CEDRUM, (57+7) 57 7 578 3286.

E-mail: [oduques@sena.edu.co](mailto:oduques@sena.edu.co), [apuentesv@sena.edu.co](mailto:apuentesv@sena.edu.co).

**Abstract:** In this project, the morphology of the human arm is studied in order to build a robot based on the design criteria necessary to establish the morphology that best adapts to the movements of the upper extremities of said human being, for this it is necessary to study the different ways of calculating the kinematic model of the robot, and thus being able to calculate the kinematic control that establishes the relationship between the speeds of the joints. The product of this work is to develop collaborative and guided kinematic control through perception and learning of trajectories obtained by artificial vision of those of the upper extremities of the human being. Guided kinematic control methods will be studied primarily and guided kinematic control will be obtained using the design criteria.

**Keywords:** Morphology, manipulator, kinematic, guided, collaborative

**Resumen:** En este proyecto se estudia la morfología del brazo humano con la finalidad de construir un robot a partir de los criterios de diseño necesarios para establecer la morfología que mejor se adapte a los movimientos de las extremidades superiores de dicho ser humano, para esto es necesario estudiar las diferentes formas de calcular el modelo cinemático del robot, y así poder calcular el control cinemático que establece la relación entre las velocidades de las articulaciones. El producto de este trabajo es desarrollar el control cinemático guiado y colaborativo mediante percepción y aprendizaje de trayectorias obtenidas por visión artificial de los de las extremidades superiores del ser humano. primordialmente se estudiará los métodos de control cinemático guiado y por medio de los criterios de diseño se obtendrá el control cinemático guiado.

**Palabras clave:** Morfología, manipulador, cinemático, guiado, colaborativo.

## 1. INTRODUCCION

En la Industria 4.0, el objetivo de sistemas ciberfísicos (CPS) es proporcionar recursos para permitir la integración de lo físico con el mundo virtual (Lins, Augusto, & Oliveira, 2020). El viaje hacia la Industria 4.0 y la creciente implementación de Sistemas Ciber Físicos están evocando cambios en el trabajo humano y la organización del trabajo, creando así nuevos niveles de interacciones socio-técnicas entre humanos, máquinas, materiales y objetos. Estos nuevos niveles de interacción socio-técnica entre

el espacio físico y cibernético incluyen interdependencias complejas entre las instalaciones de organización, producción y control, que introducen varios cambios técnicos, organizativos y relacionados con los humanos (Kadir, Broberg, & Conceição, 2019). Las nuevas tendencias de la automatización bajo la filosofía de la industria 4.0 busca crear sistemas ciberfísicos en los cuales existan entre las líneas productivas y dentro de las tareas que se puedan programar sistemas de manipuladores que puedan trabajar de manera coordinada con el humano y que puedan ejecutar trayectorias cada vez más

complejas así como las hace el humano, pero para que un manipulador pueda realizar esas trayectorias, la imitación suele ser muy compleja, donde una de las mejores formas de lograrlo es hacer control cinemático por guiado, ya que en el control cinemático por guiado el manipulador puede seguir diáfano la trayectoria que hace el humano.

## **2. LA ROBOTICA, EL CONTROL CINEMATICO, LA ROBOTICA COLABORATIVA, LA ROBOTICA GUIADA Y LA VISION ARTIFICIAL**

### *2.1 La robótica*

La robótica es el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos aplicado a la automatización de mecanismos articulados (Turja, Aaltonen, Taipale, & Oksanen, 2019). Un manipulador es un robot con varios grados de libertad capaz de trasladar y rotar objetos o herramientas en un volumen de trabajo dándole una posición a esa pieza dada su trayectoria variable que depende de una acción programada para realizar diversas tareas.

### *2.2 El control cinemático*

El objetivo del control cinemático es establecer las trayectorias que debe seguir cada articulación del robot a lo largo del tiempo para conseguir una trayectoria específica con unos requisitos temporales.

### *2.3 La robótica colaborativa*

Un robot colaborativo, es un robot capaz de trabajar en concordancia con otros robots y también con el ser humano (Goldberg, 2019). Ken Goldberg reflexiona sobre cómo cuatro excitantes subcampos de la robótica (co-robótica, interacción humano-robot, aprendizaje profundo y robótica en la nube) aceleran una tendencia renovada hacia los robots que trabajan de manera segura y constructiva con los humanos (Schou, Andersen, Chrysostomou, Bøgh, & Madsen, 2018). Los robots verdaderamente colaborativos involucran directamente al trabajador humano para que colabore en la resolución de una tarea industrial en equipo (Realvásquez-Vargas, Cecilia Arredondo-Soto, Luis García-Alcaraz, Yail Márquez-Lobato, & Cruz-García, 2019).

la robótica colaborativa actualmente está creando muchas aplicaciones, una de sus ramas se enfoca en sistemas de salud, tal es el ejemplo de robots colaborativos afectivos interconectados hacia un asistente de salud autónomo (Fang et al., 2019). Los robots colaborativos actualmente se emplean ampliamente en la industria de manufactura, por

ejemplo el diseño y control colaborativo de TIREBOT (Levratti, Riggio, Fantuzzi, De Vuono, & Secchi, 2019), un asistente robótico que ayuda a los operadores de talleres de neumáticos en el proceso de reemplazo de ruedas. Por otro lado, tenemos a AURA (Francesco & Paolo, 2017), es el primer robot colaborativo de alta carga jamás diseñado, se basa en la comunicación redundante entre una combinación de sensores colocados en la superficie externa, capaces de detectar la proximidad humana. Otra rama importante es la aplicación de estos robots en la agricultura (Vasconez, Kantor, & Auat Cheein, 2019), centrándose en mejorar la mano de obra, la agilidad, la eficiencia y la seguridad de los cultivos.

Jhon Oyekan en su artículo (Oyekan et al., 2019), resalta la importancia del peligro principal de la robótica colaborativa, que son las velocidades altas y las fuerzas masivas generadas por estos robots en la industria. Por eso se enfoca en el desarrollo de estrategias efectivas de entornos virtuales, como es el caso de (Rosenstrauch, Pannen, & Krüger, 2018). Otro tipo de comunicación implementado en este tema es la comunicación impulsada por ondas cerebrales (Mohammed & Wang, 2018). El trabajo colaborativo en esta investigación está ligado al hecho de que el aprendizaje guiado en los manipuladores.

### *2.4 La robótica guiada*

Para Massa Daniele (Massa, Callegari, & Cristalli, 2015) la necesidad de una programación fácil está aumentando, mientras que la robustez y la seguridad siguen siendo aspectos fundamentales. Para Eric Guiffo (Guiffo Kaigom & Roßmann, 2017) los robots manipuladores son impulsores clave para la productividad, la mejora de la calidad y la reducción de costos en la fabricación.

No solo el dinamismo de los procesos de producción de lotes pequeños es uno de los problemas por los cuales surge la necesidad de la robótica guiada, otra razón muy importante es la que expone Sebastián Wrede en su investigación sobre la enseñanza cinestésica de robots redundantes en el espacio de tareas y configuración (Wrede et al., 2013), quien sustenta que la reciente aparición de robots compatibles y cinemáticamente redundantes plantea nuevos desafíos de investigación para la interacción humano-robot.

Otra razón del porque la robótica guiada, es la vista desde el punto de vista educativo, donde en general, los programas abiertos son de carácter exploratorio, ya que permiten crear situaciones de

aprendizaje en las que el alumno tiene un mayor protagonismo, puede seleccionar información, elaborar sus propios proyectos, etc. (Odorico, 2004). Se tienen algunas investigaciones como la de Joaquim Batlle (Batlle, Font, & Escoda, 2004), quien basa su ley de guiado en la formulación del error, para él el guiado o seguimiento de trayectorias es un tema clave en la navegación de robots móviles. Ramírez Omar, investiga sobre el guiado kinestésico, según él existen trabajos de investigación orientados a la asistencia médica y neurorrehabilitación con dispositivos robóticos, empleados en pacientes con movimiento involuntario en miembro superior como consecuencia de una lesión neurológica. En su artículo (Omar Arturo, Alejandro, Vicente, Francisco, & Gabriel, 2011) presenta un principio de neurorrehabilitación en miembro superior para pacientes con movimiento involuntario basado en entrenamiento háptico, bajo el esquema de guiado kinestésico local empleando una plataforma robótica experimental.

Otro trabajo de guiado kinestésico es el presentado en el 2016 por Yanan Li en China (Li & Ge, 2016), quien investiga la sincronización de movimiento para la colaboración humano-robot de modo que el robot pueda seguir "activamente" a su compañero humano. Mas recientemente en el 2019, son varias las investigaciones de guiado Háptico, como la de Schleer (Schleer, Drobinsky, & Radermacher, 2019), donde para él la evolución de la cirugía ha dado como resultado una gran cantidad de sistemas que varían en su campo de aplicación, tamaño y grado de autonomía. Especialmente los sistemas que combinan principios de los llamados sistemas robóticos sinérgicos y maestros-esclavos-telemanipuladores.

### 2.5 La Robótica guiada y la visión artificial

Se puede definir la "Visión Artificial" como un campo de la "Inteligencia Artificial" que, mediante la utilización de las técnicas adecuadas, permite la obtención, procesamiento y análisis de cualquier tipo de información especial obtenida a través de imágenes digitales (Catalunya, 2011).

Para Cognex (COGNEX, 2003), el guiado se puede realizar por varias razones. En primer lugar, los sistemas de visión artificial pueden localizar la posición y orientación de una pieza, compararla con una tolerancia especificada, y garantizar que está en el ángulo correcto para verificar el montaje apropiado. A continuación, el guiado se puede usar para notificar la localización y orientación de una pieza en el espacio 2D o 3D a un robot o unidad de control de una máquina, para que el robot pueda localizar la pieza o la máquina pueda alinearla.

Yang Xu realiza un innovador Guiado mediante el uso de un sistema BCI (Xu et al., 2019) (interfaz cerebro-ordenador), su investigación lleva por título "Control compartido de un brazo robótico utilizando una interfaz no invasiva cerebro-computadora y guía de visión por computadora", donde para el control de un brazo robótico usando una interfaz cerebro-computadora (BCI) para actividades de alcance y agarre.

Md. Hazrat desarrolla un robot manipulador basado en visión para aplicaciones industriales (Ali, Aizat, Yerkhan, Zhandos, & Anuar, 2018), donde presenta un proceso de múltiples etapas del desarrollo de un manipulador robot de clasificación de objetos basado en visión para aplicaciones industriales. Malgorzata (Laganowska, 2019) investiga sobre la aplicación de sistemas de visión a la navegación de robots móviles mediante marcadores.

## 3. CRITERIOS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL CINEMÁTICO GUIADO Y COLABORATIVO

### 3.1 Posibles aplicaciones de la integración de la robótica guiada, colaborativa y la visión artificial.

A partir de (Catalunya, 2011), (Feng, Jiang, Yang, Du, & Li, 2019), (COGNEX, 2003), (Guiffo Kaigom & Roßmann, 2017), (Wrede et al., 2013), (Odorico, 2004), (Massa et al., 2015), y (Zakharyan, 2017) se plantean las aplicaciones tenidas en cuenta en el proyecto, siendo principalmente Operaciones de Picking (recolección) como Pick & Place y Bin Picking.

### 3.2 Parámetros de diseño, en cuanto a la morfología de los manipuladores.

Los parámetros de diseño que establecen la morfología del manipulador se determinan según un estudio de la morfología del brazo humano, teniendo en cuenta sus dimensiones y grados de libertad, con la intención de desarrollar un manipulador capaz de imitar en lo posible los movimientos de dicho brazo humano.

La fisiología del hombro se puede descomponer en 3 grados de libertad. Un primer grado de libertad permite la rotación en el eje transversal, creando los movimientos de la flexión y extensión del brazo en el plano sagital. Un segundo grado de libertad permite rotar en el eje anteroposterior, permitiendo los movimientos de aducción y abducción en el plano frontal. Un segundo grado de libertad permite la rotación en el eje vertical, con el hombro en abducción en 90 grados permite

los movimientos de la flexoextensión horizontal o la rotación medial y lateral. El codo tiene un grado de libertad que permite realizar los movimientos de la extensión y flexión del antebrazo con referencia al brazo. También existe otro grado de libertad en el antebrazo, que me permite la rotación en su eje vertical creando los movimientos de la pronación y supinación como se puede ver en la imagen, permitiendo colocar la palma de la mano boca arriba o boca abajo. Por último, se observaron que la muñeca se puede descomponer en 2 grados de libertad, quien es la que me genera los movimientos de la flexión, extensión, abducción y adducción. La distribución en general los siguientes 7 grados de libertad se observa en la figura 1.

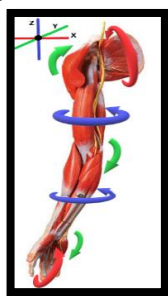


Figura 1. Grados de libertad del brazo humano (autor)

### 3.3 Condiciones mínimas necesarias para la integración de la robótica guiada con la robótica colaborativa y la visión artificial.

A continuación, se listan las condiciones mínimas necesarias para la integración de la robótica guiada con la robótica colaborativa y la visión artificial en este proyecto:

- Planificación de ruta libre de colisiones
- Sensórica inteligente
- Planificación de tareas y movimiento
- Control de seguridad
- Transporte seguro de objetos
- Modelado del entorno

### 3.4 Requerimientos para cumplir con un modelo Ciberfísico

Según los lineamientos propuestos en (Lins et al., 2020), quien define los requisitos, los componentes y las tecnologías necesarias para adaptar los equipos industriales a la industria 4.0, donde todo su proceso se basa en el modelo arquitectónico de referencia para la Industria 4.0 (RAMI 4.0), una arquitectura generalizada de la Industria 4.0. Estableciendo: El proceso debe ser basado en la arquitectura CPPS, la cual se muestra en la figura 2, con la representación del mundo físico y el mundo digital, el proceso de adaptación se estructura en tres partes: infraestructura,

comunicación y aplicación. En infraestructura, existe un contraste tecnológico al comparar equipos industriales antiguos y un CPPS, lo que permite la ejecución del proceso de actualización. Antes del proceso de adaptación, la infraestructura solo cuenta con equipos industriales y sus tecnologías de fábrica.

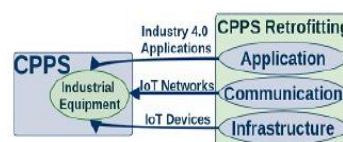


Figura 2. estructura CPPS (Lins et al., 2020)

## 4. HARDWARE Y SOFTWARE

### 4.1 Hardware

El diseño (figura 3) fue impreso en 3D, en material PLA. Se utilizaron los servos inteligentes A1-16 de la empresa XYZrobot y una tarjeta Arduino para el control de los mismos. Cabe indicar también que se utilizó un electroimán como efector final. Para la extracción de los movimientos del humano por visión artificial se utilizó un Kinect V2. El diseño de los manipuladores se presenta a continuación:

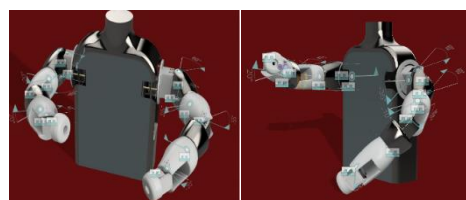


Figura 3. CAD de los manipuladores diseñados (autor)

### 4.2 Software

El desarrollo de la programación del robot, se realizó en Java, haciendo uso del software libre Processing, así como también el desarrollo del HMI. Programando allí las rutinas de guiado y de control cinemático. Para todo lo referente al procesamiento de las señales obtenidas del Kinect V2, se utilizó la librería desarrollada para Processing por Thomas Sánchez Lengeling.

## 5. MORFOLOGÍA DEL MANIPULADOR Y MODELAMIENTO CINEMÁTICO

A partir del estudio que se realiza a los brazos del ser humano, se diseñó la morfología del manipulador con 6 grados de libertad de manera



que las 3 primeras articulaciones permitan los movimientos del hombro, la cuarta articulación la flexoextensión del codo y las dos últimas articulaciones la libertad de los giros de la muñeca.

### 5.1 Modelo cinemático

Denavit-Hartenberg (DH) crearon un algoritmo que permite la obtención del modelo cinemático directo. El cual es un método matricial sistemático que permite establecer sistemas de coordenadas ligados a cada eslabón de un mecanismo, para así determinar la cinemática completa del mismo.

**Parámetros de DH,** Al aplicar el procedimiento DH, se establece para cada articulación del robot un sistema de coordenadas cartesiano, como se observa en la figura 4.

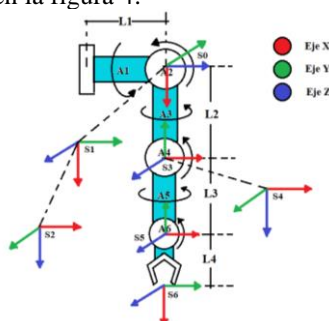


Figura 4. Sistemas de coordenadas del DH (autor)

Para el manipulador de estudio, los parámetros de DH se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros DH del manipulador (autor)

Articulación	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	L1	0	90
2	$\theta_2+90$	0	0	90
3	$\theta_3$	L2	0	-90
4	$\theta_4$	0	0	90
5	$\theta_5$	L3	0	-90
6	$\theta_6-90$	0	L4	0

Teniendo los parámetros DH se calculan las matrices de transformación homogénea para cada uno de los sistemas coordenados.

### 5.2 Análisis del espacio de trabajo

**Estudio del espacio de trabajo con 1 brazo manipulador,** Con la morfología del robot diseñado (figura 4), la mayoría de las posibles posiciones del efector final tienden hacia el costado derecho del cuerpo (en el caso del brazo derecho, aplicándose de manera viceversa para el brazo izquierdo) como se observa en la figura 5, sin embargo, son más las posiciones que tienden hacia el frente y hacia el costado izquierdo en comparación con otras morfologías, además de que se ajusta mejor a los movimientos del humano.

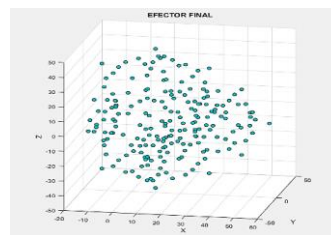


Figura 5. Dispersión del espacio de trabajo (autor)

**Estudio del espacio de trabajo con los dos brazos manipuladores,** se tiene que ambos manipuladores pueden trabajar sobre una misma pieza al tiempo en un espacio de 40 cm de ancho y 100 cm de fondo como se observa en la figura 6 (b). teniendo un área de trabajo general (donde no necesariamente están los dos manipuladores en contacto con la pieza a la vez) de 120 cm de alto y 100cm de fondo formado un entorno esférico de trabajo como se observa en la figura 6 (a).

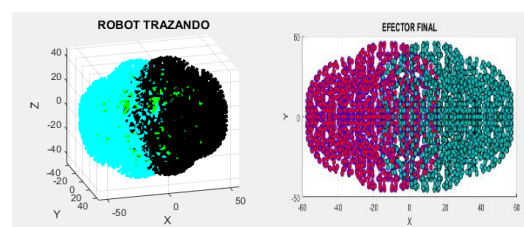


Figura 6. (a) Vista 3D y (b) Vista superior (autor)

## 6. PERCEPCIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE LOS MOVIMIENTOS DE LAS EXTREMIDADES SUPERIORES POR VISIÓN ARTIFICIAL

### 6.1 Procesamiento de las señales percibidas por el sistema de visión artificial.

El Kinect que es un dispositivo capaz de capturar el esqueleto humano, lanza una serie de muchos rayos infrarrojos que justo con un sensor infrarrojos detecta la profundidad en muchos puntos del entorno. Por medio de un algoritmo que se provee a través de una librería gratuita que proporciona los diseñadores del software utilizado, se obtienen las articulaciones, luego se extrae los valores de posición en X, Y y Z de cada articulación y se guardan las coordenadas en un vector diferente para cada uno, cada vector tiene un tamaño de 5 posiciones para los puntos del hombro, codo, muñeca, pulgar y punto final de mano del brazo derecho, y se hace lo mismo para guardar los puntos articulares del brazo izquierdo.

### 6.2. Modelamiento para la extracción de posiciones articulares del brazo humano.

A partir de las señales percibidas por el sistema de visión artificial, sabemos los puntos de posición

de cada articulación de las extremidades superiores del humano, como lo es el hombro, codo, muñeca y punto final de la mano. Teniendo estos puntos, se modelaron y obtuvieron los valores angulares de cada articulación para poder enviar estos valores a cada uno de los motores del manipulador.

El rango de trabajo de los motores son: Motor 1 y 2 de 0 a 180 grados, motor 3 de 0 a 110 grados, motor 4 de 0 a 180 grados, motor 5 de -90 a 90 grados y el motor 6 tiene un rango de trabajo de 0 a 180 grados. Primeramente, se estudiaron las dos primeras posiciones, que son el hombro ( $P1 = (x1, y1, z1)$ ) y el codo ( $P2 = (x2, y2, z2)$ ), y son los puntos que forman el eslabón del brazo. Sabiendo la longitud del eslabón del brazo a partir de la magnitud de la resta vectorial del punto  $P1$  y  $P2$ , se modelo el valor angular de la segunda articulación que es la que genera la aducción y abducción del brazo. Sin importar el giro que dé la primera articulación, el brazo siempre tendrá el mismo valor de posición en X. La magnitud del eslabón se obtiene a partir de la ecuación 1.

$$L2 = \sqrt{(x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2 + (z2 - z1)^2} \quad (1)$$

Al modelar la segunda articulación con el ángulo que se forma entre el eje X y el eslabón del brazo, se obtienen dos ecuaciones, que se utilizan dependiendo si,  $\theta_2$  tiene un valor menor de 90 grados (ver figura 7) o mayor a 90 (ver figura 8).

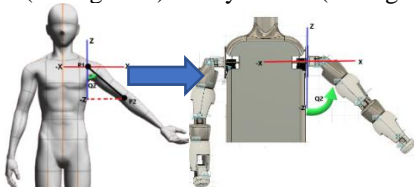


Figura 7. Vista frontal del brazo con  $\theta_2$  menor a  $90^\circ$  (autor)

Si  $\theta_2$  es menor a 90 grados se utiliza la ecuación 2.

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{x2 - x1}{L2}\right) \quad (2)$$

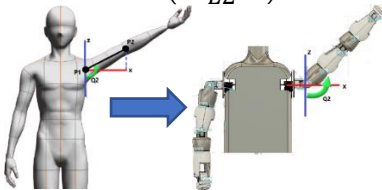


Figura 8. Vista frontal del brazo con  $\theta_2$  mayor a  $90^\circ$  (autor)

Si  $\theta_2$  es mayor a 90 grados se utiliza la ecuación 3.

$$\theta_2 = 90 + \cos^{-1}\left(\frac{x2 - x1}{L2}\right) \quad (3)$$

Para saber si  $\theta_2$  es mayor o menor 90 grados, en una vista lateral del brazo se analizó la posición  $P2$  con respecto a  $P1$  y dependiendo en que cuadrante se encontraba el brazo, se condiciona el valor angular de la segunda y primera articulación. Si el brazo se encuentra en una posición con valores en Z y Y negativos (ver figura 9), estaría en el cuarto cuadrante.

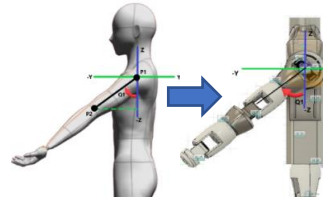


Figura 9. Vista lateral del brazo con valores angulares en  $\theta_1$  y  $\theta_2$  menor a  $90^\circ$  (autor)

Donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son menor a 90 grados y para hallar los valores angulares se utilizan las ecuaciones 4 y 2 respectivamente.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{z2 - z1}{y2 - y1}\right) \quad (4)$$

Si el brazo está en una posición con valores de Z positivo y Y negativo (ver figura 10), estaría en el segundo cuadrante.

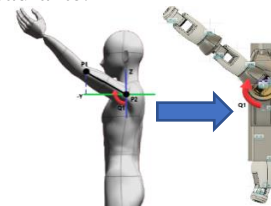


Figura 10. Vista lateral del brazo, con  $\theta_1$  mayor a  $90^\circ$  y  $\theta_2$  menor a  $90^\circ$

Donde  $\theta_1$  es mayor a 90 grados y se halla a partir de la ecuación 5 y  $\theta_2$  es menor a 90 grados y se obtiene a partir de la ecuación 2

$$\theta_1 = 90 - \tan^{-1}\left(\frac{z2 - z1}{y2 - y1}\right) \quad (5)$$

Si el brazo está en una posición con valores de Z y Y positivos (ver figura 11), estaría en el primer cuadrante, lo que significa que el brazo se encontraba en el tercer cuadrante, con  $\theta_1$  menor a 90 grados, y con valor de  $\theta_2$  mayor a 90 grados, hizo llegar al brazo al segundo cuadrante girando en el eje Y.

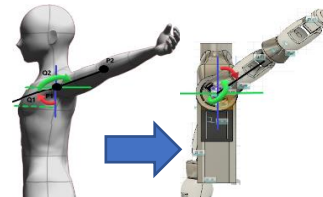


Figura 11. Vista lateral del brazo, con  $\theta_1$  menor a  $90^\circ$  y  $\theta_2$  mayor a  $90^\circ$  (autor)

Para esto sea posible los valores de  $\theta_1$  y  $\theta_2$  se obtienen a partir de las ecuaciones 4 y 3.

Si el brazo está en una posición con valores de Z negativo y Y positivos, estaría en el cuarto cuadrante (ver figura 12), lo que significa que el brazo se encontraba en el segundo cuadrante, con  $\theta_1$  mayor a 90 grados, y debido a que  $\theta_2$  teniendo un valor mayor a 90 grados, hizo que el brazo llegara al cuarto cuadrante girando en el eje Y. para obtener sus valores angulares, en este caso se utilizan las ecuaciones 5 y 3 respectivamente.

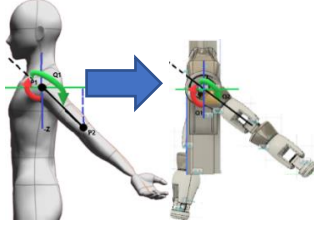


Figura 12. Vista lateral del brazo, con valores angulares en  $\theta_1$  y  $\theta_2$  mayor a  $90^\circ$  (autor)

Después de modelar y obtener los dos primeros valores articulares, se estudió la cuarta articulación. Como el rango de trabajo de  $\theta_4$  no tiene valores negativos, se halló por medio de la ecuación 6, que se obtiene a partir del ángulo entre vectores como se observa en la figura 13, a través del producto punto.

$$\theta_4 = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| |\mathbf{B}|} \right) \quad (6)$$

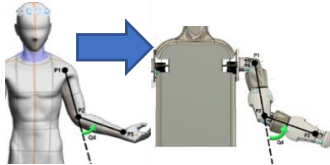


Figura 13. Movimiento de la cuarta articulación del brazo (autor)

A: es el vector que se forma entre la resta del P2 menos el P1 (ver 7).

$$\vec{A} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \quad (7)$$

La magnitud de 7 es el valor de la longitud del eslabón del brazo L2 (ver ecuación 8).

$$L_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (8)$$

B: es el vector que se forma entre la resta del P3 menos el P2 (ver 9).

$$\vec{B} = (x_3 - x_2, y_3 - y_2, z_3 - z_2) \quad (9)$$

La magnitud de 9 es el valor de la longitud del eslabón del antebrazo L3 (ver ecuación 10).

$$L_3 = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} \quad (10)$$

No importa la rotación que  $\theta_3$  genere en el eje vertical del brazo (como se observa en la figura 14), el ángulo que se forma entre la posición del punto del codo y la resta del punto 2 y el punto 3 siempre va a ser  $\theta_4$  (ver figura 13). Teniendo los valores angulares  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_4$ , se hizo la directa analítica por el método de Denavit Hartenberg del brazo solo con las primeras 4 articulaciones para obtener el valor angular  $\theta_3$ . Los parámetros obtenidos se muestran en la tabla.

Tabla 2. Parámetro DH del manipulador hasta la cuarta articulación

	Q	d	a	Alfa
1	Q1	0	0	90
2	Q2+90	0	0	90
3	Q3	L2	0	-90
4	Q4-90	0	L3	0

Con ayuda de la herramienta Matlab, se obtuvo las ecuaciones analíticas de la posición de la muñeca con respecto al hombro, y se utiliza la ecuación 11 de PX porque es la única que me permite despejar Q3 y obtener un único valor real (ver despeje en 12 y 13).

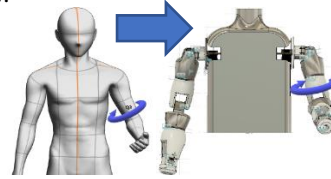


Figura 14. Rotación medial de la quinta articulación del brazo (autor)

$$(x_3 - x_1) = L_3 S_2 C_4 + L_2 S_2 + L_3 C_3 S_4 C_2 \quad (11)$$

$$\cos(\theta_3) = \frac{(x_3 - x_1) - L_3 S_2 C_4 - L_2 S_2}{L_3 C_3 S_4 C_2} \quad (12)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left( \frac{(x_3 - x_1) - L_3 S_2 C_4 - L_2 S_2}{L_3 C_3 S_4 C_2} \right) \quad (13)$$

Para obtener el valor angular de  $\theta_6$  también se obtuvo a través del producto punto entre los vectores que forman los puntos del antebrazo y la mano (ver figura 15), restandoles el vector del brazo y colocando estos dos vectores en el mismo origen como se observa en la ecuación 14.

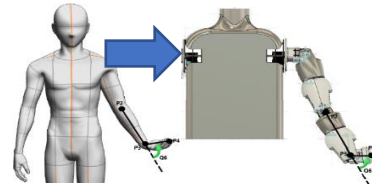


Figura 15. Flexión y extensión de la muñeca (autor)

$$\theta_6 = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{C}}{|\mathbf{L3}| |\mathbf{L4}|} \right) \quad (14)$$

C: es el vector que se forma entre la resta del P4 menos el P3, que son los puntos que forman la mano (ver ecuación 15).

$$\vec{C} = (x_3 - x_2, y_3 - y_2, z_3 - z_2) \quad (15)$$

L4: es la magnitud de la resta de los puntos P4 y P3, que se obtiene a partir de la ecuación 16

$$L4 = \sqrt{(x3 - x2)^2 + (y3 - y2)^2 + (z3 - z2)^2} \quad (16)$$

Teniendo los valores de  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  y  $\theta_4$ , se formó la matriz  ${}^0A_4$  se le sacó la inversa, y a partir de la ecuación 17 se despeja la matriz de  ${}^4A_6$  para obtener 18

$${}^0\mathbf{A}_6 = {}^0\mathbf{A}_4 * {}^4\mathbf{A}_6 \quad (17)$$

$${}^4\mathbf{A}_6 = [{}^0\mathbf{A}_4]^{-1} * {}^0\mathbf{A}_6 \quad (18)$$

De la matriz  ${}^4A_6$  se sacaron 19, 20 y 21, que son las ecuaciones algebraicas de la posición.

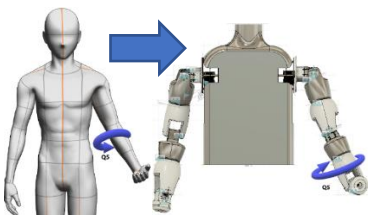
$$Px_{46} = L3 + L4 * \cos(\theta6) \quad (19)$$

$$Py_{46} = L4 * \sin(\theta5) * \sin(\theta6) \quad (20)$$

$$Pz_{46} = -L4 * \cos(\theta5) * \sin(\theta6) \quad (21)$$

Al multiplicar  $[{}^0A_4]^{-1} * {}^0A_6$  se tiene los valores de  $Px_{46}$ ,  $Py_{46}$ ,  $Pz_{46}$ . Se despeja  $\theta_5$  de las ecuaciones 19, 20 y 21 y se tiene 22. En la figura 16 se observa como la articulación 5 crea la supinación y pronación del antebrazo.

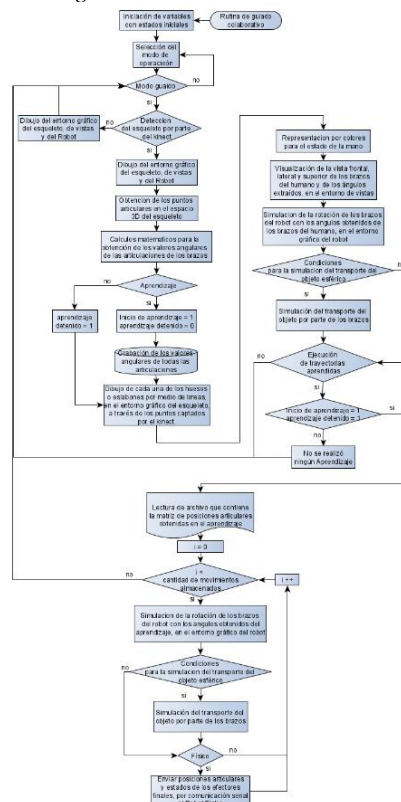
$$\theta 5 = \tan^{-1} \left( \frac{Py_{46}}{-Pz_{46}} \right) \quad (22)$$



**Figura 16.** Supinación y pronación por medio de **05**  
(autor)

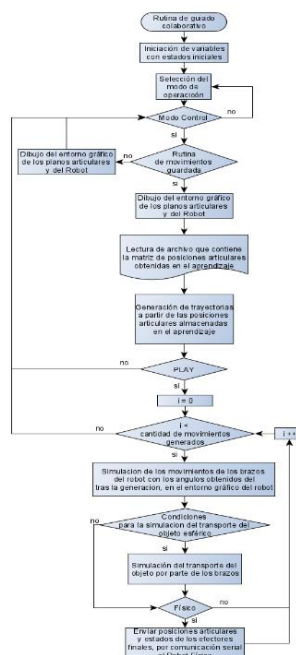
## 7. DISEÑO DEL CONTROL CINEMÁTICO GUIADO Y COLABORATIVO

## 7.2 Sistema guiado colaborativo



*Figura 17. Diagrama de flujo de rutina de guiado colaborativo (autor)*

### 7.3 Sistema de control cinemático guiado colaborativo



*Figura 18. Diagrama de flujo de rutina de Guiado colaborativo con control cinemático (autor)*



## 8. PLANIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Según el estudio del espacio de trabajo realizado anteriormente, se estipulan las posibles siguientes actividades:

- Actividades donde se desplace un objeto de un costado a otro, donde se intercambia el objeto de las manos del operario en la mitad del recorrido.
- Actividades donde se simule a un operario trabajando con sus dos brazos en la misma tarea, solo en posiciones donde la tarea se conlleve completamente o parcialmente de frente a su cuerpo.
- Actividades donde se simulen a dos humanos trabajando en una misma tarea a un costado de su cuerpo, uno al lado del otro respectivamente.

## 9. RESULTADOS

### 9.1 Guiado

Por medio del sensor de visión artificial se obtienen las posiciones articulares reales de todo el cuerpo y se dibuja el esqueleto humano. Con los valores de posición real de los brazos, se modelan los valores angulares de cada articulación y se simula el movimiento de los brazos del robot. También se dibujan las vistas de cada brazo a partir de los ángulos obtenidos.

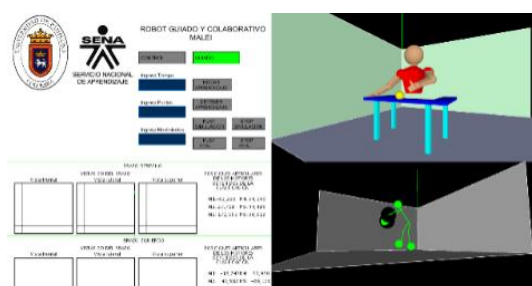


Figura 19. Movimientos simulados de los brazos del robot guiados por los movimientos del esqueleto (autor)

### 9.2 Guiado con control cinemático.

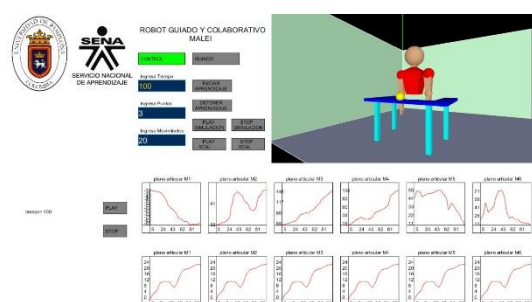


Figura 20. Resultado de la generación de las trayectorias bajo un control cinemático (autor)

El guiado con control cinemático es la realización de las trayectorias aprendidas, donde para ello se toman la cantidad de movimientos determinados por el usuario, para ese caso se definieron 100 movimientos, por lo cual el sistema determina solo 100 movimientos de por ejemplo 1000 guardados en el aprendizaje, conservando la naturaleza y objetivo de la tarea. Y posteriormente genera trayectorias, las cuales se observan en los planos articulares de la figura 20, entre esos 100 puntos de manera que se garantice un movimiento suave y la vida útil de los motores, mediante un interpolador cúbico.

## 10. CONCLUSIONES

Luego del estudio de la morfología de las extremidades superiores del ser humano, se estudiaron los grados de libertad que presenta el brazo humano, concluyendo que el análisis por grado de libertad en cada articulación proporciona la información necesaria, para establecer una morfología que puede realizar la mayoría de movimientos humanos, lo cual se corrobora en el estudio del espacio de trabajo del diseño planteado.

Al procesar la posición de los puntos articulares obtenidos por el sistema de visión artificial, se pueden calcular los valores angulares tras un estudio geométrico y analítico, donde la combinación de ambos métodos facilita la solución de la morfología del brazo humano.

La realización del estudio morfológico por valores articulares y no por valores posicionales, permite poder simular el proceso de manera más práctica pudiendo escalar a más fácilmente a un robot de tamaño determinado sin importar el tamaño de las extremidades del operario que lo entrena.

La articulación de la muñeca que devuelve el sensor está desfasado, y se localiza en el punto medio de la palma de la mano, esto hace que al extender o flexionar la mano completamente, los valores extremos del rango de trabajo de la quinta articulación del manipulador no se formen, de esta manera se limita su rango de trabajo, de lo que surge la necesidad de compensar la posición final de la mano, por medio de las ecuaciones de la cinemática inversa, al trabajar con el sistema de percepción Kinect.

A pesar de delimitar a 100 movimientos para la generación de trayectorias de 1000 aprendidos, se conserva la naturaleza de la tarea, concluyendo que el muestreo de puntos tomados es redundante, pero es necesario para observar mayor fluidez entre movimientos en el simulador, en el momento de simular el guiado sin control cinemático previo a la generación de las trayectorias.

## REFERENCIAS

- Ali, M. H., Aizat, K., Yerkhan, K., Zhandos, T., & Anuar, O. (2018). Vision-based Robot Manipulator for Industrial Applications. *Procedia Computer Science*, 133, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.025>
- Battle, J. A., Font, J. M., & Escoda, J. (2004). Guiado de un robot móvil con cinemática de triciclo. *Anales de Ingeniería Mecánica*, 15(4), 2981–2986.
- Catalunya, G. De. (2011). *Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales*.
- COGNEX. (2003). *Introducción a la visión artificial. Una guía para la automatización de procesos y mejoras de calidad*.
- Fang, B., Guo, X., Wang, Z., Li, Y., Elhoseny, M., & Yuan, X. (2019). Collaborative task assignment of interconnected, affective robots towards autonomous healthcare assistant. *Future Generation Computer Systems*, 92, 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.09.069>
- Feng, X., Jiang, Y., Yang, X., Du, M., & Li, X. (2019). Computer vision algorithms and hardware implementations: A survey. *Integration*, 69(August), 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2019.07.005>
- Francesco, P., & Paolo, G. G. (2017). AURA: An Example of Collaborative Robot for Automotive and General Industry Applications. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.116>
- Goldberg, K. (2019). Robots and the return to collaborative intelligence. *Nature Machine Intelligence*, 1(1), 2–4. <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0008-x>
- Guiffo Kaigom, E., & Roßmann, J. (2017). Physics-based simulation for manual robot guidance—An eRobotics approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 43, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.015>
- Kadir, B. A., Broberg, O., & Conceição, C. S. da. (2019). Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in Industry 4.0. *Computers and Industrial Engineering*, 137(December 2018), 106004. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106004>
- Laganowska, M. (2019). Application of vision systems to the navigation of mobile robots using markers. *Transportation Research Procedia*, 40, 1449–1452. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.200>
- Levratti, A., Riggio, G., Fantuzzi, C., De Vuono, A., & Secchi, C. (2019). TIREBOT: A collaborative robot for the tire workshop. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57(December 2018), 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.001>
- Li, Y., & Ge, S. S. (2016). Force tracking control for motion synchronization in human-robot collaboration. *Robotica*, 34(6), 1260–1281. <https://doi.org/10.1017/s0263574714002240>
- Lins, T., Augusto, R., & Oliveira, R. (2020). Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4 . 0. *Computers & Industrial Engineering*, 139(November 2019), 106193. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106193>
- Massa, D., Callegari, M., & Cristalli, C. (2015). Manual guidance for industrial robot programming. *Industrial Robot*, 42(5), 457–465. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2014-0413>
- Mohammed, A., & Wang, L. (2018). Brainwaves driven human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 67(1), 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.048>
- Odorico, A. (2004). Marco teórico para una robótica pedagógica. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales Vol. 1(3)*, 1(3), 34–46. Recuperado de <http://laboratorios.fi.uba.ar/lie/Revista/Articulos/010103/A4oct2004.pdf>
- Omar Arturo, D. R., Alejandro, J. S., Vicente, P. V., Francisco, R. S., & Gabriel, S. C. (2011). Neurorehabilitación Robótica Basada en Guiado Kinestésico Local para Miembro Superior con Movimiento Involuntario. *Ciencia Universitaria*, 2(February 2016), 19–33.
- Oyekan, J. O., Hutabarat, W., Tiwari, A., Grech, R., Aung, M. H., Mariani, M. P., ... Dupuis, C. (2019). The effectiveness of virtual environments in developing collaborative strategies between industrial robots and humans. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55(September 2017), 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.006>
- Realvásquez-Vargas, A., Cecilia Arredondo-Soto, K., Luis García-Alcaraz, J., Yail Márquez-Lobato, B., & Cruz-García, J. (2019). Introduction and configuration of a collaborative robot in an assembly task as a means to decrease occupational risks and increase efficiency in a manufacturing company. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57(December 2018), 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.015>
- Rosenstrauch, M. J., Pannen, T. J., & Krüger, J. (2018). Human robot collaboration - Using kinect v2 for ISO/TS 15066 speed and

- separation monitoring. *Procedia CIRP*, 76, 183–186.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.01.026>
- Schleer, P., Drobinsky, S., & Radermacher, K. (2019). Evaluation of Different Modes of Haptic Guidance for Robotic Surgery. *IFAC-PapersOnLine*, 51(34), 97–103.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.01.035>
- Schou, C., Andersen, R. S., Chrysostomou, D., Bøgh, S., & Madsen, O. (2018). Skill-based instruction of collaborative robots in industrial settings. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 53(March), 72–80.  
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.03.008>
- Turja, T., Aaltonen, I., Taipale, S., & Oksanen, A. (2019). Robot acceptance model for care (RAM-care): A principled approach to the intention to use care robots. *Information & Management*, ((in press)), 103220.  
<https://doi.org/10.1016/j.im.2019.103220>
- Vasconez, J. P., Kantor, G. A., & Auat Cheein, F. A. (2019). Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges. *Biosystems Engineering*, 179, 35–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005>
- Wrede, S., Emmerich, C., Grünberg, R., Nordmann, A., Swadzba, A., & Steil, J. (2013). A User Study on Kinesthetic Teaching of Redundant Robots in Task and Configuration Space. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2(1), 56–81.  
<https://doi.org/10.5898/jhri.2.1.wrede>
- Xu, Y., Ding, C., Shu, X., Gui, K., Bezsudnova, Y., Sheng, X., & Zhang, D. (2019). Shared control of a robotic arm using non-invasive brain–computer interface and computer vision guidance. *Robotics and Autonomous Systems*, 115, 121–129.  
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.02.014>
- Zakharyan, E. (2017). *DESARROLLO DE APLICACIONES MEDIANTE ROBOTS COLABORATIVOS BASADAS EN INTERFACES NATURALES*.